



№1-2024

ISSN 1999-9429

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Перспективы применения робототехнических комплексов
- Системы управления и моделирования
- Связь, навигация и наведение
- Техническое зрение

ИЗВЕСТИЯ ЮФУ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-28889 от 12.07.2007

Федеральная служба по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи
и охраны культурного наследия

Научно-технический и прикладной журнал

Издается с 1995 года, до середины 2007 года под названием «Известия ТРТУ»

Подписной индекс ПС704

№ 1 (237). 2024 г.

Тематический выпуск

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Редакционный совет

Курейчик В.В. (гл. редактор); Кравченко Ю.А. (зам. гл. редактора); Бородянский И.М. (ученый секретарь); Абрамов С.М.; Агеев О.А.; Бабенко Л.К.; Боженюк А.В.; Веселов Г.Е.; Гайдук А.Р.; Горбанёва О.И.; Каляев И.А.; Коноплев Б.Г.; Касьянов А.О.; Левин И.И.; Куповых Г.В.; Лысенко И.Е.; Малюков С.П.; Медведев М.Ю.; Мельник Э.В.; Никитов С.А.; Обуховец В.А.; Панич А.Е.; Петров В.В.; Пшихопов В.Х.; Редько В.Г.; Румянцев К.Е.; Семенихина Д.В.; Сергеев Н.Е.; Стемпковский А.Л.; Сухинов А.И.; Тополов В.Ю.; Турулин И.И.; Угольницкий Г.А.; Усов А.Б.; Федосов В.П.; Целых А.Н.; Юханов Ю.В.

Учредитель Южный федеральный университет.

Издатель Южный федеральный университет.

Ответственный за выпуск Косенко Е.Ю.

Технический редактор Ярошевич Н.В.

Оригинал-макет выполнен Ярошевич Н.В.

Дата выхода в свет 12.04. 2024 г. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Офсетная печать. Усл. печ. л. – 26,3. Уч.-изд. л. – 21,7.

Заказ № 9479. Тираж 250 экз.

Адрес издателя: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

Адрес типографии: Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ. 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. 8(863)243-41-66.

Адрес редакции: 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 22, ЮФУ, тел. +7 (928) 909-57-82, e-mail: iborodyanskiy@sfedu.ru, <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.

16+

Цена свободная

ISSN 1999-9429 (Print)

ISSN 2311-3103 (Online)

© Южный федеральный университет, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Л.А. Мартынова, М.Б. Розенгауз МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПУТИ ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЯ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ	6
П.П. Чернусь, П.П. Чернусь, А.А. Яковлев, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий ОБОСНОВАНИЕ ОБЛИКА ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОДЪЕМ ПОДВОДНОГО ГРУЗА.....	18
В.К. Абросимов, С.М. Лапин ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕОРИИ СХОДСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ СКОПЛЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ИНТЕРЕСА НА МЕСТНОСТИ	29
Д.Н. Гонтарь, В.В. Соловьев, Р.Ю. Джаныбеков, А.В. Палеев, В.В. Семак АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ БОЕВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНО-УДАРНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	43
Б.С. Лапин, И.Л. Ермолов, О.П. Гойдин, С.А. Собольников ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ОПОРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ	57
Е.В. Павлов, В.И. Ершов, А.Ю. Баранник, А.В. Лагутина ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ И ДРУГИХ НЕОТЛОЖНЫХ РАБОТ.....	68
Б.В. Румянцев, С.В. Прокопчина, А.А. Кочкаров АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ	77
Л.А. Рыбак, А.А. Волошкин, В.С. Перевузник, Д.И. Малышев ОПТИМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ МЕХАНОТЕРАПИИ НА БАЗЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ.....	88
И.Е. Селезнева ЭКОНОМИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ И МЕХАНИЗМЫ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ	101
З.В. Нагоев, К.Ч. Бжихатлов, О.З. Загазежева НЕЙРОКОГНИТИВНЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ФЕДЕРАТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ В РЕАЛЬНОЙ КОММУНИКАТИВНОЙ СРЕДЕ	111

РАЗДЕЛ II. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Р. Гайдук, В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.Г. Гисцов НЕПРЕРЫВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМИ НЕАФФИННЫМИ ОБЪЕКТАМИ	122
Р.Ф. Файзуллин, Е.А. Магид ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОКРЫТИЯ ТЕРРИТОРИИ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ НАЗЕМНОЙ МОБИЛЬНОЙ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ: ФОРМИРОВАНИЕ ХРОМОСОМЫ	134

А.П. Зыков, П.Н. Миронов МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ РТК.....	142
Д.В. Котов, О.Б. Лебедев УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ БПЛА С СОБЛЮДЕНИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СТРОЯ НА ОСНОВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ КОЛЛЕКТИВНОЙ АДАПТАЦИИ.....	155
И.В. Образцов, М.Г. Пантелеев ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРАБЛЕЙ ВМФ.....	167
Ф.А. Хуссейн, В.А. Костюков, И.Д. Евдокимов МЕТОД РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ МУЛЬТИ-КОММИВОЯЖЁРА В СРЕДЕ БЕЗ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ОСНОВЕ УМЕНЬШЕНИЯ РАЗМЕРА ПРОСТРАНСТВА РЕШЕНИЙ.....	181

РАЗДЕЛ III. СВЯЗЬ, НАВИГАЦИЯ И НАВЕДЕНИЕ

Е.А. Бабушкин, Р.В. Калашников, А.М. Лаврентьев ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ С КОМПЕНСАЦИОННЫМИ КАНАЛАМИ, ИНТЕГРОВАННЫМИ В ФАЗИРОВАННУЮ АНТЕННУЮ РЕШЕТКУ ПРОХОДНОГО ТИПА.....	193
К.Г. Кебквал, А.А. Кабанов, В.В. Альчаков, В.А. Крамарь, М.Э. Димин ПРОГРАММНЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В СИСТЕМАХ МОРСКОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ.....	202
Ю.С. Баричев, О.П. Гойдин, В.П. Носков, С.А. Собольников ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ РОБОТОВ ВОЗДУШНОГО И НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ В УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЕ.....	213
П.А. Гессен, А.И. Лизин, В.А. Павлова, В.Д. Саенко, В.А. Тупиков ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ.....	225
А.Е. Морозов, Н.Д. Богданов АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАСС АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В АЛГОРИТМАХ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	234

РАЗДЕЛ IV. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ

А.Е. Архипов, И.С. Фомин, В.Д. Матвеев КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СЕГМЕНТАЦИИ, СОПРОВОЖДЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИДЕОАНАЛИТИКИ.....	247
Н.А. Бочаров, И.Н. Бычков, П.В. Коренев, Н.Б. Парамонов ЖИВУЧЕСТЬ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	257
В.В. Ковалев, Н.Е. Сергеев РАСШИРЕНИЕ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА В ЗАДАЧЕ ПОИСКА И РАСПОЗНАВАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ....	267
К.И. Морев, П.А. Ледерер ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ НАБЛЮДАЕМОЙ СЦЕНЫ ИЗ СЕРИИ СНИМКОВ ДВИЖУЩЕЙСЯ КАМЕРЫ.....	276
С.М. Соколов АНАЛИЗ СЦЕНЫ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ПОДВИЖНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	285

CONTENT

SECTION I. PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ROBOTIC COMPLEXES

L.A. Martynova, M.B. Rosengauz METHOD FOR DETERMINING THE SPATIAL PATH OF AVOIDING AN OBSTACLE BY AN AUTONOMOUS UNINHABITED UNDERWATER VEHICLE	7
P.P. Chernus, P.P. Chernus, A.A. Yakovlev, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy JUSTIFICATION FOR IMAGE OF EQUIPMENT FOR UNDERWATER CARGOES	19
V.K. Abrosimov, S.M. Lapin ON THE USE OF SIMILARITY THEORY TO ASSESS THE DYNAMICS OF CLUSTERS OF SUBJECTS OF INTEREST ON THE GROUND	29
D.N. Gontar, V.V. Soloviev, R.Yu. Dzhanybekov, A.V. Paleev, V.V. Semak ALGORITHM FOR ASSESSING THE COMBAT EFFECTIVENESS OF THE APPLICATION OF A RECONNAISSANCE-STRIKE ROBOTIC COMPLEX FOR MILITARY PURPOSES	44
B.S. Lapin, I.L. Ermolov, O.P. Goydin, S.A. Sobolnikov BUILDING A MAP OF REFERENCE SURFACES TO SOLVE THE PROBLEM OF PLANNING THE MOVEMENT OF A GROUP OF GROUND ROBOTS	57
E.V. Pavlov, V.I. Ershov, A.Y. Barannik, A.V. Lagutina APPROACH TO JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF A ROBOTIC COMPLEX FOR CARRYING OUT EMERGENCY RESCUE AND OTHER EMERGENCY OPERATIONS	69
B.V. Rumiantsev, S.V. Prokopchina, A.A. Kochkarov ALGORITHM FOR THE CONSTRUCTION OF THE TRAJECTORY OF UNMANNED VEHICLES FOR MONITORING THE CONDITION OF AGRICULTURAL FIELDS	78
L.A. Rybak, A.A. Voloshkin, V.S. Pervuznik, D.I. Malyshev OPTIMAL SYNTHESIS OF THE STRUCTURE AND PARAMETERS OF A ROBOTIC SYSTEM FOR REGENERATIVE MECHANOTHERAPY BASED ON PARALLEL MECHANISMS	89
I.E. Selezneva ECONOMIC BARRIERS TO THE INTRODUCTION OF AIRCRAFT CONTROL AUTOMATION TECHNOLOGIES AND MECHANISMS TO OVERCOME THEM	101
Z.V. Nagoev, K.Ch. Bzhikhatlov, O.Z. Zagazezheva NEUROCOGNITIVE METHODS AND ALGORITHMS OF FEDERATED LEARNING OF INTELLIGENT INTEGRATED INFORMATION MANAGEMENT SYSTEMS IN A REAL COMMUNICATIVE ENVIRONMENT	111

SECTION II. CONTROL AND SIMULATION SYSTEMS

A.R. Gaiduk, V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev, V.G. Giscov CONTINUOUS CONTROL OF NONLINEAR NON-AFFINE OBJECTS	122
R.F. Faizullin, E.A. Magid APPLICATION OF A GENETIC ALGORITHM TO THE AREA COVERAGE PROBLEM WITH A GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES SUPPORTED BY A GROUND MOBILE CHARGING STATION: A CHROMOSOME FORMATION	134

A.P. Zykov, P.N. Mironov MATHEMATICAL METHODS OF COMPLEX PROCESSING OF RTC NAVIGATION DATA	142
D.V. Kotov, O.B. Lebedev CONTROLLING THE MOVEMENT OF A GROUP OF UAVS IN COMPLIANCE WITH THE GEOMETRIC STRUCTURE OF THE FORMATION BASED ON ALTERNATIVE COLLECTIVE ADAPTATION.....	155
I.V. Obratsov, M.G. Panteleev SUBSTANTIATION AND DEVELOPMENT OF AN INTELLECTUAL DECISION SUPPORT SYSTEM IN THE TASKS OF ENSURING FIRE SAFETY OF NAVY SHIPS.....	168
F.A. Houssein, V.A. Kostyukov, I. D. Evdokimov A METHOD FOR SOLVING THE MULTI-TRAVELING SALESMAN PROBLEM IN AN ENVIRONMENT WITHOUT OBSTACLES BASED ON REDUCING THE SIZE OF THE SOLUTION SPACE	181

SECTION III. COMMUNICATION, NAVIGATION AND GUIDANCE

E.A. Babushkin, R.V. Kalashnikov, A.M. Lavrentiev ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE AUTOMATIC INTERFERENCE COMPENSATION SUBSYSTEM WITH COMPENSATION CHANNELS INTEGRATED INTO A PASS-TYPE PHASED ARRAY ANTENNA	193
K.G. Kebkal, A.A. Kabanov, V.V. Alchakov, V.A. Kramar, M.E. Dimin THE SOFTWARE APPROACHES FOR SOLVING HYDROACOUSTIC COMMUNICATION PROBLEMS IN MARINE INTERNET OF THINGS SYSTEMS	203
Yu.S. Barichev, O.P. Goydin, V.P. Noskov, S.A. Sobolnikov THE INFORMATION AND NAVIGATION FIELD CONSTRUCTING SYSTEM FOR UGV AND UAV IN AN URBAN ENVIRONMENT	214
P.A. Gessen, A.I. Lizin, V.A. Pavlova, V.D. Saenko, V.A. Tupikov HYBRID ALGORITHM OF AUTOMATIC TRACKING FOR EMBEDDED COMPUTERS OF OPTOELECTRONIC NAVIGATION AND GUIDANCE SYSTEMS.....	226
A.E. Morozov, N.D. Bogdanov ANALYSIS OF THE RELATIVE PLACEMENT OF THE SENSITIVE MASSES OF ACCELEROMETERS IN ALGORITHMS FOR STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS.....	234

SECTION IV. TECHNICAL VISION

A.E. Arkhipov, I.S. Fomin, V.D. Matveev INTEGRATION OF SEGMENTATION, TRACKING AND CLASSIFICATION MODELS TO SOLVE VIDEO ANALYTICS PROBLEMS.....	247
N.A. Bocharov, I.N. Bychkov, P.V. Korenev, N.B. Paramonov SURVIVABILITY OF ONBOARD COMPUTERS OF GROUND ROBOTS	258
V.V. Kovalev, N.E. Sergeev EXPANSION OF THE FEATURE SPACE IN THE TASK OF SMALL OBJECT DETECTION IN IMAGES	268
K.I. Morev, P.A. Lederer EXPERIMENTAL ESTIMATION OF ERRORS IN RECONSTRUCTING THE STRUCTURE OF THE OBSERVED SCENE FROM A SERIES OF IMAGES BY VARIOUS CAMERAS	277
S.M. Sokolov SCENE ANALYSIS IN MOBILE INFORMATION SYSTEMS ROBOTIC COMPLEXES.....	286

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 629.58

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-6-18

Л.А. Мартынова, М.Б. Розенгауз

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПУТИ ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЯ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ*

Рассматривается задача безопасного движения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) в условиях возникновения неподвижных препятствий. Традиционно информация о препятствии формируется по мере приближения АНПА к препятствию, и по ней система управления АНПА принимает решение о параметрах дальнейшего движения АНПА (курс, скорость, глубина). Целью работы явилось определение пространственного пути обхода препятствия на основе определения геометрической формы и размеров препятствия по данным цифровых карт. В работе предложен метод определения пространственного 3D-пути обхода препятствия, использующий полную информацию о геометрической форме и размерах препятствия, полученную на основе дополнения данных средств освещения обстановки данными цифровых батиметрических карт районов, через которые пролегает маршрут АНПА, а также – цифровых физических карт районов земной поверхности с указанием мелких островов, выступающих на морскую поверхность. Изобаты батиметрической карты построены по измерениям в узлах сетки, покрывающей рассматриваемый район, шаг сетки превышает сотни метров. Для оценки вероятности возникновения аномалий рельефа дна между узловыми точками сетки, представляющими опасность для движения АНПА, предложено использовать метод нечетко-вероятностного анализа. По узловым точкам, покрывающим препятствие, вычисляется двумерная автокорреляционная функция, формируются значения лингвистических переменных. По этим переменным сформированы продукционные правила и с их использованием определена вероятность возникновения аномалий рельефа. Для определения кратчайшего расстояния имеющаяся сетка глубин в узловых точках препятствия представлена в виде ориентированного взвешенного графа: узлами графа являются узлы сетки с известными глубинами, ребрам назначены веса, равные пространственным расстояниям между узлами трехмерной сетки (широта, долгота, глубина). Разработанный алгоритм определения пути обхода препятствия заключается в определении конечной точки обхода на маршрутной траектории за препятствием и поиске кратчайшего пути обхода препятствия путем сравнения текущего рассматриваемого пути с полученными ранее. В случае превышения длины рассматриваемого пути в промежуточном узле сформированного ранее пути процесс рассмотрения текущего пути останавливается, и осуществляется переход к рассмотрению следующего пути. Результаты проведенных численных экспериментов показали, что сокращение пути обхода по сравнению с традиционным подходом препятствия в рассмотренном примере составило 17%.

Автономный необитаемый подводный аппарат; батиметрическая карта; физическая карта; нечетко-вероятностный анализ; рельеф дна.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00803, <https://rscf.ru/project/23-29-00803/>.

L.A. Martynova, M.B. Rosengauz

**METHOD FOR DETERMINING THE SPATIAL PATH OF AVOIDING
AN OBSTACLE BY AN AUTONOMOUS UNINHABITED UNDERWATER
VEHICLE**

The problem of safe movement of an autonomous underwater vehicle (AUV) in the presence of stationary obstacles is considered. Traditionally, information about an obstacle is generated as the AUV approaches the obstacle, and using it, the AUV control system makes a decision on the parameters of the AUV's further movement (course, speed, depth). The goal of the work was to determine the spatial path to bypass the obstacle based on determining the geometric shape and size of the obstacle according to digital maps. The paper proposes a method for determining a spatial 3D path to bypass an obstacle, using complete information about the geometric shape and size of the obstacle, obtained by supplementing the data from the means of illuminating the situation with data from digital bathymetric maps of the areas through which the AUV route runs, as well as digital physical maps of the areas of the earth. surfaces indicating small islands protruding onto the sea surface. The bathymetric map isobaths are constructed from measurements at grid nodes covering the area under consideration; the grid spacing exceeds hundreds of meters. To assess the probability of occurrence of bottom topography anomalies between grid nodes that pose a danger to the movement of AUVs, it is proposed to use the method of fuzzy probabilistic analysis. Based on the nodal points covering the obstacle, a two-dimensional autocorrelation function is calculated, and the values of linguistic variables are formed. Based on these variables, production rules were formed and, using them, the probability of occurrence of relief anomalies was determined. To determine the shortest distance, the existing depth grid at the node points of the obstacle is presented in the form of an oriented weighted graph: the graph nodes are grid nodes with known depths, the edges are assigned weights equal to the spatial distances between the three-dimensional grid nodes (latitude, longitude, depth). The developed algorithm for determining the path to bypass an obstacle consists in determining the end point of the bypass on the route trajectory behind the obstacle and finding the shortest path to bypass the obstacle by comparing the current path under consideration with those obtained previously. If the length of the path under consideration exceeds the length of the intermediate node of the previously formed path, the process of reviewing the current path stops, and the transition to the consideration of the next path is carried out. The results of the numerical experiments showed that the reduction in the path around the obstacle compared to the traditional approach in the considered example was 17%.

Autonomous underwater vehicle; bathymetric map; physical map; fuzzy probabilistic analysis; bottom topography.

Введение. При выполнении маршрутного задания автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) дальнего плавания на его пути могут возникнуть препятствия, которое АНПА в целях собственной безопасности необходимо обойти. Сложность решения системой управления АНПА [1] задачи выбора маршрута обхода препятствия заключается в том, что из-за ограниченности сектора обзора средств освещения обстановки АНПА отсутствует возможность оценки размеров препятствия и его геометрической формы, что не позволяет выбрать путь обхода препятствия по критерию, например, кратчайшего пути или минимального расхода энергоресурса. И выбор «наугад» одного из направлений обхода способен привести к неоправданной потере времени или расходу энергоресурса. Наличие у АНПА полной информации о геометрической форме и размерах препятствия существенно упростило бы задачу обоснованного выбора пути обхода. Для получения полной информации о препятствии требуется обследование препятствия со всех сторон, прежде чем будет определена его форма и геометрические размеры, позволяющие выбрать наиболее подходящий путь обхода. Обследование со всех сторон также приводит к перерасходу энергоресурса и временным затратам. В связи с этим актуальной является задача оценки размеров и положения препятствия за кратчайшее время с тем, чтобы обоснованно выбрать наилучший путь обхода препятствия по временными или энергетическим критериям. Этим определяется актуальность исследований.

Традиционно информация о препятствии формируется по мере приближения к нему АНПА, и по ней принимается решение о параметрах дальнейшего движения АНПА по курсу, скорости, глубине (реакционный подход). Задача обхода препятствий в морской среде рассматривалась ранее как в зарубежных публикациях [2–9], так и в отечественных, например, в [10–17]. Так, в [2] представлена разработка алгоритма обхода препятствий для АНПА на основе нечеткой реактивной архитектуры для различных скоростей движения аппарата. В [3] основное внимание уделено онлайн-планированию обхода препятствий. Для улучшения автономной способности и интеллекта при планировании обхода препятствий предлагается рекуррентная нейронная сеть со сверткой. В [4] описывается подход динамического окна к реактивному предотвращению столкновений, который хорошо подходит для АНПА, движущихся с высокой скоростью. В [5] предложен алгоритм обхода препятствий по трехмерной траектории. В [6] рассмотрено предотвращение столкновений с АНПА путем использования нечеткой логики для определения подходящего маневра уклонения после обнаружения возможного столкновения. В [7] предложен подход к построению архитектуры системы управления АНПА для предотвращения столкновений и движения АНПА в неструктурированных средах. Подход сочетает в себе как реакционный, так и совещательный компоненты. В [8] предложена практическая система предотвращения столкновений АНПА с препятствием на основе алгоритма быстрого изучения случайного дерева. В [9] предложен новый алгоритм планирования пути АНПА в трехмерном заранее неизвестном пространстве, основанный на нечеткой логике, в котором задача трехмерного планирования пути разбивается на две независимые задачи планирования в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно. В отечественных публикациях [10, 11] заложен фундамент и методическая основа выбора направления обхода препятствия, в [12, 13] показана работа алгоритмов принятия решения и обхода препятствий и сформированы условия их применения. В [14] указано на необходимость тщательного планирования маршрута в обход препятствий и учета плана исследований и возможностей технических средств АНПА при обходе препятствий. Так, в [15] описаны препятствия, с которыми может столкнуться АНПА дальнего радиуса действия. В [16] рассмотрены вопросы формирования поведения АНПА, в том числе и при обходе препятствий. В [17] предложена доработка алгоритма динамического окна, впервые предложенного в [4], ориентированного на морскую среду, расширенного до метода манипулирования аппаратом в трехмерном пространстве.

Из обзора публикаций следует, что априорному получению информации о размерах и форме препятствия перед тем, как формировать маршрут его обхода, не уделено должного внимания.

Целью работы явилось получение полной информации о размерах и форме препятствия, и на основе этой информации – выработка кратчайшего пути обхода препятствия, приводящего к экономии энергоресурса.

Постановка задачи. Пусть:

- ♦ АНПА выполняет маршрутное задание в заданном районе; в некоторый момент времени на пути АНПА его средства освещения обстановки обнаруживают препятствие;

- ♦ АНПА имеет информацию по цифровой батиметрической карте о глубинах в заданном районе в узлах сетки с определенным шагом;

- ♦ АНПА имеет цифровую физическую карту района, через который проходит маршрут АНПА, с указанием положения береговой черты, островов, выступающих на морскую поверхность скал.

Необходимо: оценить геометрическую форму препятствия и определить кратчайший путь его обхода.

Предлагаемое решение. Для получения полной информации о препятствии предлагается результаты обследования АНПА средствами освещения обстановки в дополнить априорно известной информацией в виде батиметрической цифровой

карты рельефа дна и физической карты мира с указанием выступающих над поверхностью моря островов и скал. Опыт встраивания в систему управления АНПА цифровых карт рельефа дна имеется при реализации SLAM-технологии [18].

Опасность обхода препятствия заключается в ошибочном выборе направления движения, при котором АНПА приходится неоправданно обходить его протяженным путем, в то время как при обходе с другой стороны путь мог оказаться значительно короче. В связи с этим при обнаружении впереди по курсу препятствия первое, что предлагается сделать – это сопоставить возникшее перед АНПА препятствие с обозначенными на карте: если перед АНПА возникло крупное препятствие, выступающее на морской поверхности, то оно, наверняка, обозначено на физической цифровой карте района, через который проходит маршрут АНПА. Это дает возможность системе управления АНПА получить полную информацию об обнаруженном препятствии и обоснованно выбрать путь обхода препятствия. Если же такого препятствия на карте нет, то, следовательно, оно мелкое, и выбор направления его обхода не может существенно повлиять на протяженность пройденного при обходе пути.

Однако даже при обходе малоразмерного препятствия в публикациях [11, 16] рекомендовано попытаться обойти его сначала в вертикальной плоскости, то есть сверху. Опасность в данном случае возникает из-за того, что препятствие может возвышаться над морской поверхностью, и попытка обойти его сверху приведет к неоправданному перерасходу энергоресурса и потере времени, чтобы понять, что сверху обойти его не удастся. В связи с этим для исключения такой ситуации предлагается воспользоваться данными физической карты и данными аэрофотосъемки морской поверхности с указанием возвышающихся над морской поверхностью скал и островов. И если оказавшееся перед АНПА препятствие возвышается над морской поверхностью, то, очевидно, что нет смысла пытаться обойти его сверху.

В любом случае при обходе сверху или сбоку малоразмерного препятствия целесообразно найти кратчайший пространственный путь обхода (далее – 3D-путь). Для этого целесообразно воспользоваться данными батиметрических карт. Батиметрическая карта отображает подводный рельеф дна при помощи изобат, дополненных отметками глубин (рис. 1). Изобаты построены по измерениям в узлах сетки, покрывающей рассматриваемый район.

К сожалению, существующие карты рельефа дна основаны на измерениях в узлах сетки с шагом, превышающим сотни метров, например, одна из самых точных батиметрических карт представлена на сайте NOAA (США) [19] (рис. 1). Такую точность нельзя считать удовлетворительной для получения информации о препятствии.



Рис. 1. Пример батиметрической карты с изобатами (слева) и физической карты с мелкими островами (справа) [19]

Очевидно, что движение АНПА при полностью известных данных о препятствии, но на грубой сетке, должно происходить по узлам, как точкам с наиболее точной информацией о глубинах. Однако для перехода между узлами необходимо

определить направление безопасного движения АНПА. Для этого требуется детализация цифровой карты рельефа дна. Для оценки безопасного движения АНПА между узлами достаточно оценить отсутствие аномалий рельефа дна между узлами сетки. Под аномалиями рельефа в данном случае понимается резкий перепад глубин и глубины, существенно отличающиеся от значений в узловых точках, что может представлять для АНПА опасность. Для оценки вероятности возникновения аномалий рельефа дна между узловыми точками используем метод нечетко-вероятностного анализа.

Оценка аномалий рельефа дна с использованием нечетко-вероятностного анализа. Наличие батиметрической карты рельефа дна при помощи изобат, дополненных отметками глубин (рис. 1), означает, что по району имеется информация по количеству профилей N , общему количеству точек по каждому профилю n , значениям глубины f_{ki} на k -ом профиле в i -ой точке. Тогда для точки, смещенной между профилями съемки p ($p=0, \pm\Delta y, \pm 2\Delta y, \dots$) и смещением между точками по профилю m ($m=0, \pm\Delta x, \pm 2\Delta x, \dots$), двумерная автокорреляционная функция определяется выражением [20]:

$$R(p, m) = \frac{1}{N - |p|} \cdot \frac{1}{n - |m|} \sum_{k=1}^{N - |p| - |m|} \sum_{i=1}^{n - |m|} f_{ki} f_{k+p, k+m} \quad (1)$$

Результаты изменения двумерной автокорреляционной функции позволяют оценить характер изменения морского дна на выбранном участке поля глубин.

Для учета наличия аномалий дна, образованных малыми формами рельефа, применим методы нечетко-вероятностного анализа. Для оценки вероятности аномалий рельефа дна между узлами в зависимости от дискретности съемки с учетом неопределенности количественного описания данных – используем нечеткую продукционную модель. Рельеф с вероятными аномалиями между узловыми точками представляет собой опасность для движения АНПА и может быть классифицирован как запретная зона для движения АНПА между парой узловых точек.

Для этого опишем положение каждой пары узловых точек морской батиметрической цифровой карты тремя лингвистическими переменными:

- ◆ коэффициент корреляции между парой точек (высокий/низкий);
- ◆ расстояние между парой узловых точек (малое/большое);
- ◆ угол наклона рельефа дна между парой узловых точек.

Для определения наличия запретных зон применим упрощенный, что позволяет сразу определить вероятности наличия аномалий рельефа [21]. Введем следующие лингвистические переменные, описывающие каждую пару узловых точек морской цифровой карты:

- ◆ коэффициент корреляции между парой точек (K), вычисляемый с использованием выражения (1);
- ◆ расстояние между парой узловых точек (D), определяемое по данным батиметрической карты;
- ◆ направление наклона рельефа дна между парой узловых точек (H), определяемое разностью глубин с батиметрической карты между этими точками.

Оценим влияние параметров пары узловых точек на вероятность аномалии рельефа узловыми точками. Для этого введем нечеткость (фазификацию) согласно алгоритму Мамдани [21]:

- ◆ если $K < 0,35$, то $K =$ «низкий», в противном случае $K =$ «высокий»;
- ◆ если $D < 50$ м, то $D =$ «малое», в противном случае $D =$ «большое»;
- ◆ если H направлен вниз ($\Delta H = H_i - H_{i+1} \leq 0$), то $H =$ «вниз», в противном случае $H =$ «вверх».

Присвоим лингвистическим переменным значения:

- ◆ $K=0$ – «низкий», $K=1$ – «высокий»;

- ◆ $D=0$ – «малое», $D=1$ – «большое»;
- ◆ $H=0$ – «вниз», $H=1$ – «вверх».

Определим продукционные правила Π_1 – Π_8 , связывающие лингвистические переменные, т.е. построим базу правил. Каждое правило состоит из антецедента (часть ЕСЛИ...) и консеквента (часть ТО...). В нашем случае при использовании упрощенного алгоритма нечеткого вывода продукционные правила, описывающие все возможные сочетания лингвистических переменных, имеют следующий вид:

- Π_1 : ЕСЛИ K = «низкий» И D = «малое» И H = «вниз», то $P_1 = 0,45$;
- Π_2 : ЕСЛИ K = «низкий» И D = «большое» И H = «вниз», то $P_2 = 0,25$;
- Π_3 : ЕСЛИ K = «низкий» И D = «большое» И H = «вверх», то $P_3 = 0,15$;
- Π_4 : ЕСЛИ K = «низкий» И D = «малое» И H = «вверх», то $P_4 = 0,33$;
- Π_5 : ЕСЛИ K = «высокой» И D = «малое» И H = «вниз», то $P_5 = 0,20$;
- Π_6 : ЕСЛИ K = «высокой» И D = «малое» И H = «вверх», то $P_6 = 0,17$;
- Π_7 : ЕСЛИ K = «высокой» И D = «большое» И H = «вниз», то $P_7 = 0,32$;
- Π_8 : ЕСЛИ K = «высокой» И D = «большое» И H = «вверх», то $P_8 = 0,38$,

где $P_j, j=1, \dots, 8$ – вероятность наличия локальных аномалий рельефа (определяются экспертным путем), представляющих для АНПА потенциальную опасность. Далее определяем степень принадлежности всего антецедента правила с помощью операторов логического MIN для связки И или оператора логического MAX для связки ИЛИ. Такая операция отрабатывается для каждого правила из базы правил.

Покажем работу этого алгоритма на примере продукционного правила Π_1 . На рис. 2 изображены функции принадлежности лингвистических переменных. Для каждой лингвистической переменной представлена зависимость значения лингвистической переменной μ от параметров K, D, H соответственно. На каждом графике горизонтально-убывающие функции слева означают значения переменных «низкий» для K , «малый» для D , «вниз» для H , соответственно. Правые горизонтально-возрастающие линии справа означают значения переменных «высокий» для K , «большое» для D , «вверх» для H , соответственно.

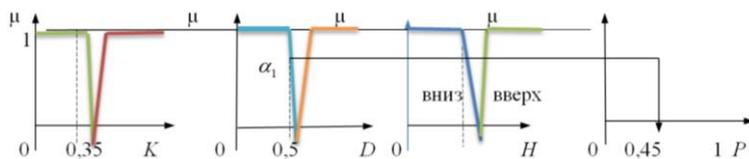


Рис. 2. Функции принадлежности лингвистических переменных

Для определения вероятности аномалий рельефа дна между двумя точками определим значения K, D, H : K – из выражения (1), D и H – из батиметрической цифровой карты. Пусть $K=0,30$; $D=0,45$; $H \leq 0$. По графикам получаем их значения: для $K=0,30$ $\mu=1,0$, для $D=0,45$ $\mu=0,65$, для $H \leq 0$ $\mu=0$. Берем наименьшее значение $\mu=0,65$ и назначаем его значение – уровню «отсечения» α , получаем $\alpha_1 = 0,65$ – для первого правила Π_1 . И когда мы по уровню 0,65 провели горизонталь, получили 0,45, так как у нас так задано продукционными правилами.

Аналогично выполняем указанные выше действия для всех оставшихся 7 правил:

- ◆ для правила Π_2 – $P_2 = 0,25$; уровень отсечения $\alpha_2 = 0,40$;
- ◆ для правила Π_3 – $P_3 = 0,15$; уровень отсечения $\alpha_3 = 0,25$;
- ◆ для правила Π_4 – $P_4 = 0,33$; уровень отсечения $\alpha_4 = 0,55$;
- ◆ для правила Π_5 – $P_5 = 0,2$; уровень отсечения $\alpha_5 = 0,15$;
- ◆ для правила Π_6 – $P_6 = 0,17$; уровень отсечения $\alpha_6 = 0,35$;

- ◆ для правила $P_7 - P_7 = 0,32$; уровень отсечения $\alpha_7 = 0,45$;
- ◆ для правила $P_8 - P_8 = 0,38$; уровень отсечения $\alpha_8 = 0,60$.

Тогда вероятность локальных аномалий рельефа, определяется по формуле:

$$P = \sum_{i=1}^8 \alpha_i P_i / \sum_{i=1}^8 \alpha_i$$

Подставляя определенные выше значения в эту формулу, получаем, что вероятность пропуска локальных аномалий рельефа между двумя узлами составляет 0,316.

Продельвая подобные процедуры с каждой парой точек $(i, i+1)$ карты глубин рассматриваемого района, определяем вероятности P_i аномалий рельефа между узловыми точками. При высокой вероятности аномалий рельефа, например, выше 0,25, пространство между узловыми точками для АНПА могут представлять опасность при движении, в связи с чем целесообразно выбрать путь до другой узловой точки.

Таким образом, в результате применения метода нечетко-вероятностного анализа получены вероятности P_i возникновения аномалий рельефа дна в промежутках между всеми узловыми точками рассматриваемого района с препятствием.

После получения полной и детальной информации о геометрической форме возникновения перед АНПА препятствия определим кратчайший 3D-путь его обхода.

Определение кратчайшего 3D-пути обхода препятствия. По результатам определения вероятностей возникновения аномалий рельефа дна сформируем запретные для АНПА участки между узловыми точками. Для этого зададимся пороговым значением вероятности безопасного движения между узлами P_z . Если вероятность аномалии рельефа выше пороговой вероятности P_z , то считаем такой путь опасным для движения АНПА и при определении пути обхода препятствия этот участок исключаем из рассмотрения.

Если же вероятность аномалии рельефа ниже порогового уровня, то такой участок между узловыми точками берем в обработку как потенциально безопасный участок для движения АНПА при обходе препятствия.

После определения безопасных для АНПА путей между узловыми точками – представим имеющуюся сетку глубин в виде ориентированного взвешенного графа: узлами графа являются узлы сетки глубин, ребрами – расстояния между узлами. Назначив ребрам веса, равные расстояниям между узлами трехмерной сетки (широта, долгота, глубина). Такой вариант формирования графа позволяет формализовать задачу как задачу поиска кратчайшего пути в графе. Традиционно для определения кратчайшего пути в графе используют алгоритм Дейкстры. Поскольку он предназначен для решения плоской задачи, то в связи с этим преобразуем трехмерную сетку узлов в двумерную, назначив расстояниям между узлами веса, равные фактическим расстояниям между узлами сетки глубин с учетом глубины каждого узла.

В таком виде двумерного графа для поиска кратчайшего пути можно использовать алгоритм Дейкстры, однако эвристический характер алгоритма не позволяет гарантировать определение кратчайшего пути, что может привести к увеличению времени обхода препятствия и перерасходу электроэнергии АНПА. В связи с этим разработан алгоритм обхода препятствия по 3D-траектории, который лег в основу алгоритма управления АНПА при обходе препятствия.

Предварительно определим положение точки, в которой маршрут обхода препятствия должен закончиться: обязательным условием является то, что эта точка должна лежать на маршрутной траектории за препятствием, но совсем необязательно эта точка должна являться диаметрально противоположной точкой (на рис. 3 траектория обозначена линией желтого цвета). После обхода части препятствия возможно движение АНПА «по касательной» к границе препятствия по направлению к линии заданного маршрута (на рис. 3 траектория показана линией зеленого цвета).



Рис. 3. Направление возвращения на маршрут после обхода препятствия

В связи с отказом от применения эвристических алгоритмов поиска кратчайшего пути при проведении исследований специально разработан алгоритм перебора всех возможных вариантов маршрута обхода, отличающийся от известного «метода простого перебора». Отличие заключается в том, что поскольку вероятности между каждой парой точек означают то, насколько можно доверять безопасному проходу АНПА между точками, то перебор осуществляем только среди тех путей, которые не подпадают под запрет.

Кроме того, при вычислении в каждом узле длины пути происходит постоянное сравнение вычисляемой в каждом узле протяженности текущего маршрута с протяженностью тех маршрутов, которые уже вычислены. И если в процессе формирования очередного маршрута в очередном узле оказалось, что протяженность рассматриваемого маршрута превысила протяженность ранее сформированного маршрута, то продолжение рассмотрения текущего маршрута становится бессмысленным, и осуществляется переход к рассмотрению следующего варианта маршрута. Такой подход приводит к экономии времени и вычислительных ресурсов по сравнению с применением «метода простого перебора».

Для тестирования предложенного алгоритма управления АНПА при обходе препятствия по 3D-траектории разработана математическая модель и ее программная реализация, с использованием которой проведены численные эксперименты.

Результаты численных экспериментов. Цель эксперимента заключается в оценке преимущества использования полной информации о форме и размерах препятствия для того, чтобы выбрать кратчайшую траекторию движения АНПА в обход препятствия. При проведении численного эксперимента сформированное препятствие представляло собой комбинированную геометрическую фигуру, состоящую из трех ярко выраженных частей: цилиндра большого радиуса в основании препятствия, цилиндра меньшего радиуса в середине и конуса, опирающегося основанием на верхнюю часть цилиндра. Верхушка конуса выступала над водой. Принимаем, что высота нижнего и среднего цилиндров совпадают между собой, высота конуса в 4 раза меньше (рис. 4), диаметр среднего цилиндра определяется высотой конуса и углом при его вершине.

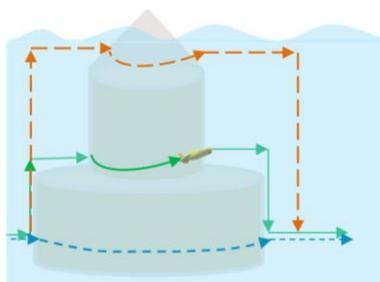


Рис. 4. Внешний вид препятствия

При проведении эксперимента перебирались различные траектории обхода препятствия и оценивалось, насколько кратчайшая траектория короче той, которая была бы выбрана в отсутствии полной информации о препятствии.

Начальная точка положения АНПА перед обходом препятствия расположена в нижней точке основания слева, как показано на рис. 4.

Рассмотрены следующие варианты обхода препятствия:

- ◆ обход вокруг нижнего цилиндра по дуге окружности;
- ◆ движение вертикально вверх вдоль боковой поверхности нижнего цилиндра с выходом на горизонтальную его поверхность и последующим движением к основанию среднего цилиндра и дальнейшим обходом его по дуге окружности;
- ◆ движение вертикально вверх последовательно вдоль боковой поверхности нижнего цилиндра, затем переход по горизонтали к среднему цилиндру и движение вертикально вверх вдоль боковой поверхности среднего цилиндра с последующим выходом к конусу и обходом по дуге окружности вокруг конуса.

Во всех случаях считалось, что после обхода АНПА заглубляется на первоначальную глубину, соответствующую маршрутному заданию.

Обозначим радиус нижнего цилиндра R , высоту нижнего и верхнего цилиндров H_1 и H_2 соответственно, высоту конуса $H_3=H_1/4$ и угол при вершине конуса α . Высота препятствия определяется выражением:

$$H_{ob} = H_1 + H_2 + H_3.$$

Расчет пути обхода препятствия в зависимости от глубины его обхода осуществлялся суммированием участков прохождения дуг, вертикалей и горизонталей, о которых сказано выше.

Длина дуги окружности вокруг нижнего цилиндра $L_1=\pi R$, длина вертикального участка пути до среднего цилиндра H_1 , длина дуги окружности вокруг среднего цилиндра $L_2=\pi r$, радиус основания конуса $r=H_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha$, этому же значению равен и радиус среднего цилиндра, длина пути обхода среднего цилиндра $L_2=\pi r$, длина участка обхода конуса зависит от глубины, на которой АНПА движется сначала по наклонной, а затем по дуге совершает обход верхней части конуса. Полный путь обхода препятствия определяется выражением:

$$L = 2(H_{ob} - h_a) + 2(R - h_a \operatorname{tg} \alpha) + \pi h_a \operatorname{tg} \alpha + 2(H_{ob} - h_a) / \cos \alpha.$$

При проведении численного эксперимента рассмотрено три варианта геометрической формы препятствия, отличающиеся углом при вершине конуса α : значение α принималось равным 30° , 45° и 60° .

Приняты следующие исходные данные: высота препятствия $H_{ob}=90$ м, высота нижнего цилиндра $H_1=40$ м, радиус нижнего цилиндра $R=75$ м, высота верхнего цилиндра $H_2=40$ м, радиус верхнего цилиндра $r=10$ м, высота конуса $H_3=10$ м. Глубина h_a движения АНПА отсчитывалась от основания препятствия и менялась в диапазоне $0 \div 90$ м. Полученные результаты протяженности проходимого при обходе препятствия пути представлены на рис. 5. Нулевая точка по оси абсцисс соответствует варианту, при котором АНПА обходит препятствие сбоку по дуге окружности без изменения глубины. При этом для всех трех вариантов пройденный путь составил 376 м. С изменением глубины обхода наблюдается сокращение пройденного пути за счет того, что выше по глубине препятствие резко сузилось в диаметре.

Из графиков, представленных на рис. 5, видно следующее.

1. Протяженность маршрута существенно зависит от формы препятствия: с увеличением угла при вершине конуса происходит увеличение радиуса верхней части препятствия и среднего цилиндра, в результате чего увеличивается протяженность пути обхода препятствия.

Так при увеличении угла при вершине конуса от 30° до 60° пройденный путь увеличился на 5%. В то же время обход цилиндра через вершину оказался короче пути по дуге окружности вокруг конуса на 1,5%.

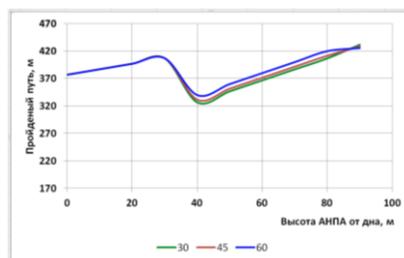


Рис. 5. Зависимость пройденного пути от глубины обхода препятствия

2. Переход от обхода препятствия на глубине движения АНПА – к обходу на других глубинах – привело к сокращению пройденного пути на 13%.

При всплытии АНПА для поиска пути обхода наиболее протяженным оказался путь обхода по верхней части нижнего цилиндра на глубине около 40 м. По сравнению с ним сокращение пути за счет рассмотрения различных альтернативных вариантов глубин и маршрутов обхода составил 17% при движении на глубине 40 м. Кратчайшим путем при этом оказался путь, включающий в себя участок всплытия вдоль боковой поверхности нижнего цилиндра, движение параллельно горизонтальной поверхности нижнего цилиндра и обход среднего цилиндра по окружности, затем движение параллельно горизонтальной поверхности нижнего цилиндра и заглубление АНПА до первоначальной глубины поиска.

Заключение. В работе предложен метод определения кратчайшего 3D-пути обхода препятствия автономным необитаемым подводным аппаратом, предназначенным для преодоления значительных расстояний. Метод включает в себя использование текущих данных системы освещения обстановки, данных навигационной системы, данных о препятствии по батиметрической карте, данных о возвышении препятствия над морской поверхностью по данным физической карты мира.

Метод включает в себя процедуры:

- ♦ определения вероятности аномального рельефа между узлами сетки батиметрической карты – для оценки возможности безопасного прохода АНПА между соседними узлами;
- ♦ определения кратчайшего 3D-пути обхода препятствия на основе поиска кратчайшего пути в графе усовершенствованным методом простого перебора возможных вариантов обхода.

Предложенный подход к использованию батиметрической и физической цифровых карт для получения наиболее полной информации о геометрической форме и размерах препятствия позволил определить кратчайшего 3D-пути для обхода препятствия. При этом сокращение пути по сравнению с традиционным подходом в рассмотренном примере составило 17%. Этот факт позволяет считать целесообразным реализацию предложенного метода в системе управления АНПА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 50-58.
2. Lin C., Wang H., Yuan J., Yu D., Li C. An improved recurrent neural network for unmanned underwater vehicle online obstacle avoidance // IEEEJ.Ocean. Eng. –2019. – Vol. 44. – P. 120-133.
3. Fox D., Burgardt W., Thrun S. The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance // IEEE robotics and Automation Magazine. – 1995.

4. *Sami A., Ayman, M.M., Brisha, M.* Analysis and Simulation of 3D Trajectory with Obstacle Avoidance of an Autonomous Underwater Vehicle for Optimum Performance // *International Journal of Computer Science and Network Security*. – 2012. – Vol. 12, No. 3, – P. 43-50.
5. *Hromatka M.* A Fuzzy Logic Approach to Collision Avoidance in Smart UAVs // *Honors Theses*. – 2013. – Paper 13. – Свободный режим доступа: http://digitalcommons.csbsju.edu/honors_theses/13 (дата обращения: 25.08.2023).
6. *van den Burg, Smith B., Lane D.M.* Design and evaluation of a reactive and deliberative collision avoidance and escape architecture for autonomous robots // *Autonomous Robots*. – 2008. – Vol. 24, No 3. – P. 247-266.
7. *Chiew S.T.* A collision avoidance system for autonomous underwater vehicles // *Honors Theses*. University of Plymouth. – 2006. – Свободный режим доступа: <http://hdl.handle.net/10026.1/2258> (дата обращения: 25.08.2023).
8. *Liu S., Wei Y., Gao Y.* 3D path planning for AUV using fuzzy logic // *Computer Science and Information Processing (CSIP)*. – 2012. – Свободный режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6308925> (дата обращения: 25.08.2023).
9. *Пилюхов В.Х.* Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями. – М.: Физматлит, 2015. – 300 с.
10. *Быкова В.С., Машошин А.И., Пашкевич И.В.* Алгоритм обеспечения безопасности плавания автономного необитаемого подводного аппарата // *Гироскопия и навигация*. – 2021. – Т. 29, № 1 (112). – С. 97-110.
11. *Инзарцев А.В., Багницкий А.В.* Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // *Шестая Всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПОМО-6)*. – Владивосток, 2015. – С. 450-454.
12. *Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф.* Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. – Владивосток: Дальнаука, 2018. – 368 с.
13. *Наумов Л.А., Илларионов Г.Ю., Лантев К.З., Бабак А.В.* К вопросу о принципах планирования и особенностях формирования глобальных маршрутов автономных подводных роботов // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – Вып. 11: в 2 ч. Ч. 2. – 2015. – 219 с.
14. *Лантев К.З., Илларионов Г.Ю.* Что может помешать подводному мореходству автономного необитаемого подводного аппарата // *Сб. материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления»*. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2017. – С. 138-146.
15. *Инзарцев А.В., Багницкий А.В.* Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в акваториях различных типов // *Подводные исследования и робототехника*. – 2016. – № 2 (22). – С. 25-35.
16. *Тусеева И.Б., Тусеева Д.Б., Ким Юн-Ги.* Алгоритм динамического окна для навигации автономных подводных аппаратов // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2013. – № 3. – С. 67-77.
17. *Титов Р.У., Моторин А.В.* Алгоритмы совместной навигации и картографирования, построенные на основе процедур частичного аналитического интегрирования // *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО*. Т. 2. – С. 126-129.
18. *Карты NOAA*. – Свободный режим доступа: <https://www.charts.noaa.gov/InteractiveCatalog/nrnc.shtml> (дата обращения: 25.08.2023).
19. *Никитин А.А.* Теоретические основы обработки геофизической информации: учебник для ВУЗов. – М.: Недра. – 1986. – С. 122-123.
20. *Амосов О.С.* Интеллектуальные информационные системы. Нейронные сети и нечеткие системы. – Комсомольск-на Амуре: Комсом.-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2006. – 106 с.

REFERENCES

1. *Martynova L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V., Sokolov A.I.* Algoritmy, realizuyemye integrirovannoy sistemoy upravleniya ANPA [Algorithms implemented by the integrated AUV control system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 1 (162), pp. 50-58.
2. *Galarza C., Masmitja I., Prat J., Gomariz S.* Design of obstacle detection and avoidance system for Guanay II AUV, *Appl. Sci.*, 2020, Vol. 10, pp. 32-37.
3. *Lin C., Wang H., Yuan J., Yu D., Li C.* An improved recurrent neural network for unmanned underwater vehicle online obstacle avoidance, *IEEE J. Ocean. Eng.*, 2019, Vol. 44, pp. 120-133.

4. Fox D., Burgardt W., Thrun S. The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 1995.
5. Sami A., Ayman M.M., Brisha M. Analysis and Simulation of 3D Trajectory with Obstacle Avoidance of an Autonomous Underwater Vehicle for Optimum Performance, *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2012, Vol. 12, No. 3, pp. 43-50.
6. Hromatka M. A Fuzzy Logic Approach to Collision Avoidance in Smart UAVs, *Honors Theses*, 2013, Paper 13. Available at: http://digitalcommons.csbsju.edu/honors_theses/13 (accessed 25 August 2023).
7. Evans J., Smith B., Lane D.M. Design and evaluation of a reactive and deliberative collision avoidance and escape architecture for autonomous robots, *Autonomous Robots*, 2008, Vol. 24, No 3, pp. 247-266.
8. Chiew S.T. A collision avoidance system for autonomous underwater vehicles, *Honors Theses*. University of Plymouth, 2006. Available at: <http://hdl.handle.net/10026.1/2258> (accessed 25 August 2023).
9. Liu S., Wei Y., Gao Y. 3D path planning for AUV using fuzzy logic, *Computer Science and Information Processing (CSIP)*, 2012. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6308925> (accessed 25 August 2023).
10. Pshikhopov V.Kh. Intellectual'noe planirovanie trayektoriy podvizhnykh ob'yektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent planning of trajectories of moving objects in environments with obstacles], Moscow, Fizmatlit, 2015, 300 p.
11. Bykova V.S., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V. Safe navigation algorithm for autonomous underwater vehicles, *Gyroscopy and Navigation*, 2021, Vol. 12, No 1, pp. 86-95.
12. Inzartsev A.V., Bagnitsky A.V. Algoritmy obkhoda lokal'nykh donnykh ob'yektov dlya avtonomnogo podvodnogo robota [Algorithms for bypassing local bottom objects for an autonomous underwater robot], *Shestaya Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Tekhnicheskiye problemy osvoeniya mirovogo okeana» (TPOMO-6)* [Sixth All-Russian. scientific-technical conf. "Technical problems of the development of the world ocean" (TPOMO-6)]. Vladivostok, 2015, pp. 450-454.
13. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnyye robototekhnicheskiye komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic systems: systems, technologies, applications]. Vladivostok: Dalnauka, 2018, 368 p.
14. Naumov L.A., Illarionov G.Yu., Laptev K.Z., Babak A.V. K voprosu o printsipakh planirovaniya i osobennostyakh formirovaniya global'nykh marshrutov avtonomnykh podvodnykh robotov [On the issue of planning principles and features of the formation of global routes of autonomous underwater robots], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical science], Issue 11: in 2 parts. Part 2. Tula: Tula State University Publishing House, 2015, 219 p.
15. Laptev K.Z., Illarionov G.Yu. Chto mozhet pomeshat' podvodnomu morekhodstvu avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata [What can interfere with the underwater navigation of an autonomous uninhabited underwater vehicle], *Sb. materialov XIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «er spektivnyye sistemy i zadachi upravleniya»* [Collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Advanced Systems and Control Problems"]. Rostov-on-Don: YuFU, 2017, pp. 138-146.
16. Inzartsev A.V., Bagnitsky A.V. Planirovanie i realizatsiya trayektoriy dvizheniya avtonomnogo podvodnogo robota pri vypolnenii monitoringa v akvatoriyakh razlichnykh tipov [Planning and implementation of motion trajectories of an autonomous underwater robot when performing monitoring in various types of water areas], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2016, No. 2 (22), p. 25-35.
17. Tuseeva I.B., Tuseeva D.B., Kim Yun-Gi. Algoritm dinamicheskogo okna dlya navigatsii avtonomnykh podvodnykh apparatov [Dynamic window algorithm for navigation of autonomous underwater vehicles], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision making], 2013, No. 3, pp. 67-77.
18. Titov R.U., Motorin A.V. Algoritmy sovmestnoy navigatsii i kartografirovaniya, postroyennye na osnove protsedur chastichnogo analiticheskogo integrirovaniya [Algorithms for joint navigation and mapping, built on the basis of partial analytical integration procedures], *Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO* [Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University], Vol. 2, pp. 126-129.

19. Karty NOAA [NOAA Charts]. Available at: <https://www.charts.noaa.gov/InteractiveCatalog/nrnc.shtml> (accessed 25 August 2023).
20. Nikiitin A.A. Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoy informatsii: uchebnik dlya VUZov [Theoretical foundations of processing geophysical information: a textbook for universities], Moscow: Nedra, 1986, pp. 122-123.
21. Amosov O.S. Intellekturnye informatsionnye sistemy. Neyronnye seti i nechetkie sistemy [Intelligent information systems. Neural networks and fuzzy systems], Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur gos. tekhn. un-t, 2005, 106 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. профессор А.И. Машошин.

Мартынова Любовь Александровна – АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Розенгауз Михаил Борисович – e-mail: rozengauz_mb@mail.ru; тел.: 89219411395; к.т.н.; с.н.с.

Martynova Liubov Alexandrovna – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79219411395; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.

Rozengauz Mikhail Borisovich – e-mail: rozengauz_mb@mail.ru; phone: +79219411395; cand. of eng. sc.; senior researcher.

УДК 621.337.11:004.942:519.876.5

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-18-28

П.П. Чернусь, П.П. Чернусь, А.А. Яковлев, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий

ОБОСНОВАНИЕ ОБЛИКА ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОДЪЕМ ПОДВОДНОГО ГРУЗА

Целью исследования является разработка способа взаимодействия судна с подводным грузом для его приема и транспортировки. В статье представлены результаты создания комплекса подъема подводного груза на судно-носитель. Облик комплекса формировался на основе оценки возможных технических решений, проведения теоретических расчетов и моделирования. Выполнен анализ предыдущего опыта создания аналогов. Для стыковки с подводным грузом с судна-носителя опускается на четырех точках подвеса специальный приемный модуль, причем выбор сделан в пользу схемы тросового подвеса. Разработаны четыре механизма, составляющие основу комплекса – механизм подъема, механизм компенсации, механизм демпфирования и механизм фиксации. Основу механизма подъема составляют лебедки с электроприводом, использующие электрические асинхронные двигатели с векторным управлением. Канат механизма подъема заведен через полиспаст к грузу. Для компенсации возмущений, вызванных качкой судна-носителя, в разрыв канатной линии включена гидроневматическая система, которая парирует возникающие динамические нагрузки путем перемещения штоков гидроцилиндров. Механизм демпфирования поглощает энергию соударения платформы спускаемого модуля с корпусом судна-носителя в режиме причаливания. Механизм фиксации обеспечивает надежное крепление спускаемого модуля с подводным грузом или без него в походном положении с корпусом судна носителя. Модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором получена из обобщенной схемы, путем замыкания обмоток ротора накоротко. Предусмотрен частотный способ управления, за базовый вектор принят вектор потокосцепления ротора. В модели тросового подвеса учтена его деформация при движении в процессе эксплуатации. Модель механизма компенсации создана на основании адиабатического процесса в макроскопической системе, при котором система не обменивается теплотой с окружающим пространством. В ходе расчетов и моделирования параметры узлов и механизмов подобраны таким образом, что обеспечиваются технически реализуемые условия функционирования комплекса. При этом ограничены нагрузки на тросовую систему и исключены ее провисания, ход каретки компенсатора минимизирован. В результате был получен квазиравномерный подъем подводного груза с незначительными колебаниями скорости при качке судна-носителя.

Комплекс подъема подводного груза; подводный груз; судно-носитель; спускаемый модуль; механизм подъема; механизм компенсации; механизм демпфирования; механизм фиксации; качка; моделирование.

P.P. Chernus, P.P. Chernus, A.A. Yakovlev, R.V. Sakhabudinov, A.S. Golosiy

JUSTIFICATION FOR IMAGE OF EQUIPMENT FOR UNDERWATER CARGOES

The purpose of the study is to develop a method of interaction of a vessel with underwater cargo for both loading and transporting. The article presents the findings of the research on reacting a unit for lifting underwater cargo onto a vessel. The image of the unit was formed on the basis of an assessment of possible technical solutions, theoretical findings and modelling. The analysis of the previous research on creating alternatives is being carried out in the given research. To dock with underwater cargo from the vessel, a special receiving module is lowered at four suspension supports, a cable suspension scheme is of great preference. Four mechanisms have been developed to form the basis of the unit such as the lifting mechanism, the compensation mechanism, the damping mechanism and the locking mechanism. The lifting mechanism is based on electric winches on electric asynchronous motors worked on vector control. The rope of the lifting mechanism is bound through the pulley to the load. To compensate for the disturbances caused by the rolling of the carrier vessel, a hydropneumatic system is included in the rupture of the cable line, which fends off the emerging dynamic loads by moving the rods of the hydraulic cylinders. The damping mechanism absorbs the energy of the impact of the platform of the descent module with the hull of the vessel in the mooring mode. The locking mechanism ensures reliable fastening of the descent module with or without underwater cargo in a stowed position with the hull of the carrier vessel. The model of an asynchronous motor with a short-circuited rotor is obtained from a generalized circuit by shorting the rotor windings. A frequency control method is provided, the rotor flow coupling vector is taken as the base vector. The cable suspension model takes into account its deformation during movement during operation. The compensation mechanism model is based on an adiabatic process in a macroscopic system, in which the system does not release any heat to room. While calculating and modeling, the parameters of the nodes and mechanisms are selected in such a way that technically feasible conditions for the operation of the unit are provided. The loads on the cable system are limited and its sagging is excluded, the stroke of the compensator carriage is minimized. As a result, a quasi-uniform lifting of the underwater cargo was obtained with minor speed fluctuations during the rolling of the carrier vessel.

Underwater cargo lifting unit; underwater cargo; carrier vessel; descent module; lifting mechanism; compensation mechanism; damping mechanism; locking mechanism; pitching; modeling.

Введение. В связи с развитием флотов и расширением работ по использованию ресурсов океана задачи аварийно-спасательного обеспечения существенно усложнились. Создание спасательных судов и судов устранения аварий, способных решать одинаково эффективно любые задачи, стало затруднительным и даже нерациональным, поскольку такой комплекс приобретает слишком большое водоизмещение и на его строительство и эксплуатацию требуется значительное увеличение затрат. Поэтому в последние годы характерным является строительство судов-спасателей и других устройств со специализированными функциями и определенными конструктивными особенностями. Уменьшения эксплуатационных затрат можно добиться путем разработки спасательных средств с весьма ограниченными основными задачами, например, создание судов-носителей (буксируемых платформ) и судов устранения аварий.

Обоснование конструкции. Анализ состояния и тенденций развития технических устройств, обеспечивающих безопасный подъем и транспортировку подводного груза с судном – носителем показывает, что несмотря на значительное количество различных грузоподъемных судовых механизмов, готового приемлемого решения для подъема подводного груза водоизмещением несколько тысяч тонн найти не удастся. Предлагаемые конструкции предназначаются либо для поднятия малогабаритных и достаточно легких грузов, либо отличаются значительной сложностью [1–7]. Широко применяемые для поднятия больших грузов цанговые захваты с трубчатыми элементами не способны обеспечить режима стабилизации в условиях качки. Поэтому наиболее гибким и надежным средством подъема признаны механизмы с тросовыми лебедками.

Важной технической проблемой является также вопрос размещения точек подвеса тросовых систем и их количество. Достаточно очевидно, что наименьшие возмущения от бортовой качки обеспечивает схема побортного симметричного расположения двух точек подвеса (рис. 1,а) или размещение одной точки подвеса в центре качания (ЦК) (рис. 1,б), а для эффективной компенсации килевой качки – продольное симметричное размещение двух точек подвеса относительно центра качания судна (рис. 1,в).

Для более равномерного распределения нагрузок на конструкцию платформы их количество выбрано равным четырем, и они расположены в диаметральной плоскости судна. Следует отметить, что при парировании колебаний груза, вызываемых килевой качкой и особенно вертикальными перемещениями корпуса судна, известны применение качающейся траверсы или отдельного гидропривода для отслеживания качки.

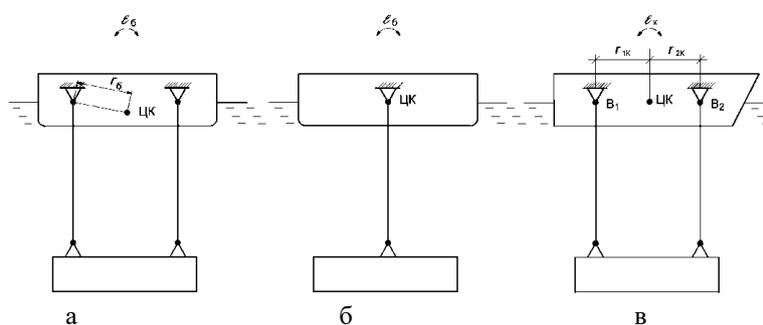


Рис. 1. Схемы подвеса платформы на тросовой системе: а – расположение точек подвеса платформы в условиях бортовой качки; б – расположение точек подвеса платформы в условиях бортовой качки в диаметральной плоскости; в – расположение точек подвеса платформы в условиях килевой качки

Для более равномерного распределения нагрузок на конструкцию платформы их количество выбрано равным четырем, и они расположены в диаметральной плоскости судна. Следует отметить, что при парировании колебаний груза, вызываемых килевой качкой и особенно вертикальными перемещениями корпуса судна, известны применение качающейся траверсы или отдельного гидропривода для отслеживания качки.

Через эти конструкции прошли корабельные артиллерийские установки и пусковые установки с качающимися башнями и карданами направляющих балок. Такая компенсация с помощью качающегося коромысла или с помощью полиспа-ста-компенсатора значительно усложняло их конструкцию. В результате наведение в условиях качки полностью взяли на себя следящие приводы вертикального и горизонтального наведения. Исходя из этого оба упомянутых способа признаны нецелесообразными.

Поэтому для работы в условиях волнения применен механизм компенсации, задачей которого является защита механизма подъема (МП) от перегрузок при положительных ускорениях (судно идет вверх) и исключения провисания тросовой системы при отрицательных ускорениях (судно идет вниз).

Таким образом в состав комплекса подъема подводного груза входит резидентная корабельная часть и спускаемый модуль. Корабельная часть включает: механизм подъема, механизм демпфирования, механизм фиксации, токопереход и электрооборудование.

Электропривод лебедки МП целесообразно выполнить на базе обычных асинхронных электродвигателей (ЭД) с короткозамкнутым ротором с применением частотных преобразователей с векторным регулированием. Векторное регулирование обеспечивает требования по точности стабилизации и удовлетворительные силовые характеристики при различных оборотах ЭД.

Математическая модель асинхронного двигателя. Рассмотрим обобщенную схему асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (АКЗ) (рис. 2).

Для динамических систем необходимо учитывать переходные электромагнитные процессы в машине [8, 9]. В этом случае в качестве пары переменных, описывающих машину, оставим пространственные вектора тока статора и потока сцепления ротора ($\vec{\psi}_R, \vec{i}_S$).

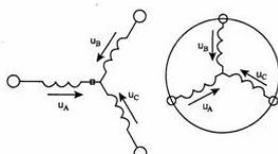


Рис. 2. Обобщённая схема асинхронного двигателя

Структурная схема АКЗ и её модель зависит от выбора базового вектора, который определяет скорость вращения координат. За базовый вектор принимается тот, который при анализе совмещается с одной из осей системы координат. Если во вращающейся с относительной угловой скоростью ω_k системе координат с вещественной осью «х» и мнимой осью «у» за базовый вектор принять вектор \vec{u}_S , то система координат будет вращаться со скоростью ω_1 равной угловой частоте напряжения питания. Эта идея лежит в основе частотных способов управления АКЗ [10–13].

Для применения векторного управления следует за базовый вектор принять вектор потокосцепления ротора и совместить вектор с осью «х» вращающейся системы координат (принять $\psi_{Ry} = 0$) [15], тогда при питании статорных обмоток от источника напряжения получим

$$u_{Sx} = r(1 + T'_S s)i_{Sx} - \omega_k L'_S i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx}, \quad (1)$$

$$u_{Sy} = r(1 + T'_S s)i_{Sy} + \omega_k L'_S i_{Sx} + k_R p \omega_m \psi_{Rx}, \quad (2)$$

$$0 = -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx}, \quad (3)$$

$$0 = -k_R R_R i_{Sy} + (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Rx}, \quad (4)$$

$$M = 1,5 p k_R \psi_{Rx} i_{Sy}, \quad (5)$$

$$J s \omega_m = M - M_H. \quad (6)$$

Существенной особенностью этой математической модели является то обстоятельство, что угловая скорость вращения системы координат зависит от значений переменных состояния машины и определяется из четвертого уравнения системы

$$\omega_k = \frac{k_R R_R i_{Sy}}{\psi_{Rx}} + p \omega_m. \quad (7)$$

Структурная схема модели АКЗ при его питании от источника напряжения для случая, когда базовым вектором является вектор потокосцепления ротора приведена на рис. 3. АКЗ, как объект управления, имеет два взаимосвязанных канала. Канал по составляющей «х», определяющий потокосцепление ротора, и канал по составляющей «у», определяющий составляющую тока i_{Sy} . Если организовать управление так, чтобы на выходе канала «х» поддерживать постоянный сигнал, то потокосцепление ротора будет постоянным, а сигнал в канале «у» будет определять момент.

В этом случае структурная схема АКЗ повторяет структурную схему двигателя постоянного тока. Для такой реализации необходимо в канале «х» синтезировать регулятор потокосцепления, на входе которого поддерживать постоянный сигнал, а в канале «у» синтезировать регуляторы тока, скорости и положения.

В канале регулирования потокосцепления ротора, как правило,

$$T_R \gg T'_S, \tag{8}$$

поэтому в качестве регулятора потокосцепления целесообразно выбрать ПИ-регулятор для компенсации большей постоянной времени [16] с передаточной функцией

$$W_{p\psi}(s) = \frac{k_{p\psi}(T_R s + 1)}{T_R s}. \tag{9}$$

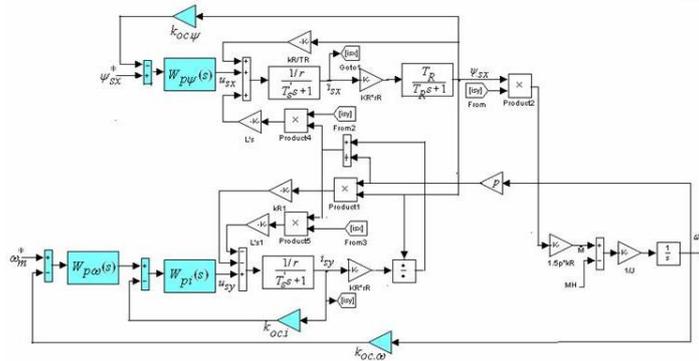


Рис. 3. Структурная схема замкнутой частотной системы с векторным управлением

Рассчитанный таким образом ПИ-регулятор компенсирует перекрестные связи в канале "х". Для компенсации влияния перекрестных связей в канале "у" следует также выбрать ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_{pi}(s) = \frac{k_{pi}(T'_S s + 1)}{T'_S s}. \tag{10}$$

При компенсированных перекрестных связях канал "у", отвечающий за момент, полностью аналогичен системе постоянного тока (рис. 4).

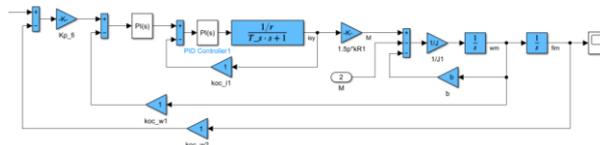


Рис. 4. Структурная эквивалентная схема замкнутой частотной системы с векторным управлением

Модель АКЗ с эквивалентной схемой векторного управления приведена на рис. 5.

Математическая модель тросового подвеса. Поскольку канат выполнен из стали, для расчёта силы натяжения, возникающей в тросе, применяется формула

$$T = \frac{E_{steel} \cdot S_{rope}}{L_0} dl, \tag{11}$$

где E_{steel} – модуль Юнга для стали; S_{rope} – площадь поперечного сечения каната; L_0 – длина троса; dl – удлинение троса.

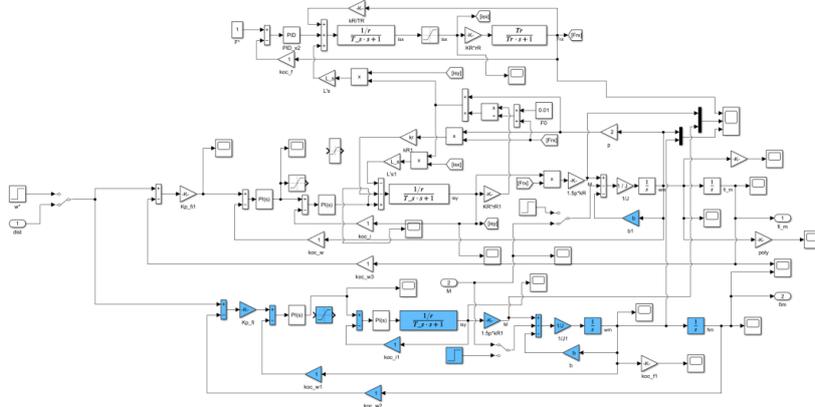


Рис. 5. Модель АКЗ с векторным управлением

Модель тросового подвеса представлена на рис. 6.

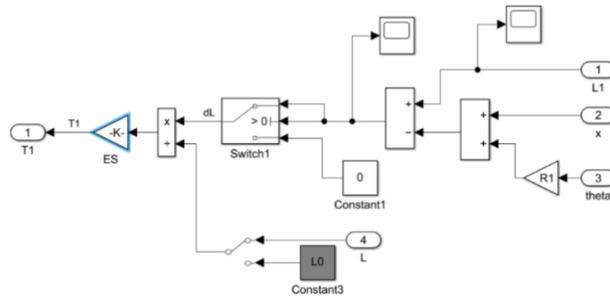


Рис. 6. Модель тросового подвеса

Математическая модель механизма компенсации. В активном режиме работы системы стабилизации перемещение штоков гидроцилиндров происходит достаточно быстро, поэтому пневматическая часть системы не успевает обмениваться теплотой с окружающим пространством [17]. Условию такого адиабатического процесса соответствует выражение

$$p \cdot V^\gamma = const, \quad (12)$$

где $\gamma = 1,3$ – показатель политропы для воздуха.

В схеме механизма компенсации на один модуль подъёма применяется 2 цилиндра, диаметры наружного поршня приняты $D_n = 0,14$ м, внутреннего – $D_b = 0,1$ м. Начальное давление в пневмогидроаккумуляторе $P_0 = 6,0$ МПа, начальный объём воздуха – 200 л.

С учётом того, что при разном положении цилиндра активную работу совершает разный поршень, модель механизма компенсации приведена на рис. 7. Сила, развиваемая гидроцилиндром, описывается выражением

$$F_{air} = P_{air} \cdot S_{cylinder} \quad (13)$$

и для двух наружных и внутренних цилиндров составит соответственно $18,5 \cdot 10^4$ Н и $9,4 \cdot 10^4$ Н. В модели учтена возможность изменения массы каретки [18, 19, 20] с учётом изменения приведённой массы каната при его сматывании и разматывании, а также ограничение по перемещению в 2 м.

Функционирование комплекса. Подъем груза происходит в соответствующих режимах. Вначале, в «Режиме спуска», лебедки механизма подъема равномерно стравливают тросы и происходит опускание СМ на постоянной скорости (рис. 8).

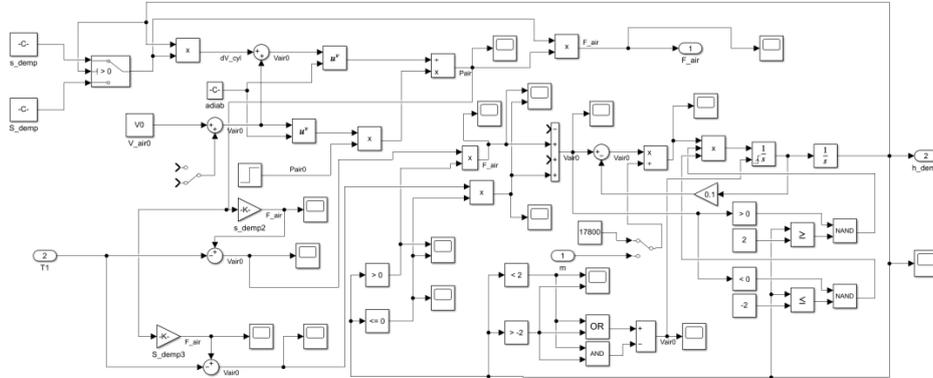


Рис. 7. Модель механизма компенсации

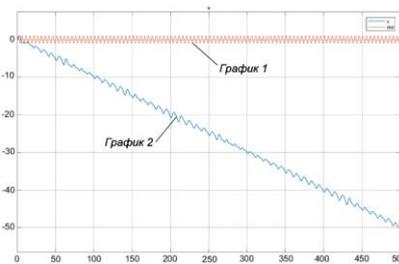


График 1 – перемещение СН; график 2 – перемещение СМ

Рис. 8. Вертикальные перемещения СН и СМ в режиме спуска

При моделировании с помощью аппарата [14] и детальном рассмотрении вы-
илось, что СМ испытывает значительные вертикальные (рис. 9) и угловые ко-
ания, наблюдаются провисания тросов и перемещения кареток компенсаторов
их жестких упоров (рис. 10) с последующими рывками тросов. Поэтому был
работан подрежим «управляемого спуска» с обеспечением стабилизации СМ.

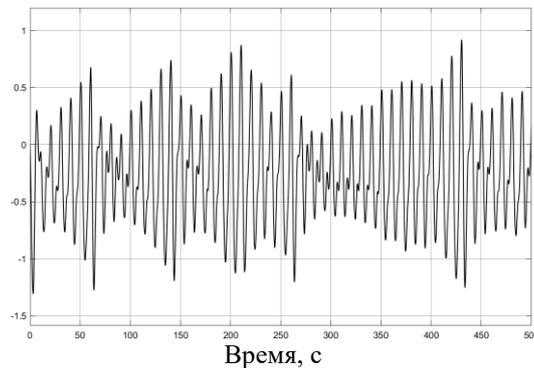


Рис. 9. Вертикальные колебания центра тяжести СМ в режиме
свободного спуска

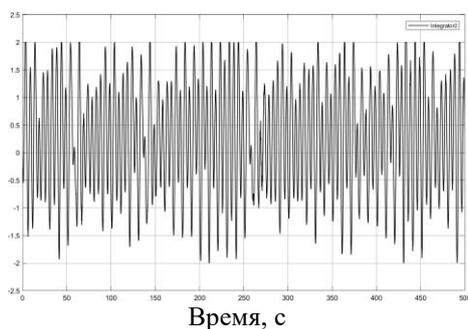


Рис. 10. Перемещение каретки компенсатора внешней лебёдки

Это позволило в условиях управляемого спуска стабилизировать возмущения обеспечить приемлемые условия спуска (рис. 11).

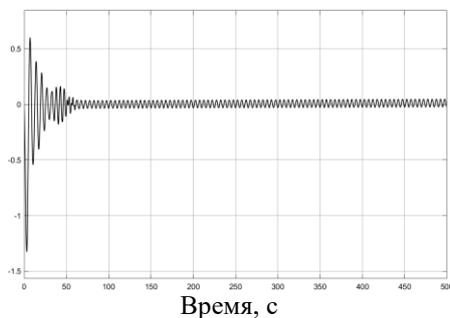


Рис. 11. Колебания относительно линейного перемещения с постоянной скоростью

В «Режиме стабилизации» СМ удерживается на постоянной глубине в горизонтальном положении (рис. 12), испытывая не скомпенсированные колебания от качки подвеса (судна-носителя).

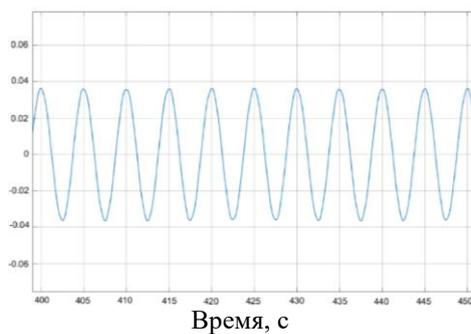


Рис. 12. Перемещения СМ в установившемся режиме

В «Режиме подъема» лебедки механизма подъема равномерно подтягивают тросы. При моделировании были учтены изменение длины троса и уменьшение массы, приведённой к каретке механизма компенсации. В результате (рис. 13) каретки механизма компенсации удовлетворительно обрабатывают возмущения, не выходя на предельные режимы (упоры).

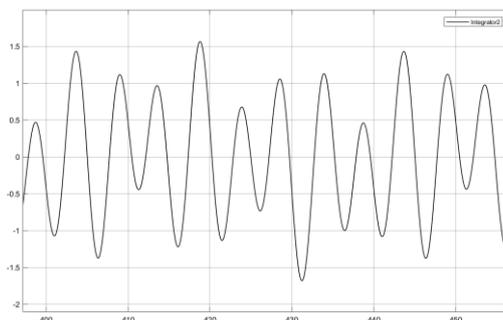


Рис. 13. Перемещения каретки механизма компенсации в режиме подъёма

Заключение. Предлагаемый в работе способ подъема подводного груза снабжен оригинальной конструкцией. В отличие от известных работ [1–7] комплекс подъема подводного груза по предварительным оценкам обеспечивает подводный спуск платформы на четырех тросовых подвесах и ее стабилизацию на заданной глубине. В «Режиме стабилизации» подобранные параметры механизмов позволяют достаточно эффективно удерживать спускаемый модуль на заданном горизонте. На синусоидальной волне колебания центра тяжести спускаемого модуля носят гармонический характер и не превышают 0,04 м, что вполне обеспечивает безопасный захват груза.

После сцепления с подводным грузом осуществляется их совместный подъем к судну носителю и причаливание в корабельную нишу. Носитель может транспортировать поднятый груз в базу.

Предлагаемый комплекс технических средств способен осуществлять подъем тяжелых грузов при волнении моря. Результаты расчетов и моделирования подтверждают возможность практической реализации предложенного подхода и его работоспособность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент 2406681 С1. Российская Федерация. Плавучее подъемное средство: №2009112133/11: заявл. 01.04.2009: опубл. 20.12.2010, бюл. № 35 / А.И. Бураков.
2. Патент 2755358 С1. Российская Федерация. Грузоподъемное устройство для подъема затонувших объектов: №2020136480: заявл. 03.11.2020: опубл. 15.09.2021, бюл. № 26 / А.Ф. Трифонов, О.В. Цуканов, В.В. Абыденников и др.
3. *Nagan Srinivasan*. Tension base TLP can support development in 4000 ft depths // *Offshore*. – 1995. – March. – P. 48, 50, 65.
4. Патент 218212 С2. Российская Федерация. Подводная платформа: №2000112726/03: заявл. 22.05.2000: опубл. 10.05.2002, бюл. № 13 / М.В. Войлошников, Э.И. Черней.
5. *Bruce L. Hutchison, Duane Zaible*. Conceptual Design of Medium-Endurance Research Vessel Optimized for Mission Flexibility and Seakeeping // *Marine Technology*. – 1987. – Vol. 24, No. 2. – April. – P. 170-190.
6. Патент 2778183 С1. Российская Федерация. Вертикальный канатный судоподъемник: №2021105981: заявл. 10.03.2021: опубл. 15.08.2022, бюл. № 23 / С.Ю. Лазарев, Э.М. Баранов, Г.И. Поздняк и др.
7. Патент 2301759 С1. Российская Федерация. Устройство для подъема затонувшего груза: №2006107414/11: заявл. 10.03.2006: опубл. 27.06.2007, бюл. № 18 / Ю.Д. Тарасов.
8. *Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Степин М.А.* Математическая модель управляемого асинхронного электродвигателя // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения. – 2017. – С. 10-15.
9. *Омельченко Е.Я.* Динамические математические модели асинхронных двигателей. – 2012.
10. *Кыюнг Н.С. и др.* Моделирование электропривода с частотным управлением асинхронного двигателя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 221-228.

11. *Мещеряков В.Н. и др.* Система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 116-126.
12. *Семёнов А.С.* Моделирование режимов работы асинхронного двигателя в пакете программ MATLAB // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Амосова. – 2014. – Т. 11, № 1. – С. 51-59.
13. *Ahmed A., Kaur K.* Mathematical model for an asynchronous motor implemented in MATLAB // International journal of scientific & technical development. – 2023.
14. *Moler C.* Numerical Computing with MATLAB, Electronic edition: The MathWorks, Inc, Natick, MA, 2014.
15. *Герман-Галкин С.Г., Matlab & Simulink.* Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб: Корона-Век, 2008. – 386 с.
16. *Dogruer T., Tan N.* Design of PI controller using optimization method in fractional order control systems // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, No. 4. – P. 841-846.
17. *Черный Г.Г.* Газовая динамика. – М.: Наука, 1988. – 424 с.
18. *Haddrell A.E. et al.* Accounting for changes in particle charge, dry mass and composition occurring during studies of single levitated particles // The Journal of Physical Chemistry A. – 2012. – Vol. 116, No. 40. – P. 9941-9953.
19. *Knežević D., Savić V.* Mathematical modeling of changing of dynamic viscosity, as a function of temperature and pressure, of mineral oils for hydraulic systems // Facta universitatis - series: Mechanical Engineering. – 2006. – Vol. 4, br. 1. – P. 27-34.
20. *Coskun G., Kolcuoglu T., Dogramac T.* Analysis of a priority flow control valve with hydraulic system simulation model // J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. – 2017. – 39. – P. 1597-1605.

REFERENCES

1. *Burakov A.I.* Patent 2406681 C1. Russian Federation. Plavuchee pod"emnoe sredstvo [Russian Federation. Floating lifting device]: No. 2009112133/11: applic. 01.04.2009: publ. 20.12.2010, bull. No. 35.
2. *A.F. Trifonov, O.V. TSukanov, V.V. Abydenkov i dr.* Patent 2755358 C1. Russian Federation. Gruzopod"emnoe ustroystvo dlya pod"ema zatounvshikh ob"ektov [Lifting device for lifting sunken objects]: No. 2020136480: applic. 03.11.2020: publ. 15.09.2021, bull. No. 26.
3. *Nagan Srinivasan.* Tension base TLP can support development in 4000 ft depths, *Offshore*, 1995, March, pp. 48, 50, 65.
4. *Voyloshnikov M.V., Cherney E.I.* Patent 218212 C2. Russian Federation. Podvodnaya platform [Underwater platform]: No. 2000112726/03: applic. 22.05.2000: publ. 10.05.2002, bull. No. 13.
5. *Bruce L. Hutchison, Duane Zaible.* Conceptual Design of Medium-Endurance Research Vessel Optimized for Mission Flexibility and Seakeeping, *Marine Technology*, 1987, Vol. 24, No. 2, April, pp. 170-190.
6. *Lazarev S.Yu., Baranov E.M., Pozdnyak G.I. i dr.* Patent 2778183 C1. Russian Federation. Vertikal'nyy kanatnyy sudopod"emnik [Vertical rope ship lift]: No. 2021105981: applic. 10.03.2021: publ. 15.08.2022, bull. No. 23.
7. *Tarasov Yu.D.* Patent 2301759 C1. Russian Federation. Ustroystvo dlya pod"ema zatounvshego gruzha [Device for lifting sunken cargo]: No. 2006107414/11: applic.10.03.2006: publ. 27.06.2007, bull. No. 18.
8. *Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Stepin M.A.* Matematicheskaya model' upravlyaemogo asinkhronnogo elektrodvigatelya [Mathematical model of a controlled asynchronous electric motor], *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya mobil'nykh energeticheskikh sredstv v razlichnykh rezhimakh dvizheniya* [Increasing the efficiency of using mobile energy vehicles in various driving modes], 2017, pp. 10-15.
9. *Omel'chenko E.Ya.* Dinamicheskie matematicheskie modeli asinkhronnykh dvigateley [Dynamic mathematical models of asynchronous motors], 2012.
10. *Kyong N.S. i dr.* Modelirovanie elektroprivoda s chastotnym upravleniem asinkhronnogo dvigatelya [Modeling of an electric drive with frequency control of an asynchronous motor], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical science], 2014, No. 3, pp. 221-228.
11. *Meshcheryakov V.N. i dr.* Sistema upravleniya chastotnym asinkhronnym sinkhronizirovannym elektroprivodom [Control system for frequency asynchronous synchronized electric drive], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [News of higher educational institutions. Energy problems], 2021, Vol. 23, No. 3, pp. 116-126.

12. *Semenov A.S.* Modelirovanie rezhimov raboty asinkhronnogo dvigatelya v pakete programm MATLAB [Modeling of operating modes of an asynchronous motor in the MATLAB software package], *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. MK Amosova* [Bulletin of the North-Eastern Federal University named after. MK Amosova], 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 51-59.
13. *Ahmed A., Kaur K.* Mathematical model for an asynchronous motor implemented in MATLAB, *International journal of scientific & technical development*, 2023.
14. *Moler C.* Numerical Computing with MATLAB, Electronic edition: The MathWorks, Inc, Natick, MA, 2014.
15. *German-Galkin S.G., Matlab & Simulink.* Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK [Design of mechatronic systems on a PC]. Saint Petersburg: Korona-Vek, 2008, 386 p.
16. *Dogruer T., Tan N.* Design of PI controller using optimization method in fractional order control systems, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, Vol. 51, No. 4, pp. 841-846.
17. *Chernyy G.G.* Gazovaya dinamika [Gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1988, 424 p.
18. *Haddrell A.E. et al.* Accounting for changes in particle charge, dry mass and composition occurring during studies of single levitated particles, *The Journal of Physical Chemistry A*, 2012, Vol. 116, No. 40, pp. 9941-9953.
19. *Knežević D., Savić V.* Mathematical modeling of changing of dynamic viscosity, as a function of temperature and pressure, of mineral oils for hydraulic systems, *Facta universitatis - series: Mechanical Engineering*, 2006, Vol. 4, br. 1, pp. 27-34.
20. *Coskun G., Kolcuoglu T., Dogramac T.* Analysis of a priority flow control valve with hydraulic system simulation model, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2017, 39, pp. 1597-1605.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.П. Ковалев.

Чернущь Петр Павлович – БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова; e-mail: petr.chernus@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78124900518; к.т.н.; доцент.

Чернущь Павел Павлович – e-mail: pavel.chernus@yandex.ru; тел.: +78124900518; к.т.н.; доцент.

Яковлев Александр Анатольевич – АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М.В. Фрунзе; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79052500726; к.т.н.; начальник управления.

Сахабудинов Роман Владиславович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: stapler1@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79211852881; к.т.н.; доцент.

Голосий Александр Сергеевич – e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; тел.: +79211852881; к.т.н.; доцент.

Chernus Peter Pavlovich – BSTU "VOENMEH" D.F. Ustinova; e-mail: petr.chernus@yandex.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +78124900518; cand. of eng. sc.; associate professor.

Chernus Pavel Pavlovich – e-mail: pavel.chernus@yandex.ru; phone: +78124900518; cand. of eng. sc.; associate professor.

Yakovlev Aleksandr Anatolievich – ARSENAL DESIGN BUREAU JSK; e-mail: aa.yakovlev@kbarsenal.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79052500726; cand. of eng. sc.; head of department.

Sakhabudinov Roman Vladislavovich – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: stapler1@yandex.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79211852881; cand. of eng. sc.; associate professor.

Golosiy Aleksandr Sergeevich – e-mail: a.s.golosiy@mail.ru; phone: +79213025903; cand. of eng. sc.; associate professor.

В.К. Абросимов, С.М. Лапин**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕОРИИ СХОДСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ СКОПЛЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ИНТЕРЕСА НА МЕСТНОСТИ**

Опыт современных боевых действий инициировал высокую актуальность задач оценки динамики изменения во времени характеристик групп (скоплений) объектов интереса на местности с воздуха. Активное развитие беспилотной авиации, в том числе в составе групп, представляет новые возможности периодического мониторинга местности с решением задач обнаружения и распознавания скоплений объектов интереса в динамике. В статье проведен анализ возможности использования теории сходства для решения задач оценки сходства видов вооружений, военной и специальной техники по характеру распределения в различных скоплениях, в том числе в различных геофизических условиях. Показано, что динамика объектов может быть установлена регулярным мониторингом местности с определением для скоплений различных мер сходства и различия. При этом доказана применимость хорошо себя зарекомендовавших статистических методов исследования биоразнообразия, разработанных в биологии для оценки разнообразия популяций, их сложности, схожести, взаимоотношений и др. Приведены характеристики видового разнообразия важнейших детерминированных скоплений войск и техники стран НАТО. Работоспособность предлагаемого подхода продемонстрирована на примере воздушной разведки условного района с распознаванием динамики пяти видов скоплений, включающих различные типы ВВСТ, личного состава и средств инженерного оборудования. Даны общие рекомендации по проведению соответствующих оценок и принятию решений. Рекомендованы к применению следующие основные меры сходства: коэффициенты сходства Жаккара – для определения меры сходства скоплений по входящим в их состав видам образцов ВВСТ (автомобилей, танков, орудий, бронемашин и др.); индекс Маргалефа для определения количества видов ВВСТ в общем количестве объектов ВВСТ в скоплении; обобщенная мера разнообразия по Шеннону – для оценки разнообразия видов в скоплении; индекс доминирования Симпсона – для определения доминирующего вида ВВСТ в скоплении; коэффициент Серенсена-Чекановского – для определения степени встречаемости выбранного вида образцов ВВСТ в скоплении. Полученные результаты целесообразно использовать в многокритериальных задачах предполетного и оперативного планирования групповых действий беспилотных летательных аппаратов в интересах мониторинга контролируемой территории с учетом требуемого графика получения достоверной информации.

Подобие; сходство; близость; мера; скопление; идентификация; объект; динамика; индекс; коэффициент.

V.K. Abrosimov, S.M. Lapin**ON THE USE OF SIMILARITY THEORY TO ASSESS THE DYNAMICS OF CLUSTERS OF SUBJECTS OF INTEREST ON THE GROUND**

The experience of modern combat operations has initiated the high relevance of the tasks of air-delivered assessing the dynamics of changes in time characteristics of groups (clusters) of objects of interest on the ground. The active development of unmanned aviation, including within groups, provides new opportunities for periodic monitoring of the area with the solution of problems of detection and recognition of clusters of objects of interest in dynamics. The article analyses the possibility of using the theory of resemblance to solve the problems of assessing the similarity of types of weapons, military and special equipment by the nature of distribution in various clusters, including in various geographical conditions. It is shown that the dynamics of objects can be established by regular monitoring of the terrain with the estimation of various measures of similarity and difference for clusters. At the same time, the applicability of well-established statistical methods of biodiversity research developed in biology to assess the diversity of population, their complexity, similarity, relationships, etc. is proved. The characteristics of the species diversity of the most important deterministic clusters of troops and equipment of NATO countries are given. The efficiency of the proposed approach demonstrated by the example of aerial reconnaissance of a conditional area with recognition of the dynamics of five types of clusters, including various types of military personnel, personnel and engineering equipment. General recommendations for conducting appropriate assessments and decision-making are given. The following basic

similarity measurements are recommended for use: Jacquard similarity coefficients to determine the similarity level of clusters by their constituent types of VVST samples (cars, tanks, guns, armored vehicles, etc.), the Margalef index to determine the number of types of VVST in the total number of VVST units in the cluster, the generalized Shannon diversity mass to assess the diversity of species in a cluster, the Sorensen-Chekanovsky coefficient is used to determine the degree of occurrence of the selected type of samples in the cluster. It is advisable to use the obtained results in multi-criteria tasks of preflight and operational planning of group operations of unmanned aerial vehicles in the interests of monitoring the controlled territory, taking into account the required schedule for obtaining reliable information.

Resemblance; similarity; affinity; measure; cluster; identification; object; dynamics; index; coefficient.

Введение. В настоящее время в связи с трендами активного развития беспилотной авиации и миниатюризации повышенное внимание уделяется воздушной разведке. Беспилотные летательные аппараты оснащаются высокоэффективной разведывательной аппаратурой [1]. При этом одной из важных практических задач является обнаружение, распознавание и идентификация расположенной на местности группы объектов интереса, образующих некоторое ограниченное в пространстве объединение машин и людей. Такое пространственное образование в силу обычно высокой неопределенности формирования, целеполагания, поведения и постоянной динамики по сути является скоплением, то есть просто «большим количеством скопившихся где-то людей, предметов, веществ» [2].

В связи с изложенным, на практике часто возникает задача количественно оценить степень сходства нескольких скоплений, например, сходство заданных видов вооружений, военной и специальной техники (ВВСТ) по характеру распределения в различных скоплениях, в том числе в различных геофизических условиях. Возникает и обратная задача – оценить сходство двух и более скоплений по составу и видов ВВСТ. Близкой по семантике является постановка задачи определения динамики изменения одного и того же скопления во времени.

Для задач, где требуется найти определенные отличия, традиционно используется теория подобия, методы которой позволяют рассматривать и сравнивать явления, характеризующиеся общим законом развития, аналогичными механизмами процессов, одинаковой физической природой. Для таких явлений отношения характеризующих их величин постоянны. Для решения подобных задач применяют коэффициенты подобия или сходства, большое количество которых разработано в математической статистике (например, статистические критерии различий) [3].

В задачах распознавания и идентификации представляют интерес характеристики сходства и изменчивости складывающейся на местности ситуации с течением времени, степень разнообразия объектов, степень концентрации объектов на местности, меры включения одних объектов в скопление других и др. Поиск сходства, а по сути процесс сопоставления релевантных частей образов друг с другом, является одной из самых быстрорастущих областей в такой технологии искусственного интеллекта, как машинное обучение.

Представляет значительный интерес проведение определенных аналогий между на первый взгляд различными предметными областями – биологией и обороной. В биологии с использованием теории подобия активно изучаются и разрабатываются методы определения различного рода разнообразия популяций, их сложности, схожести, взаимоотношений и др. [4–6]. Но системы воздушной разведки, например, также фиксируют скопления людей, различного вида военной техники, размещаемых в различных геофизических условиях. При этом военным аналогом генетического разнообразия (популяций, индивидов, хромосом, генов и др.) являются образцы ВВСТ, обнаруженные и распознанные средствами разведки в скоплении. Военным аналогом разнообразия на различных уровнях (типы, семейства, роды, виды, подвиды, популяции) являются типы образующих скопления образцов ВВСТ. Военным аналогом экологического разнообразия (ландшафтов, экосистем, мест обитаний и др.) является география местности боевых действий.

Представляет определенный интерес использование хорошо себя зарекомендовавших статистических методов исследования биоразнообразия (см, например [7]) для решения военно-технических задач классификации скоплений ВВСТ на местности и исследования их динамики.

1. Формирование научной гипотезы. Под скоплениями в настоящей работе понимается совокупность военной, специальной и обеспечивающей боевые действия техники, людей, инженерных сооружений, размещенных в ограниченной области пространства. Такие скопления часто формируются, исходя их военно-стратегических соображений [8].

Обнаруживаемое средствами систем воздушной разведки совокупность объектов интереса на местности скопление обладает пятью основными, чаще нечетко выраженными, характеристиками: а) формой б) размерами в) плотностью г) составом образующих элементов (объектов) и г) динамикой. Во многом определяющим могут быть условия, в которых осуществляется наблюдение-время суток, географические особенности региона и др.

Анализ показывает, что скопления могут иметь как случайный, так и детерминированный характер. Под детерминированными скоплениями понимаются скопления, в которых основные характеристики скопления – форма, размер, плотность, включаемые в скопление объекты различных типов – подчинены определенным фиксированным закономерностям. Детерминированность скоплениям военного назначения придают правила формирования скоплений, изложенные в разнообразных документах; именно они в определенной степени фиксируют и рекомендуют указанные выше характеристики [9]. Под случайными скоплениями понимаются скопления, основные характеристики которых могут быть распределены по некоторому случайному закону распределения. Случайность обусловлена разнообразием ситуаций, в которых могут формироваться скопления; при этом далеко не всегда имеется необходимая статистика для формирования законов распределения.

По этой же причине законы распределения характеристик скоплений практически никогда не бывают равномерными или нормальными. В таких случаях, полагая, что характеристики скоплений имеют нечеткий характер, формируют нечеткие скопления, основные характеристики которых выражаются в виде нечетких, лингвистических характеристик [10].

Введем предположение, что сравнение характеристик скоплений и, в конечном итоге, степень их близости к другим пространственным образованиям можно оценивать с использованием совокупности мер теории подобия (мер разнообразия, концентрации и др.) Повторные обнаружения скоплений с расчетом показателей близости и разнообразия входящих в его состав образцов ВВСТ будут свидетельствовать о наличии динамики скопления, а значения показателей укажут на тренд динамики.

2. Краткий обзор литературы. В работе [11] на основе показателей сходства определяется мера близости задач организационного управления в предположении, что взаимосвязи задач управления могут быть описаны присущими им признаками. Предложена формула для определения коэффициента связности.

Довольно большое число публикаций посвящено обнаружению и распознаванию движущихся объектов (см, в частности, [12]). Как правило, при этом используется принцип выявления элементов, принадлежащих одному и тому же объекту и присвоение им одной и той же метки, что закладывается в основу соответствующих алгоритмов сегментации. Ценное замечание содержится в работе [13] о том, что «...ведущая роль в успешном решении задачи распознавания состояний динамических объектов принадлежит не алгоритмам распознавания, а методам выбора информативных признаков и используемых метрик...». В работе [14] предложены новые меры близости (сходства), функции состояний, решающие

правила, основанные на сформулированных автором трех принципах распознавания состояний. Показана высокая эффективность этих мер близости и функций состояний, способствующая правильному распознаванию состояния любых процессов и объектов, установлению истинного диагноза.

В работе [15] построена модель преобразования динамических изображений, позволяющая находить целевые признаки для так называемых статических сцен с движущимися объектами и динамических сцен на основе понятия максимального динамического инварианта.

Достаточно много внимания уделяется вопросам воздушной разведки [16–18]. При этом они ориентированы, прежде всего, на формирование данных для непосредственного целеуказания, точность, своевременность и полнота которых обеспечивали бы нанесение эффективных ударов с применением обычного и высокоточного оружия для поражения целей после ее обнаружения визуально или с помощью бортовых средств.

Наиболее близко к рассматриваемой тематике находится работа [19], в которой проведен анализ классификации объектов, перемещение которых подлежит отслеживанию, рассмотрены подходы и технологии отслеживания перемещения объектов и разработаны соответствующие модели отслеживания.

Подчеркнем, однако, что в основу большинства разработанных методов закладывается анализ видеопоследовательностей, что требует постоянного присутствия средства разведки над изучаемым районом. [20] Указанное является и демаскирующим признаком, и зачастую трудно выполнимо.

Настоящая работа является логическим продолжением статьи [21], в которой разработана методика распознавания класса пространственно-распределенной группы объектов интереса. Ключевой идеей является возможность систематизации и обобщения классификационных признаков, которыми руководствуется Оператор разметки данных в таких ситуациях, фиксация последовательности его рассуждений при принятии решения и формализация их в виде конкретной практической методики. Построена классификация компактных скоплений военной техники на местности, обнаруженных воздушной разведкой и представленных оптоэлектронной информацией систем технического зрения на примере войсковых подразделений стран НАТО.

3. Меры и коэффициенты теории подобия. В последние годы с новых позиций стали рассматриваться методы теории подобия, которую в литературе часто связывают с концепцией близости. Эта концепция в технике еще только формируется и типовые методы исследования пока не зафиксированы. Вместе с тем, вводятся и используются меры разнообразия, меры концентрации (однородности), меры включения, меры сходства, меры различия (в том числе расстояния), меры совместимости и несовместимости событий, меры взаимозависимости, ассоциативные меры, меры подобия и др. [4, 6]. Актуальность использования принципов близости существенно возросла при появлении в последнее время задач машинного обучения и формирования необходимых для этого обучающих выборок. Это связано еще и с тем, что именно эти концепции закладываются в основу методов распознавания образов.

Как основные используются два типа показателей: основанные на качественных данных (то есть присутствие или отсутствие сущности) и количественных данных (обилие сущностей и их численность). Большинство коэффициентов различных мер близости нормированы и находятся в диапазоне от 0 (сходство отсутствует) до 1 (полное сходство). Различают унарные меры сходства (меры разнообразия, меры концентрации, но для одного объекта), бинарные (здесь рассматриваются два объекта) и n -арные, когда рассматривается n объектов [6].

Меры близости широко применяются в биологии, где сравниваются участки (районы, отдельные фитоценозы, зооценозы и т.п.) по таким показателям, как богатство представленных на территории видов, их разнообразие по типам, по вероятности встречаемости вида (типа) и др. Они также применяются в географии, социологии, распознавании образов, поисковых системах, сравнительной лингвисти-

ке, биоинформатике и др. Как правило, совокупность мер близости представляют в виде матриц типа «объект-объект». Это, например, матрицы сходства, матрицы расстояний (в широком смысле-различия), матрицы совместных вероятностей, матрицы информационных функций и др. Большинство из них могут быть построены на основе абсолютных или относительных мер, а они в свою очередь могут быть симметричными или несимметричными (последние часто называются мерами включения).

Рассмотрим применительно к задаче анализа динамики скоплений на местности и сформулированной выше гипотезе наиболее распространенные меры близости.

Важнейшим термином здесь считается разнообразие. Оно рассматривается как комплексный критерий, отражающий три важнейших характеристики скопления: «богатство» (для техники более подходит простой термин «количество»), характеризующееся общим числом элементов всех видов на выбранной территории, выравненность, отражающая степень неравномерности статистического распределения относительных частот встречаемости отдельных видов и экологические расстояния, или мера различий между отдельными элементами внутри скопления

Принципиальным является одновременность нахождения различных видов в определенной области пространства. При этом активно используется крайне простое правило (табл. 1).

Таблица 1

К качественной оценке степени подобию

Сравниваемые скопления	Параметр	1 скопление	
	Наличие видов	есть	нет
2 скопление	есть	a	b
	нет	c	d

Здесь a – количество видов в первом скоплении, b – количество видов во втором скоплении, c – количество видов, общих для 1-ого и 2-ого скоплений, d – количество видов, отсутствующих в обоих скоплениях.

Коэффициент сходства Жаккара. Этот показатель сходства между двумя наборами данных определяет **степень общности видов на различных территориях** (в двух различных скоплениях), является наиболее используемым и определяется по формуле:

$$K_j = c/(a+b-c).$$

Показатель коэффициента Жаккара для разных степеней общности примерно соответствует таким числам: $K_j \leq 0,2$ -отсутствие общности, интервал $K_j=[0,2-0,65]$ – малая общность, интервал $K_j=(0,65-1)$ – значительная общность и $K_j= 1$ – полная общность.

Несходство между двумя наборами данных описывает термин «Расстояние Жаккара». Оно выражается очевидной формулой

$$R_j = 1 - K_j.$$

Индекс Маргалефа. Индекс Маргалефа характеризует качественную и количественную меру видового спектра (**видовое богатство на определенной территории**) и позволяет оценить, сколько видов ВВСТ приходится на общее число объектов на данной территории. Для расчета индекса используется абсолютная величина – число видов и общее число объектов, что делает его чрезвычайно чувствительным к объему выборки. Он определяется по формуле:

$$D = (S - 1) / \lg N.$$

Здесь S – число выявленных видов, а N общее число объектов S видов в скоплении. Понятно, что чем выше значение индекса, тем большее количество видов на нем представлено и тем больше собственно разнообразие.

Для скоплений военной техники разнообразие групп и типов в группах составляющих его объектов является важным критерием распознавания. Типовыми являются абсолютные значения количества ВВСТ и их относительные значения в данном скоплении. Для относительных оценок целесообразно использовать так называемую качественную метрологическую шкалу Стивенсона [22] со следующими оценками: R (англ. rare) – редко (<0,5%); O (англ. occasional) – изредка (0,5-1,5%); C (англ. common) – обычно (1,5-3,0%); A (англ. abundant) – массово (>3,0%). Однако этот индекс допускается только при сравнении скоплений одного и того же типа. Основным недостатком индекса Маргалефа является зависимость от объема выборки. Вместе с тем, характерной особенностью скоплений военной техники является неравномерность – одни виды ВВСТ представлены большим количеством единиц техники, другие – единичными экземплярами. Принято считать, что скопление с примерно одинаковым количеством всех видов обладает высокой «выравненностью» (биологический термин).

Обобщенная мера разнообразия. Итак, число общих видов для сравниваемых скоплений определяется коэффициентом Жаккара. Качественную и количественную меру видового спектра определяет индекс Маргалефа. Для обобщения обеих мер вводится обобщенная мера разнообразия, учитывающая как число видов, так и равенство между ними по численности. Наиболее часто используемым показателем является индекс разнообразия Шеннона. Индекс характеризует *разнообразие видов и выравнивание в структуре скопления*. Он определяется по формуле

$$H = -\sum_i p_i * \ln p_i,$$

где p_i – доля скопления, состоящего из i видов.

Чем выше значение H , тем выше видовое разнообразие (количество видов) в конкретном скоплении. Значение индекса Шеннона возрастает при увеличении числа видов и увеличении доли видов, представленных значительным числом образцов. Разнообразие уменьшается с уменьшением H , а при $H=0$ вырождается в сообщество, состоящее только из одного вида. Индекс Шеннона обычно варьируется в пределах от 1,5 до 3,5, очень редко превышая 4,5.

Минимальное значение индекса Шеннона соответствует минимальному доминированию при минимальном разнообразии видов (все обнаруженные объекты относятся к одному виду). При невысоком уровне доминирования для примерно 100 видов значения индекса Шеннона в пределах 1-2,5.

Индекс доминирования. В биологии есть эмпирическая закономерность Р.Фишера «большинство видов всегда представлены незначительным числом находок» [4]. Таким образом, нормальный закон распределения (большинство представителей выборки характеризуются средними значениями изучаемого параметра) как ни странно, в биологии почти не работает. Поэтому представляется весьма важным распознавать доминирующие группы и типы объектов ВВСТ в скоплениях. Доминирование означает степень неравенства между скоплениями по числу объектов или типов, входящих в скопление.

К числу основных индексов, показывающих *степень выраженности доминирования определенных видов в структуре скопления*, относится индекс Симпсона. Он описывает вероятность принадлежности любых двух образцов ВВСТ, случайно отобранных из неопределенно большого скопления, к разным видам формулой:

$$I_D = \sum_i p_i^2 = \sum_i (n_i / N)^2, i = 1, 2, 3, \dots, S.$$

Здесь p_i – вероятность встречаемости i -го вида в генеральной совокупности, а N – общая численность элементов скопления. Симпсон также вывел несмещенный определитель этой меры

$$I_C = \sum_i \{n_i (n_i - 1) / N (N - 1)\}, N = \sum_i n_i.$$

где n_i – число экземпляров i -го вида.

Увеличение величины индекса Симпсона, означает уменьшение разнообразия и увеличение степени доминирования одного вида n_i ВВСТ. Уровень доминирования считается высоким, если индекс Симпсона превышает значение 0.1. По мере увеличения I_D разнообразие уменьшается. Поэтому индекс Симпсона, как показатель разнообразия, обратного по смыслу «концентрации», часто используют в следующей форме

$$I_D^* = 1 - \sum_i p_i^2.$$

Эта величина в биологии носит название «вероятность межвидовых встреч» и варьируется от 0 до 1. Индекс I_D^* очень чувствителен к присутствию в выборке наиболее обильных видов, но слабо зависит от видового богатства. Высокая или низкая величина индекса определяется типом распределения видовых обилий для случаев, когда число видов превышает 10.

Коэффициент Серенсена-Чекановского. Этот коэффициент является наиболее универсальным при оценках сходства двух или более совокупностей данных в скоплениях ВВСТ. Удобен он тем, что для его вычисления данные могут быть представлены как в виде «встречаемости» (т.е. в виде процентов или долей единицы, где сумма значений равна 100% или 1) так и в абсолютных величинах. Для качественных переменных он рассчитывается по формуле

$$K_s = 2c/(a+b),$$

где c – число общих видов, присутствующих в двух скоплениях, a – число видов ВВСТ, имеющих только в первом скоплении, b – число видов ВВСТ, имеющих только во втором скоплении.

Для учета численности видов используются индексы, включающие показатели обилия. Так, модифицированный индекс Серенсена-Чекановского рассчитывается по формуле

$$K_{SN} = 2 * \sum_{i=1}^N \min(a_i, b_i) / (\sum_{i=1}^N a_i + \sum_{i=1}^N b_i),$$

где a – общее число объектов в скоплении А, b – общее число объектов в скоплении В.

4. Расчет показателей сходства динамических скоплений. Наш анализ показывает, что существует достаточно большое количество разнообразных детерминированных скоплений на местности, в состав которых входят размещаемые на определенных расстояниях и заключенные в определенной географической зоне образцы ВВСТ, личный состав, инженерные сооружения и др. Среди них наиболее характерными являются пункты управления (взводный, ротный, бригады, дивизии (основной, передовой,)), места расположения ударных средств (батареи гаубиц, тактических ракет, РСЗО и др.), склады боеприпасов, питания, горюче-смазочных материалов и др. (табл. 2).

Таблица 2

Видовое разнообразие детерминированных скоплений

Наименование объекта	Условия	Размеры	Плотность	Типы объектов
Взводный опорный пункт	располагается на передней линии (линия боевого соприкосновения)	400×300 м	-	3 отделения, КНП, укрытия для л/с, основные, запасные временные и ложные ОП, р-н БМ, ходы сообщений
Ротный опорный пункт	располагается на передней линии (линия боевого соприкосновения)	1,5×1 км	-	3 ВОП+ усиление
Батальонная тактическая группа	располагается на передней линии (линия боевого соприкосновения)	5×5 км	-	Ротные опорные пункты + усиление

Наименование объекта	Условия	Размеры	Плотность	Типы объектов
Батарея 105-мм букс.гауб М102	Располагается в 2-4 км от переднего края	400×500 м	50-100 м	105-мм буксируемые гаубицы – 6 шт., 87 чел.
Батарея 155-мм самох.гауб М102	Располагается в 3-5 км от переднего края	700×500 м	100-150 м	155-мм сам.гаубицы – 8 шт., 129 чел.
Батарея 203-мм самох.гауб М102	Располагается в 3-5 км от переднего края	700×500 м	100-150 м	203-мм сам.гаубицы – 6 шт., 122 чел.
Основной КП бригады	располагается от переднего края на удалении 4-6 км и далее в наступлении, 8-10 км и далее в обороне	200×200 м	-	-
Передовой командный пункт бригады	на удалении 1,5-2 км в наступлении, 3-5 км в обороне от переднего края	100×200 м	-	-
Основной командный пункт дивизии	рассредоточено	1,5-2×1-2 км	-	штаб, ЦУБД, узел связи, вспомогательные отделы и секции штаба, всего до 200 человек личного состава, 80-90 автомобилей
Передовой командный пункт дивизии	развертывается на удалении 4-8 км от переднего края в наступлении и 6-15 км в обороне	0,4 км ²	-	-
Батарея ТР «АТАСМС»	15-20 км от линии фронта	4×4 км	-	группа управления, три огневых взвода, отделение транспортировки, всего в батарее 86 человек личного состава, 9 ПУ, 4 КШМ, 8 автомобилей, боезапас для одной ПУ – 2-6 ракет
Батарея РСЗО «LARS-2»	8-10 км от переднего края	-	-	машины управления – 2, два огневых взвода, отделение транспортировки, всего в батарее 67 человек личного состава, восемь 110-мм 36-ствольных ПУ, ТЗМ – 1 на батарею, 12 автомобилей
Склады обычных боеприпасов	-	-	-	наличие рассредоточенных групп подземных и полуподземных хранилищ (бункеров), наземных хранилищ на площади 2,5-5 км ² (в каждой группе по 8-10 бункеров, хранилищ); наличие ограждающих валов и маскировочных заборов; усиленная охрана объектов, особенно ночью; прибытие и убытие большегрузных крытых машин, машин с прицепами; расположение вблизи подразделений артиллерийско-технической службы.

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

Наименование объекта	Условия	Размеры	Плотность	Типы объектов
Склады горюче-смазочных материалов	-	-	-	наличие рассредоточенных подземных и наружных различных емкостей: цистерн, наливных мягких емкостей, баков, штабелей бочек и канистр на площади 1,5-3 км ² , подвод стационарных и полевых трубопроводов; работа насосно-распределительных станций; наличие земляных валов, канав вокруг складов и противопожарных щитов; прибытие на склад бензовозов и машин с жесткой или мягкой тарой под горюче-смазочные материалы; объявление и обозначение запретного района, огороженного проволочным забором и предупредительными щитами (указками).

Рассмотрим пример.

Воздушная разведка некоторого района в момент t_0 обнаружила скопления А, В и С, включающие различные ВВСТ и средства инженерного оборудования. В результате разметки данных было установлено, что в круге А радиусом $R_A=2$ км обнаружены I видов образцов ВВСТ ($i=1,2,3, \dots, I$) (табл. 1). В круге В меньшего радиуса $R_B=1$ км обнаружены J видов образцов ВВСТ ($j=1,2,3, \dots, J$). В квадрате со стороной $R_C=1,5$ км обнаружены K ($k=1,2,3, \dots, K$) «обвалованных» сооружений и построек.

С использованием информационных формул объектов (см. работу [16]) установлено, что скопление А представляет собой основной командный пункт (КП) бригады, скопление В – артдивизион, а скопление С – склад боеприпасов. На рис 1,а для примера изображен вид скопления основного КП бригады, наблюдаемого с беспилотного летательного аппарата с высоты около 1 км.

Противник усилил контроль своего воздушного пространства и поэтому непрерывный мониторинг местности исключен. Таким образом, возможность получения видеопоследовательностей отсутствует.



а) исходное положение б) положение после перемещения

Рис. 1. Пример. Основной командный пункт бригады одной из стран-вероятных противников, обнаруженный воздушной разведкой

Через промежуток времени $t_0 + 5$ часов воздушная разведка рассматриваемого района проведена повторно. Объект А не обнаружен. При неизменных типах количество образцов ВВСТ на объектах В и С изменилось (см. табл. 3). Однако обнаружены две новые группы: скопления Д и Е (значительная группа объектов ВВСТ, вытянутая в колонну).

В табл. 3 систематизированы результаты разведки географического района, сделанные в моменты t_0 и $t_0 + 5$ час.

Таблица 3

Виды размеченных объектов в скоплениях

	Скопление А		Скопление В		Скопление С		Скопление D		Скопление Е	
	t_0	$t_0 + 5$	t_0	$t_0 + 5$	t_0	$t_0 + 5$	t_0	$t_0 + 5$	t_0	$t_0 + 5$
Автомашины	25	0	26	20	2	12	0	20	0	6
Танки	3	0	-	-	-	-	0	2	-	-
Орудия	-	-	18	15	-	-	-	-	0	3
Бункеры	-	-	-	-	12	12	-	-	-	-
Личный состав	~ 150	0	~ 55	~ 500	~ 20	~ 100	0	~ 120	0	~ 50
Результат распознавания	КП бригады	Нет объектов	арт дивизион	арт дивизион	Склад боеприпасов	Склад боеприпасов с пополнением склада	Нет объектов	Перемещенный КП бригады	Нет объектов	Перебазируемая группа от артдивизиона

По полученным результатам для всех скоплений рассчитаны на моменты t_0 и $t_0 + 5$ меры сходства и различия: коэффициент сходства Жаккара, индекс Маргалефа, обобщенная мера разнообразия по Шеннону, индекс доминирования Симпсона и коэффициент Серенсена-Чекановского.

Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Коэффициенты, индексы и меры сходства для обнаруженных скоплений

	А		В		С		D		Е		Характеризует в задаче распознавания скоплений
	t_0	$t_0 + 5$	t_0	$t_0 + 5$	t_0	$t_0 + 5$	t_0	$t_0 + 5$	t_0	$t_0 + 5$	
Коэффициенты сходства Жаккара (типы объектов)	0		1		1		0		0		Типаж объектов
Индексы Маргалефа	0,89/-		0,72/0,73		1,3/0,95		-/0,93		0/1,13		Количество видов объектов
Обобщенная мера разнообразия по Шеннону	0,48/0		0,31/0,29		0,84/0,63		0/0,48		0/0,52		Видовое разнообразие
Индекс доминирования Симпсона	0,73/-		0,86/0,88		0,46/0,67		-/0,73		-/0,73		Разнообразие видов в скоплении
Коэффициент Серенсена-Чекановского	0		1		1		0		0		Типаж объектов при незначительном сходстве

6. Анализ показателей сходства скоплений, находящихся в динамике.

Показатели, рассчитанные в разделе 5, являются весьма информативными для поддержки принятия соответствующих решений.

Анализ динамики скопления А. Коэффициент Жаккара демонстрирует неизменность типов объектов с течением времени. Нулевое значение этого коэффициента для А означает отсутствие всех типов объектов, то есть по существу исчезновение скопления к моменту $t_0 + 5$.

Значение индекса Маргалефа ($K_M > 0,8$) в А показывает доминирование одного вида (в данном случае личного состава) над остальными.

Небольшое значение меры разнообразия по Шеннону ($K_{Ш} < 0,5$) указывает на неравномерность распределения видов в скоплении (преобладание количества личного состава над количеством автомобилей и танков).

Индекс доминирования по Симпсону ($K_C > 0,7$) указывает на доминирование вида (личный состав) в скоплении на другими видами (автомобили и танки). А нулевое значение коэффициента по Серенсену-Чекановскому подтверждает исчезновение скопления А к моменту t_0+5 .

Отсутствие в момент t_0+5 скопления А и появление на расстоянии примерно в 5-7 км от места бывшего расположения скопления А нового скопления Д с аналогичными показателями всех коэффициентов позволяет с высокой степенью достоверности предполагать, что произошло перебазирование КП бригады в новое место дислокации.

Анализ динамики скопления В. К моменту t_0+5 скопление В не изменило своего местонахождения. Между тем, максимально высокое значение коэффициента Жаккара при временных изменениях в скоплении В ($K_J = 1$) демонстрирует как неизменность типажа, так и неизменность нахождения скопления на том же месте через 5 часов.

Индекс Маргалефа ($K_M > 0,7$) также подтверждает, что новых типов ВВСТ в скоплении В не появилось, а в течении всего времени наблюдения доминирование одного вида (личного состава скопления) над остальными не изменилось. Вместе с тем, в момент времени t_0+5 произошли небольшие изменения в численном составе видов скопления В.

Небольшое значение меры разнообразия по Шеннону ($K_{Ш} < 0,35$) указывает на неравномерность распределения видов в скоплении (преобладание количества личного состава над количеством автомобилей и орудий). А небольшие изменения значения $K_{Ш}$ в момент времени t_0+5 указывают на изменения в численном составе видов скопления В. Индекс доминирования по Симпсону ($K_C > 0,8$) указывает на доминирование вида (личный состав) в скоплении над другими видами (автомобили и орудия) в течении всего времени наблюдения.

Высокое значение коэффициента по Серенсену-Чекановскому ($K=1$) подтверждает неизменность типов в скоплении и, соответственно, сохранение скоплением В своего места положения к моменту t_0+5 .

Анализ динамики скопления С. Типы объектов в скоплении С не изменились с течением времени (коэффициент Жаккара равен $K_J=1$).

Индекс Маргалефа в начальный момент времени ($K_M = 1,3$) указывает на сравнительно небольшое доминирование одного вида в скоплении над другими (20 человек и 12 бункеров), а через 5 часов индекс ($K_M = 0,95$) позволяет сделать вывод о численном увеличении двух преобладающих видов (на 100 человек личного состава и небольшому увеличению автомобилей).

Сравнительно высокое значение меры разнообразия по Шеннону ($K_{Ш} = 0,84$) в начальный момент времени отображает примерное равенство видов в скоплении, а снижение меры разнообразия ($K_{Ш} = 0,63$) указывает на неравномерность распределения видов в скоплении через выбранный промежуток времени. С учетом предварительного распознавания, что скопление является складом боеприпасов, это позволяет сделать вывод о том, что в момент t_0+5 предположительно осуществляется пополнение склада новыми боеприпасами, с привлечением большего количества личного состава.

Изменение индекса доминирования по Симпсону с $K_C=0,46$ до $K_C=0,67$ указывает на увеличение доминирования вида (личный состав) в скоплении на другими видами (автомобили и бункеры), что подтверждает выводы, сделанные на основании меры разнообразия по Шеннону.

Высокое значение коэффициента по Серенсену-Чекановскому ($K_s=1$) подтверждает неизменность типов в скоплении и соответственно сохранение скоплением С своего местоположения к моменту t_0+5 .

Анализ динамики скопления D. Появление скопления D в момент t_0+5 с показателями всех коэффициентов аналогичными скоплению А позволяет сделать вывод о том, что скопление D является перемещенным скоплением А.

Анализ динамики скопления E. Коэффициент Жаккара равный 0 демонстрирует отсутствие каких либо типов объектов, т.е. отсутствие динамики скопления E в момент времени t_0 , и появление скопления в момент t_0+5 .

Нулевой индекс Маргалефа в начальный момент времени ($K_M = 0$) указывает на отсутствие преобладания какого-либо вида в скоплении т.е. на отсутствие самого скопления, а через 5 часов индекс ($K_M = 1,13$) позволяет сделать вывод о появлении нового скопления и преобладании в нем одного из видов над другими (50 человек по отношению к трем орудиям и шести автомобилям).

Небольшое значение меры разнообразия по Шеннону ($K_{ш} = 0,52$) указывает на неравномерность распределения видов в скоплении, что подтверждает выводы из значений индекса Маргалефа.

Индекс доминирования по Симпсону ($K_c > 0,7$) указывает на доминирование вида (личный состав) в скоплении на другими видами (автомобили и орудия).

Нулевое значение коэффициента по Серенсену-Чекановскому подтверждает отсутствие динамики скопления E к моменту t_0+5 , что означает его появление в промежутке времени между t_0 и t_0+5 .

Заключение. Для распознавания динамики изменения ситуации на наблюдаемой местности пока еще не разработано требуемых и простых способов автоматизации таких процессов. Применимость методов распознавания на основе анализа видеопоследовательностей объективно ограничена, прежде всего активностью противника по контролю воздушного пространства. Кроме того, специалист по разметке данных должен обладать крайне высокой квалификацией для определения типа скопления на местности, тем более в процессе его потенциально возможного перемещения.

В работе введена и доказана гипотеза о том, что сравнение характеристик скоплений и, в конечном итоге, степень их близости к другим пространственным образованиям целесообразно оценивать с использованием совокупности мер теории близости. Действительно, по изменениям и возникающим трендам значений мер сходства и различия скоплений объектов интереса можно оценивать их динамику (перемещение в пространстве, вариации значений числа образующих скопление элементов и др.) и выработать соответствующие классификации и выводы.

Рассмотрены и рекомендованы к применению следующие основные меры сходства:

- ◆ коэффициенты сходства Жаккара для определения меры сходства скоплений по входящим в их состав видам образцов ВВСТ (автомобилей, танков, орудий, бронемашин и др.);
- ◆ индекс Маргалефа для определения количества видов ВВСТ в общем количестве объектов ВВСТ в скоплении;
- ◆ обобщенная мера разнообразия по Шеннону для оценки разнообразия видов в скоплении;
- ◆ индекс доминирования Симпсона для определения доминирующего вида ВВСТ в скоплении;
- ◆ коэффициент Серенсена-Чекановского для определения степени встречаемости выбранного вида образцов ВВСТ в скоплении.

Полученные результаты целесообразно использовать в многокритериальных задачах предполетного и оперативного планирования групповых действий беспилотных летательных аппаратов в интересах мониторинга контролируемой территории с учетом требуемого графика получения достоверной информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Bartulović V., Trzun Z., Hoić M.* Use of Unmanned Aerial Vehicles in Support of Artillery // Operations Strategos. – 2023. – Vol. 7 (1). – P. 71-92.
2. *Ожегов С.И.* Толковый словарь русского языка. – М.: АСТ, 2017. – 320 с.
3. *Perinetti G.* Choosing statistical test when dealing with differences // South European Journal of Orthodontics and Dentofacial Research. – 2016. – Vol. 3 (1). – P. 4-5. – DOI: 10.5937/sejodr3-1264.
4. *Еремеев Е.А.* Математические методы в фаунистических исследованиях. Методическое пособие. – Бийск: Бия, 2020. – 67 с.
5. *Шайхутдинова А.А.* Методы оценки биоразнообразия: методические указания. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 37 с.
6. *Леонтьев Д.В.* Флористический анализ в микологии: учебник для студентов высших учебных заведений. – Харьков, 2008. – 110 с.
7. *Kumphakarm R.* Statistical Methods for Biodiversity Assessment: Doctor of Philosophy Thesis. School of Mathematics, Statistics and Actuarial Science University of Kent, 2016. – Режим доступа: URL: <https://kar.kent.ac.uk/60557/1/81thesis.pdf>.
8. *McCloud G.* What are clusters in the military? – Режим доступа: URL: <https://thegunzone.com/what-are-clusters-in-the-military/>.
9. *Кабанченко А.М.* Основы боевого применения подразделений частей и соединений иностранных армий (на примерах армий США и ФРГ): учеб. пособие. – М.: МГИМО, 2018. – 202 с.
10. *Grover N.* A study of various Fuzzy Clustering Algorithms // International Journal of Engineering Research. – 2014. – Vol. No. 3, Issue No. 3. – P. 177-181.
11. *Кадыров А.Л., Ваховов А.А.* Определение меры близости задач управления // Вестник ТГУПБП. – 2009. – № 4 (40). – С. 86-91.
12. *Обухова Н.А.* Обнаружение и сопровождение движущихся объектов // Информационно-управляющие системы. – 2004. – № 1. – С. 30-37.
13. *Колесникова С.И.* Методы распознавания состояний динамических систем // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 5. – С. 55-62.
14. *Уздин Д.З.* Меры близости, функции состояний и решающие правила в теории распознавания состояний (статистической классификации). – 2-е изд., доп. и испр. – М.: МАКС Пресс, 2016. – 126 с.
15. *Фаворская М.В.* Модели и методы распознавания динамических образов на основе пространственно-временного анализа последовательностей изображений: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – 2011. – Режим доступа: URL: <https://www.dissercat.com/content/modeli-i-metody-raspoznavaniya-dinamicheskikh-obrazov-na-osnove-prostranstvenno-vremennogo-a> (дата обращения: 2.04.2023).
16. *Васильев В.А., Федюнин П.А., Манин В.А., Васильев А.В.* Концептуальная оценка разведывательного обеспечения ударных действий авиации // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2020. – № 14. – С. 41-53.
17. *Верба В.С., Меркулов В.И., Чернов В.С.* Информационные системы авиационных комплексов тактической воздушной разведки США // Успехи современной радиоэлектроники. – 2020. – Т. 74, № 2. – С. 5-21.
18. *Гончаренко В.И., Желтов С.Ю., Князь Г.Н., Лебедев Д.А., Михайлин О.Ю., Царева О.Ю.* Интеллектуальная система планирования групповых действий беспилотных летательных аппаратов при наблюдении наземных мобильных объектов на заданной территории // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2021. – № 3. – С. 39-56.
19. *Савинкова С.А.* Разработка метода отслеживания перемещений объектов // Вестник современных исследований. – 2021. – № 1-6 (39). – С. 28-36.
20. *Zhang J., Shao L., Zhang L., Jones G.* Intelligent video event analysis and understanding // Studies in Computational Intelligence. – Berlin, Germany: Springer, 2010. – Vol. 332. – DOI: 10.1007/978-3-642-17554-1.
21. *Абросимов В.К., Никоноров В.И.* Методика разметки данных о компактных скоплениях объектов интереса в задачах машинного обучения // Полет. – 2022. – № 10. – С. 21-28.
22. *Mehtar Erguven* Influences of Measurement Theory on Statistical Analysis & Stevens' Scales of Measurement // Journal of Technical Science and Technologies. – 2014. – Vol. 2, Issue 1. – DOI: <https://doi.org/10.31578/v2i1.52>.

REFERENCES

1. *Bartulović V., Trzun Z., Hoić M.* Use of Unmanned Aerial Vehicles in Support of Artillery, *Operations Strategos*, 2023, Vol. 7 (1), pp. 71-92.
2. *Ozhegov S.I.* Tolkovyy slovar' russkogo yazyka [Explanatory dictionary of the Russian language]. Moscow: AST, 2017, 320 p.
3. *Perinetti G.* Choosing statistical test when dealing with differences, *South European Journal of Orthodontics and Dentofacial Research*, 2016, Vol. 3 (1), pp. 4-5. DOI: 10.5937/sejodr3-1264.
4. *Eremeev E.A.* Matematicheskie metody v faunisticheskikh issledovaniyakh. Metodicheskoe posobie [Mathematical methods in faunal studies. Toolkit]. Biysk: Biya, 2020, 67 p.
5. *Shaykhutdinova A.A.* Metody otsenki bioraznoobraziya: metodicheskie ukazaniya [Methods for assessing biodiversity: guidelines]. Orenburg: OGU, 2019, 37 p.
6. *Leont'ev D.V.* Floristicheskiy analiz v mikologii: uchebnik dlya studentov vysshih uchebnykh zavedeniy [Floristic analysis in mycology: a textbook for students of higher educational institutions]. Khar'kov, 2008, 110 p.
7. *Kumphakarm R.* Statistical Methods for Biodiversity Assessment: Doctor of Philosophy Thesis. School of Mathematics, Statistics and Actuarial Science University of Kent, 2016. Available at: <https://kar.kent.ac.uk/60557/1/81thesis.pdf>.
8. *McCloud G.* What are clusters in the military? Available at: <https://thegunzone.com/what-are-clusters-in-the-military/>.
9. *Kabanchenko A.M.* Osnovy boevogo primeneniya podrazdeleniy chastey i soedineniy inostrannykh armiy (na primerakh armiy SShA i FRG): ucheb. posobie [Fundamentals of the combat use of units of units and formations of foreign armies (using the examples of the US and German armies): tutorial]. Moscow: MGIMO, 2018, 202 p.
10. *Grover N.* A study of various Fuzzy Clustering Algorithms, *International Journal of Engineering Research*, 2014, Vol. No. 3, Issue No. 3, pp. 177-181.
11. *Kadyrov A.L., Vakhobov A.A.* Opredelenie mery blizosti zadach upravleniya [Determination of the measure of proximity of control tasks], *Vestnik TGUPBP* [Bulletin of TSUPBP], 2009, No. 4 (40), pp. 86-91.
12. *Obukhova N.A.* Obnaruzhenie i soprovozhdenie dvizhushchikhsya ob"ektov [Detection and tracking of moving objects], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2004, No. 1, pp. 30-37.
13. *Kolesnikova S.I.* Metody raspoznavaniya sostoyaniy dinamicheskikh sistem [Methods for recognizing states of dynamic systems], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2010, Vol. 316, No. 5, pp. 55-62.
14. *Uzdin D.Z.* Mery blizosti, funktsii sostoyaniy i reshayushchie pravila v teorii raspoznavaniya sostoyaniy (statisticheskoy klassifikatsii) [Proximity measures, state functions and decision rules in the theory of state recognition (statistical classification)]. 2nd ed. Moscow: MAKS Press, 2016, 126 p.
15. *Favorskaya M.V.* Modeli i metody raspoznavaniya dinamicheskikh obrazov na osnove prostranstvenno-vremennogo analiza posledovatel'nostey izobrazheniy: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk, 2011 [Models and methods for recognizing dynamic images based on spatio-temporal analysis of image sequences: abstract dr. eng. sc. diss.]. Available at: <https://www.dissercat.com/content/modeli-i-metody-raspoznavaniya-dinamicheskikh-obrazov-na-osnove-prostranstvenno-vremennogo-a> (accessed 2 April 2023).
16. *Vasil'ev V.A., Fedyunin P.A., Manin V.A., Vasil'ev A.V.* Kontseptual'naya otsenka razvedyvatel'nogo obespecheniya udarnykh deystviy aviatsii [Conceptual assessment of reconnaissance support for aviation strike operations], *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika* [Aerospace Forces. Theory and practice], 2020, No. 14, pp. 41-53.
17. *Verba V.S., Merkulov V.I., Chernov V.S.* Informatsionnye sistemy aviatsionnykh kompleksov takticheskoy vozdushnoy razvedki SShA [Information systems of US tactical air reconnaissance aircraft], *Usp ekhi sovremennoy radioelektroniki* [Advances in modern radio electronics], 2020, Vol. 74, No. 2, pp. 5-21.
18. *Goncharenko V.I., Zheltov S.Yu., Knyaz' G.N., Lebedev D.A., Mikhaylin O.Yu., TSareva O.Yu.* Intellektual'naya sistema planirovaniya gruppovykh deystviy bespilotnykh letatel'nykh apparatov pri nablyudenii nazemnykh mobil'nykh ob"ektov na zadannoy territorii [Intelligent system for planning group actions of unmanned aerial vehicles when observing ground mobile objects in a given territory], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2021, No. 3, pp. 39-56.

19. Savinkova S.A. Razrabotka metoda otslezhivaniya peremeshcheniy ob"ektov [Development of a method for tracking the movement of objects], *Vestnik sovremennykh issledovaniy* [Bulletin of modern research], 2021, No. 1-6 (39), pp. 28-36.
20. Zhang J., Shao L., Zhang L., Jones G. Intelligent video event analysis and understanding, *Studies in Computational Intelligence*. Berlin, Germany: Springer, 2010, Vol. 332. DOI: 10.1007/978-3-642-17554-1.
21. Abrosimov V.K., Nikonorov V.I. Metodika razmetki dannykh o kompaktnykh skopleniyakh ob"ektov interesa v zadachakh mashinnogo obucheniya [Methodology for marking data on compact clusters of objects of interest in machine learning problems], *Polet* [Polet], 2022, No. 10, pp. 21-28.
22. Mehtar Erguven Influences of Measurement Theory on Statistical Analysis & Stevens' Scales of Measurement, *Journal of Technical Science and Technologies*, 2014, Vol. 2, Issue 1. DOI: <https://doi.org/10.31578/v2i1.52>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.В. Соколов.

Абросимов Вячеслав Константинович – Главный научно-исследовательский испытательный межвидовой центр перспективного вооружения Министерства обороны РФ; e-mail: avk787@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79168153512; д.т.н.; с.н.с.; советник РАРАН; в.н.с.

Лапин Сергей Михайлович – e-mail: serg110687@ya.ru; тел.: +79219792431; старший инженер-испытатель.

Abrosimov Viacheslav Konstantinovich – The Main Research and Testing Interspecific Advanced Weapons Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: avk787@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79168153512; dr. of eng. sc.; senior researcher; advisor to RARAN; leading researcher.

Lapin Sergey Michailovich – e-mail: serg110687@ya.ru; phone: +79219792431; senior test engineer.

УДК 007.52:005: 623.094

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-43-57

Д.Н. Гонтарь, В.В. Соловьев, Р.Ю. Джаныбеков, А.В. Палеев, В.В. Семак

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ БОЕВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНО-УДАРНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В современной системе вооруженного конфликта, где актуальны гибридные и информационные способы решения боевых задач, становится всё более важным разрабатывать эффективные методы оценки боевых возможностей разведывательно-ударных робототехнических систем. Данное исследование направлено на создание универсального метода для оценки таких систем в условиях реальной боевой среды, обеспечивая комплексный подход к измерению их эффективности. Авторы делают акцент на интеграции алгоритмических решений, предназначенных для анализа эффективности современного вооружения и военной техники, что позволяет учесть широкий диапазон переменных и тактико-технических характеристик, характерных для нынешней боевой обстановки. В работе особое внимание уделено выявлению ключевых характеристик наземных боевых роботизированных комплексов и исследованию их использования в группах. Это открывает пути для повышения боевой эффективности, уменьшения рисков для личного состава и улучшения процессов принятия решений. С учетом внедрения автономных технологий исследование подчеркивает значимость роботизации в контексте военных действий, акцентируя на необходимости использования машин в местах высокого риска для человека. Проанализировав существующие методики оценки боевой эффективности ударно-разведывательных образцов вооружения и военной техники, авторы предложили алгоритм, который принимает во внимание уникальные требования и характеристики роботизированных систем, включая их огневую мощь, мобильность и выживаемость. Этот алгоритм может стать основой для разработки систем управления роботизированными комплексами следующего поколения, что обеспечит их повышенную боевую эффективность и способность к эффективной работе в составе групп

военных операций. Таким образом, результаты данного исследования представляют значительный вклад в область военной робототехники, предлагая подходы, которые помогут в разработке и оптимизации роботизированных боевых систем. Эти наработки могут служить основой для улучшения стратегий применения таких систем на поле боя.

Робототехнический комплекс; боевая эффективность; группа; алгоритм; боевой потенциал.

D.N. Gontar, V.V. Soloviev, R.Yu. Dzhanbekov, A.V. Paleev, V.V. Semak

ALGORITHM FOR ASSESSING THE COMBAT EFFECTIVENESS OF THE APPLICATION OF A RECONNAISSANCE-STRIKE ROBOTIC COMPLEX FOR MILITARY PURPOSES

In the modern system of armed conflict, where hybrid and informational methods of solving combat tasks are relevant, it becomes increasingly important to develop effective methods for assessing the combat capabilities of reconnaissance-strike robotic systems. This research is aimed at creating a universal method for evaluating such systems in real combat conditions, ensuring a comprehensive approach to measuring their effectiveness. The authors emphasize the integration of algorithmic solutions designed to analyze the effectiveness of modern weapons and military equipment, allowing for a wide range of variables and tactical-technical characteristics typical of the current combat situation. The work pays special attention to identifying key characteristics of ground combat robotic complexes and investigating their use in groups. This opens paths for increasing combat effectiveness, reducing risks for personnel, and improving decision-making processes. Considering the implementation of autonomous technologies, the study highlights the significance of robotization in the context of military actions, focusing on the necessity of using machines in high-risk areas for humans. By analyzing existing methodologies for assessing the combat effectiveness of reconnaissance-strike samples of weapons and military equipment, the authors proposed an algorithm that takes into account the unique requirements and characteristics of robotic systems, including their firepower, mobility, and survivability. This algorithm can become the basis for the development of control systems for the next generation of robotic complexes, ensuring their increased combat effectiveness and ability to work effectively as part of groups in military operations. Thus, the results of this research represent a significant contribution to the field of military robotics, offering approaches that will help in the development and optimization of robotic combat systems. These developments can serve as a basis for improving strategies for the use of such systems on the battlefield.

Robotic complex; combat effectiveness; group; algorithm.

Введение. Современные вызовы в военной сфере требуют от Вооруженных Сил РФ адаптации к быстро меняющейся обстановке, основываясь на стратегии разработки и внедрения нового вооружения в рамках госпрограммы вооружений на 2018-2027 годы. Увеличение динамики и технологического уровня ведения войн подчеркивает необходимость пересмотра военного планирования. Согласно [1], «отдельным важным направлением развития системы вооружения должна стать роботизация – создание и внедрение в войсках роботизированных комплексов воздушных (дистанционно пилотируемых летательных аппаратов), наземных, надводных, подводных. Это не дань моде, а осознанный шаг, обусловленный необходимостью замены военнослужащего при выполнении задач, сопряженных с риском для жизни, либо тех, которые не могут быть выполнены пилотируемыми комплексами».

Развитие роботизированных систем в военной сфере является ключевым аспектом модернизации вооружения и военной техники, направленным на внедрение автономных технологий [2, 3]. Целью такой модернизации является не только повышение эффективности военной техники, но и существенное уменьшение рисков для жизни военнослужащих. Внедрение беспилотных систем становится фундаментом для создания вооружения нового поколения и открывает перспективы для кардинального изменения тактики боевых действий, делая их более безопасными и эффективными.

В ВС РФ наблюдается отсутствие методик для группового использования робототехнических комплексов (РТК) в разных условиях, что ограничивает их эффективность на основе экспертных оценок и опыта [4]. Для повышения эффективности РТК необходимо разработать инструменты для поддержки решений, прогнозирующих исходы операций. Современные вызовы требуют пересмотра подходов к военному планированию и разработку новых методологий для оценки боевых возможностей и оптимизации состава войск.

Анализ методов и подходов. Для оценки боевых возможностей вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) на практике часто прибегают к двум основным методам: анализу статистических данных о прошлых военных операциях, включая опыт Второй мировой войны, и использованию метода боевых потенциалов для определения оперативно-тактических параметров. Эти методы продолжают оставаться актуальными, хотя и требуют дополнительного анализа и адаптации к меняющимся условиям ведения современных военных действий. Их совершенствование поможет улучшить точность прогнозов и эффективность планирования операций, учитывая новые военные технологии и методы ведения боев.

В современной практике для оценки боевого потенциала новейших видов вооружения и военной техники часто используются методы экспертного оценивания [5–7]. К таким методам относятся определение коэффициентов относительной важности [8], анализ иерархий [9], классификация [8] и другие. Эти методы позволяют комплексно оценить характеристики и возможности военной техники, учитывая мнения экспертов в различных областях. Они предоставляют более точную и актуальную информацию о боевом потенциале, что особенно важно при планировании современных военных операций и разработке новых образцов вооружения.

Процесс оценки боевого потенциала военной техники включает в себя ключевые этапы [11, 12]:

1. Определение целей и координация – формируется команда управления с задачей координации оценки, включая специалистов из разных областей.
2. Выбор экспертов – отбираются квалифицированные эксперты через методы самооценки и взаимной оценки.
3. Экспертиза – эксперты оценивают военную технику, используя анкеты, интервью.
4. Анализ результатов – данные анализируются для формирования выводов о боевом потенциале.

Этот сжатый подход обеспечивает объективную оценку, необходимую для военного планирования и развития вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ).

Методы экспертного оценивания военной техники основываются на предположении о простоте и суммируемости боевых действий, а также на интуитивном понимании сравнения различных типов вооружения. Оценка боевого потенциала зависит не от объективных характеристик военной техники, а от субъективной информации от экспертов. Доверие к этой информации опирается на компетентность, опыт и психологическую устойчивость экспертов. Однако, при включении в оценку боевого потенциала элементов, таких как разведывательные и управляющие системы, методы сталкиваются с проблемами из-за необходимости присвоения коэффициентов на основе субъективного суждения, без возможности объективной проверки. Это подход не учитывает специфику, масштабы и условия военных действий, что ограничивает его точность и надежность.

Вторая группа методов для определения боевого потенциала вооружения основана на вычислении коэффициентов боевой соизмеримости [12–15]. Эти методы включают в себя анализ технико-тактических характеристик (ТТХ), огневых возможностей, моделирование боевых действий и компенсацию для оценки сравнимых образцов военной техники.

Метод сопоставления ТТХ заключается в сравнении характеристик, определяющих боевые свойства военной техники. Преимуществом является простота и наглядность, но метод страдает от неопределенности в выборе критически важных ТТХ для расчета [16].

Метод сопоставления огневых возможностей углубляет анализ, сосредотачиваясь на количественных данных о боевых возможностях вооружения, что придает ему большую объективность. Однако сложность возрастает при оценке многоаспектных характеристик, например, сравнении эффективности разных систем ПВО на разных высотах.

Оба метода представляют собой попытки количественного сравнения боевых возможностей военной техники, при этом каждый имеет свои преимущества и ограничения, требующие дальнейшей доработки и уточнения в процессе их применения.

Метод моделирования боя позволяет точно рассчитывать потери и испытывать разные сценарии боевых действий, но ограничен начальным периодом и ближним боем. Метод компенсации сравнивает различные типы ВВСТ, требуя математической модели для стратегического анализа [4]. Основываясь на типичном сценарии, он моделирует изменения в численности войск, оценивая влияние на исход операции и определяя эффективность ВВСТ по перемещению линии фронта. Эти методы предоставляют субъективную оценку боевых возможностей, подчеркивая сложность точного определения необходимых сил и средств для операций.

Доверие к оценкам боевого потенциала военной техники, полученным через экспертные методы, ограничено из-за их зависимости от квалификации и субъективности экспертов. Попытки включить разнообразные коэффициенты в анализ только усиливают эту проблему, так как такие коэффициенты зачастую присваиваются без возможности их объективного подтверждения, что затрудняет точное определение боевых возможностей и необходимого состава войск. Кроме того, процесс вычисления боевых потенциалов сложен и затратен по времени.

Анализ методов второй группы выявил, что для получения коэффициента боевой соизмеримости необходимо определить либо коэффициент важности ТТХ, либо коэффициент снижения эффективности, что делает эти оценки субъективными. Это уменьшает доверие к данным методам. Также, для оперативных расчетов необходимы две модели: одна для расчета боевых потенциалов, другая для оценки боевых возможностей, что усложняет процесс. Среди активных исследований в этой области в интересах ВС РФ выделяются работы Буравлева А.И., Буренка В.М., и Брезгина В.С., направленные на развитие госпрограммы вооружений и оценку боевых возможностей новых образцов ВВСТ. Предложенная методика оценки боевой эффективности робототехники устраняет недостатки существующих подходов, используя заранее подготовленные сценарии для оценки боевых потенциалов.

Под боевым потенциалом (боевыми возможностями) образца ВВСТ понимается интегральный показатель, характеризующий максимальный объем боевых задач, который может выполнить образец ВВСТ по своему функциональному назначению в заданных (расчетных) условиях применения за время своего существования [5, 17].

Необходимо понимать, что РТК ВН является одним из образцов ВВСТ и к нему также возможно применение метода боевых потенциалов ВВСТ.

Робототехнический комплекс военного назначения – группа робототехнических платформ (РТП), функционально взаимосвязанных между собой для выполнения одной или нескольких задач по ведению (обеспечению ведения) боевых действий.

Робототехническая платформа – совокупность шасси установленного типа (гусеничное, колесное или др.) и полезной нагрузки (система приема-передачи данных, система технического зрения, бортовой вычислитель, средства огневого поражения, разведки и др.), действующая автономно или дистанционно управляемая, в целях выполнения задач по ведению (обеспечению ведения) боевых действий.

В иерархии системы показателей оценки эффективности образца ВВСТ боевой потенциал занимает самый высокий уровень (рис. 1). На среднем уровне находятся боевые свойства (БС), которые являются обобщенными показателями эффективности образцов ВВСТ [19].

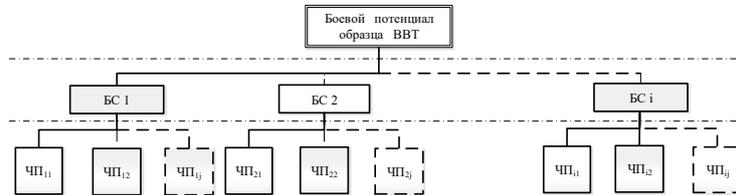


Рис. 1. Иерархия системы показателей эффективности образцов ВВСТ

На нижнем уровне БС представляют свертку ряда частных показателей (ЧП), значения которых непосредственно зависят от тактико-технических характеристик образцов ВВСТ.

Для образцов ВВСТ, имеющих различное функциональное назначение, частные показатели могут отличаться.

В военно-научных кругах при оценке эффективности вооружения и военной техники активно используются обобщенные показатели боевых свойств. Однако до сих пор не сформировалось единого подхода к определению структуры и содержания этих показателей. Исследователи расходятся во мнениях относительно того, какие характеристики следует учитывать, предлагая различные наборы боевых свойств, начиная от трех основных (точность, мощность, применимость) и заканчивая более расширенными списками, включающими огневую мощь, живучесть, запас хода и проходимость.

Для определения комплекса боевых свойств, адекватно описывающих боевой потенциал ВВСТ, важно обратиться к основам военного искусства, отражающим принципы использования военной техники в соответствии с объективными законами ведения боевых действий. Согласно одному из источников, четыре боевых свойства - боевая мощь, мобильность, применимость и живучесть - являются ключевыми для полного раскрытия функциональной сущности ВВСТ и ее способности выполнять боевые задачи в разнообразных условиях.

Метод оценки боевых потенциалов робототехнических комплексов. В предложенной методике оценки боевой эффективности робототехнических комплексов военного назначения основное внимание уделено трем боевым свойствам: боевая мощь, мобильность и живучесть. Применимость, как четвертое свойство, не рассматривается отдельно, поскольку она предполагается в качестве исходного условия боевой задачи, для решения которой и рассчитывается боевой потенциал, и таким образом считается априорной характеристикой [18, 19].

Оценка боевой эффективности группового применения робототехнического комплекса военного назначения складывается из трех боевых свойств: боевая мощь, мобильность, живучесть. Боевое свойство «применимость» не рассматривается отдельно, в связи с тем, что оно отражается в исходных данных поставленной боевой задачи, для выполнения которой рассчитывается боевой потенциал и тем самым является априорной информацией [20].

Структура системы показателей боевой эффективности применения РТК ВН, предназначенного для решения огневых задач, представлена на рис. 2.

Предложенная выше система показателей позволяет на достаточном уровне проводить оценку боевой эффективности применения РТК ВН, предназначенного для решения огневых задач, и использована для разработки программного обеспечения, предназначенного для оценки боевой эффективности группового применения РТК ВН, представленного на рис. 3.

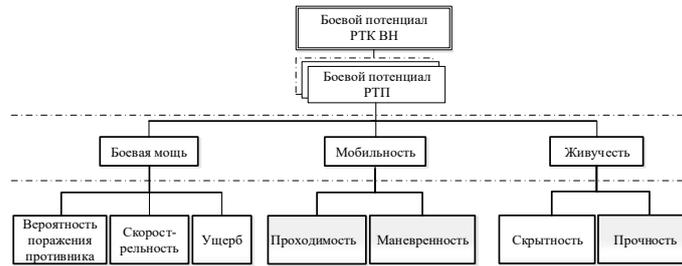


Рис. 2. Структура системы показателей боевой эффективности применения РТК ВВ, предназначенного для решения огневых задач

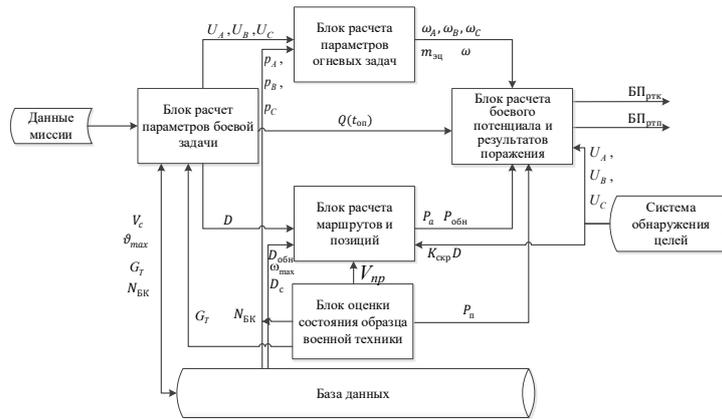


Рис. 3. Структура программного обеспечения для оценки боевой эффективности группового применения РТК ВВ

Блок расчета параметров боевой задачи предназначен для формирования частных показателей боевых свойств РТП на основании, полученных от высших звеньев управления (ВЗУ) данных об операции.

Данные об операции должны быть максимально актуальными и исчерпывающими.

Основные данные об операции, необходимые для формирования частных показателей:

- ◆ характеристики боевой задачи (уничтожение, подавление и др.);
- ◆ разведывательные данные о противнике (местоположение, вооружение и военная техника, характер действий (оборона, нападение и т.д.);
- ◆ метеобстановка на период проведения операции и др. данные.

Исходные данные хранятся в базе данных, а также определяется блоком оценки состояния РТП через показатели основных узлов и агрегатов:

- ◆ величина боекомплекта – $N_{БК}$;
- ◆ запас хода – G_T ;
- ◆ максимальная скорость РТП – v_{max} ;
- ◆ средний темп стрельбы – V_c .

В данном блоке рассчитываются следующие частные показатели:

- ◆ продолжительность цикла применения РТП - $t_{цик}$;
- ◆ оперативно-тактические нормы минимального времени небоеспособности объектов при поражении их по типу A, B, C - t_A, t_B, t_C , (A – небоеспособность объекта не менее семи суток; B – небоеспособность не менее одних суток; C – небоеспособность не менее трех часов);

- ◆ величины U_A, U_B, U_C характеризуют долю пораженных элементарных целей только по типу A, B, C , где под элементарной целью понимается отдельный объект;
- ◆ выполняющий определенные функции и неделимый на составные части;
- ◆ каждая из которых могла бы действовать самостоятельно;
- ◆ степень ущерба элементарной цели противника – $Q(t_{оп})$.

Блок расчета параметров огневых задач предназначен для расчета частных показателей, необходимых для огневого поражения противника.

Частные показатели, рассчитываемые в блоке расчета огневых задач:

- ◆ среднее число средств поражения (СП), необходимых для поражения целей по типам A, B, C – $\omega_A, \omega_B, \omega_C$;
- ◆ средний расход СП для поражения целей с заданной структурой ущерба – ω ;
- ◆ число элементарных целей, которые могут быть поражены – $m_{эц}$.

Исходными данными для расчета огневых задач являются:

- ◆ боекомплект – $N_{БК}$;
- ◆ p_A, p_B, p_C – вероятность поражения типовой цели одним СП только по типу A , по типу B , по типу C ;
- ◆ величины U_A, U_B, U_C – характеризуют долю пораженных элементарных целей только по типу A, B, C .

Блок расчета маршрутов и позиций предназначен для расчета частных показателей мобильности, необходимых для оптимального выбора маршрутов и выбора позиций РТП в целях создания благоприятных условий для ведения стрельбы, создания эффекта внезапности и сохранения живучести РТП на необходимом уровне.

В данном блоке рассчитываются следующие частные показатели:

- ◆ оптимальные маршруты;
- ◆ оптимальные позиции;
- ◆ маршруты и позиции отхода при существенном снижении боевого потенциала РТП;
- ◆ вероятность выхода в атаку – P_a ;
- ◆ вероятность обнаружения объекта поражения – $P_{обн}$.

Исходные данные:

- ◆ данные навигационных систем РТП и системы обнаружения целей;
- ◆ коэффициент скрытности объекта (цели) $K_{скр}$;
- ◆ дальность до объекта – D ;
- ◆ средняя дальность обнаружения – $D_{обн}$;
- ◆ ω_{max} – максимальная угловая скорость разворота при прицеливании;
- ◆ $V_{пр}$ – линейная скорость движения носителя ВВСТ при прицеливании;
- ◆ дальность стрельбы – D_c .

Блок оценки состояния образца военной техники предназначен для отслеживания параметров работоспособности основных узлов, а также контроля расхода боекомплекта и топлива, в целях поддержания живучести на необходимом уровне.

В данном блоке рассчитываются следующие частные показатели:

- ◆ вероятность поражения образца ВВСТ противником – P_n ;
- ◆ интенсивность воздействия противника – λ ;
- ◆ показатель живучести – ρ .

Исходными данными для расчета являются:

- ◆ количество неизрасходованных боеприпасов (боекомплект) – $N_{БК}$;
- ◆ остаток запаса хода – G_T ;
- ◆ показатели функционирования основных узлов и агрегатов;
- ◆ показатели динамической защиты, а также активных средств защиты РТП.

Блок расчета боевого потенциала и результатов поражения предназначен для расчета боевого потенциала до операции, а также отслеживания его изменений в ходе нее в зависимости от характеристик окружающей среды, данных о состоянии РТП и оценки результатов поражения противника.

В данном блоке рассчитываются следующие частные показатели:

◆ боевой потенциал РТП – $BP_{\text{РТП}}$;

◆ боевой потенциал РТК – $BP_{\text{РТК}}$.

Исходные данные для расчета:

◆ вероятность выхода в атаку – P_a ;

◆ вероятность обнаружения объекта поражения – $P_{\text{обн}}$;

◆ степень ущерба элементарной цели противника – $Q(t_{\text{оп}})$;

◆ среднее число средств поражения (СП), необходимых для поражения целей по типам А, В, С – $\omega_A, \omega_B, \omega_C$;

◆ вероятность поражения образца ВВСТ противником – $P_{\text{п}}$;

◆ средний расход СП для поражения целей с заданной структурой ущерба – ω ;

◆ число элементарных целей, которые могут быть поражены – $m_{\text{эц}}$;

◆ величины U_A, U_B, U_C – характеризуют долю пораженных элементарных целей только по типу А, В, С.

Модуль оценки боевых потенциалов может быть реализован в следующих системах:

◆ в автономных РТК ВН – для расчета и оценки своих боевых возможностей и противника для последующего моделирования боевых действий;

◆ в системах поддержки принятия решений должностными лицами – для расчета и оценки боевых потенциалов различных группировок войск с учетом их технической оснащенности при моделировании боевых действий.

Данный модуль предусматривает изменение состояния воздействий на РТП, окружающей среды и характеристик РТП, что позволяет отслеживать изменения своего боевого потенциала в целях сохранения живучести и дальнейшей оценки вероятности выполнения боевых задач операции.

В определении боевого потенциала содержатся несколько ключевых признаков, которые требуют дополнительного пояснения:

◆ функциональное предназначение образца;

◆ объем боевых задач;

◆ заданные (расчетные) условия применения;

◆ время существования РТП.

Таким образом, для эффективной оценки БП РТП необходимо задавать типовые боевые задачи по предназначению, выражаемые через количественные характеристики и максимальное время его функционирования. Моделирование процесса боевого применения является ведущим методологическим принципом оценки боевого потенциала РТК, не требующим в процессе привлечения экспертов.

На основании вышеизложенного разработано программное обеспечение для оценки боевой эффективности группового применения РТК ВН. Рассмотрим основные принципы его реализации.

В рамках теории боевой эффективности оценка результатов боевого применения базируется на следующих критериях:

◆ вероятность успешного выполнения боевой задачи;

◆ математическое ожидание количества пораженных одиночных целей;

◆ средний ущерб, нанесенный групповым целям.

Затраты на выполнение задач измеряются через:

◆ количество использованных боеприпасов;

◆ количество выполненных самолетовылетов;

◆ запасы горюче-смазочных материалов и другие параметры.

Таким образом, боевой потенциал робототехнического комплекса можно оценить через средний ущерб, причиненный врагу за время его функционирования, до момента поражения.

Процесс боевого применения РТК включает последовательные этапы:

1. Перемещение из исходной позиции в район боевых действий.
2. Обнаружение цели.
3. Занятие позиции для нанесения удара.
4. Нанесение удара по целям противника (стрельба, бомбометание, запуск ракет).
5. Восполнение боекомплекта, топлива и других ресурсов.

Далее этот цикл повторяется либо до момента окончания операции $t_{оп}$, либо до момента поражения РТК противником. Средняя продолжительность цикла боевого применения $t_{цикл}$ определяется величиной располагаемых штатных боевых ресурсов – запаса ГСМ и величины боекомплекта СП.

Необходимо отметить, что разработанный алгоритм является полностью аналитическим, поэтому, если в течение боевой операции, после каждого цикла применения ведется учет расходуемых средств, то появляется возможность периодической оперативной оценки изменения боевых возможностей РТК по мере протекания операции. Это позволяет определить момент времени, когда РТК снижают свою эффективность, и его дальнейшее использование в данной операции становится не целесообразным.

Рассматриваемый алгоритм включает следующие шаги:

1. Продолжительность цикла использования РТК

$$t_{цикл} = \min \left\{ \frac{G_{ВВСТ}}{V_{ВВСТ} \div 60}, \frac{N_{БК}}{v_c} \right\} / 60,$$

где $G_{ВВСТ}$ – запас хода, км; $V_{ВВСТ}$ – максимальная скорость ВВСТ, км/ч; $N_{БК}$ – величина боекомплекта (средств поражения СП), ед; v_c – среднее число выстрелов в минуту.

2. Вероятность поражения РТК противником

$$P_{П} = 1 - e^{-\lambda \rho t_{цикл}},$$

где λ – интенсивность воздействия противника; ρ – показатель живучести.

Формула корректна для использования в контексте, где $P_{П}$ оценивает вероятность того, что цель будет поражена или выведена из строя за время $t_{цикл}$ при заданных интенсивности (λ) и живучести (ρ). Это типичный пример использования в теории надежности, где через экспоненциальную функцию описывается вероятность выживания или поражения объекта в зависимости от внешних факторов и характеристик самого объекта.

3. Степень ущерба элементарной цели противника (вероятность небоеспособного состояния пораженных образцом ВВСТ целей за время боя):

$$Q(t_{оп}) = Q_A(t_{оп})U_A + Q_B(t_{оп})U_B + Q_C(t_{оп})U_C.$$

где

$$Q_A(t_{оп}) = \min \left\{ \frac{t_A}{t_{оп}}, 1 \right\}, Q_B(t_{оп}) = \min \left\{ \frac{t_B}{t_{оп}}, 1 \right\}, Q_C(t_{оп}) = \min \left\{ \frac{t_C}{t_{оп}}, 1 \right\},$$

где $t_{оп}$ – продолжительность операции в часах; t_A, t_B, t_C – оперативно-тактические нормы минимального времени небоеспособности объектов при поражении их по типу A, B, C . Величины U_A, U_B, U_C – характеризуют долю пораженных элементарных целей только по типу A, B, C . Их значения определяются условиями боевой задачи.

Формула выражает общую эффективность поражения вражеских целей в течение операции, учитывая разные типы целей и их вклад в общую картину боевых действий. Она позволяет оценить, какая часть целей будет небоеспособна после определенного периода времени, исходя из предположения о поражении и воздействии на разные типы объектов.

Сумма $Q(t_{оп})$ не может быть больше единицы, поскольку каждый компонент $Q_A(t_{оп}), Q_B(t_{оп}), Q_C(t_{оп})$ ограничен значением 1 (что соответствует 100% вероятности небоеспособности), а U_A, U_B, U_C представляют доли, сумма которых также не может превышать 100%. Таким образом, формула рассчитывает общую долю пораженных целей в пределах от 0 до 1, где 1 соответствует полной небоеспособности всех рассматриваемых целей.

4. Среднее число средств поражения (СП), необходимых для поражения целей по типам A, B, C :

$$\omega_A = \frac{1}{p_A}; \quad \omega_B = \frac{1}{p_B}; \quad \omega_C = \frac{1}{p_C},$$

где p_A, p_B, p_C – вероятность поражения типовой цели одним СП только по типу A , по типу B , по типу C .

Вышеуказанные формулы прямо связаны с геометрическим распределением, показывая, что среднее число СП, необходимых для поражения цели, обратно пропорционально вероятности поражения цели одним таким средством. Это представляет собой классическое применение геометрического распределения в анализе вероятности и математическом ожидании количества попыток до достижения первого успеха.

5. Средний расход СП для поражения целей с заданной структурой ущерба:

$$\omega = \omega_A U_A + \omega_B U_B + \omega_C U_C.$$

При этом сумма $U_A + U_B + U_C$ представляет собой общую долю или процент всех целей, распределенных по типам A, B , и C в рамках заданной структуры ущерба. Поскольку каждый коэффициент U отражает долю целей определенного типа в общей массе рассматриваемых целей, их сумма должна равняться 1 (или 100%, если выражать в процентах). Это предполагает, что все цели полностью охвачены этими тремя категориями. Таким образом, $U_A + U_B + U_C = 1$ означает, что вся структура ущерба полностью описывается через эти три категории целей, и других категорий целей нет.

6. Вероятность обнаружения объекта поражения:

$$P_{обн}(D) = \begin{cases} k_{скр} e^{-\left(\frac{D}{\bar{D}_{обн}}\right)^\beta}, \\ 0, & D > \bar{D}_{обн}, \end{cases}$$

где $k_{скр}$ – коэффициент скрытности объекта (цели), ($0 \leq k_{скр} \leq 1$); D – дальность до объекта (цели), км; $\bar{D}_{обн}$ – средняя дальность действия средств обнаружения, км; тип цели: $\beta = 1$ – визуально обнаруживаемая; $\beta = 1,5$ – тепловизионная; $\beta = 2$ – радиоизлучающая; $\beta = 4$ – радиоотражающая; $\beta = 6$ – ультразвукоизлучающая; $\beta = 8$ – ультразвукоотражающая.

7. Вероятность выхода в атаку (зависит от распределения углов визирования на полуплоскости $(-\pi/2, \pi/2)$) определяется по формулам:

$$P_a = \begin{cases} 0, & P_{обн} \leq 0,8, \\ P_{расч}, & P_{обн} > 0,8, \end{cases}$$

$$P_{расч} = \frac{2\phi_{пр}}{\pi} \text{ – равномерное, } P_{расч} = \sin(\phi_{пр}) \text{ – по «синусу»},$$

$$P_{расч} = \frac{4\phi_{пр}}{\pi} \left(1 - \frac{\phi_{пр}}{\pi}\right) \text{ – треугольное,}$$

где $P_{расч}$ – расчетная вероятность выхода в атаку, которая может быть определена разными способами (равномерно, по "синусу", треугольное распределение) в зависимости от задачи, $\phi_{пр}$ – предельный угол визирования цели.

$$\phi_{пр} = \begin{cases} \text{неопределяется,} & D > D_c \\ \arcsin\left(\min\left\{\frac{\omega_{max}}{2V_{пр} + \omega_{cmax}}; 1\right\}\right), & D \leq D_c \end{cases}$$

Здесь ω_{max} – максимальная угловая скорость разворота при прицеливании, $V_{пр}$ – линейная скорость движения носителя ВВСТ при прицеливании.

Вышеуказанные формулы позволяют оценить вероятность выхода в атаку на основе геометрических и физических параметров взаимодействия носителя ВВСТ и цели, учитывая углы визирования и скоростные характеристики, а также обеспечивая гибкость в оценке возможностей атаки в различных условиях.

8. Вероятность поражения цели за время операции:

$$W_{ВВСТ}(D_c) = P_{обн}(D)P_a Q(t_{оп}).$$

Данная формула выражает вероятность поражения цели как произведение трех основных факторов:

1. Вероятность обнаружения ($P_{обн}(D)$): это первоначальное условие для любой операции поражения. Цель должна быть сначала обнаружена, прежде чем можно будет организовать атаку. Вероятность обнаружения зависит от многих факторов, включая дальность, тип средств обнаружения и условия окружающей среды.

2. Вероятность выхода в атаку (P_a): даже если цель обнаружена, не всегда возможно или целесообразно осуществить атаку. Эта вероятность может зависеть от тактической ситуации, правил военных действий, распределения углов визирования и других оперативных соображений.

3. Вероятность небоеспособного состояния целей ($Q(t_{оп})$): определяет, какая часть пораженных целей станет небоеспособной за время операции. Этот параметр учитывает эффективность вооружения, тактику поражения и живучесть целей.

9. Среднее число циклов применения РТП за время операции:

$$m_{цикл} = \begin{cases} N_{БК}, & m_{расч} \geq N_{БК}, \\ m_{расч}, & m_{расч} < N_{БК}, \end{cases}$$

где $N_{БК}$ – штатный боекомплект СП,

$$m_{расч} = \frac{(1-P_{П})}{P_{П}} \left[1 - (1 - P_{П})^{\frac{t_{оп}}{t_{ц}}} \right],$$

где $P_{П}$ – вероятность поражения противника.

Данная формула предназначена для расчета ожидаемого количества попыток (или циклов), которые потребуются для успешного поражения целей с учетом заданной вероятности успеха за один цикл. При этом в контексте вероятности, если у нас есть событие, вероятность успеха которого составляет $P_{П}$, то среднее ожидаемое количество попыток для достижения одного успеха можно рассчитать, как обратное значение этой вероятности, т.е. $1/P_{П}$. Это основное правило вероятности, применимое во многих сферах, от теории игр до статистического анализа. В данном случае формула расширяется за счет учета не просто одного успеха, но и ожидаемого количества успехов (или поражений цели) за определенный период времени, с учетом общей продолжительности операции и длительности одного цикла. Фактор $\left[1 - (1 - P_{П})^{\frac{t_{оп}}{t_{ц}}} \right]$ учитывает накопительный эффект вероятности поражения за множество циклов, предоставляя более точную оценку для длительных операций.

10. Число элементарных целей, которые могут быть поражены с заданной структурой ущерба при выполнении одной и той же боевой задачи:

$$m_{эц} = \frac{N_{БК}}{\omega}.$$

11. Боевая мощь РТП:

$$БМ_j = W_{ВВСТ}(D)m_{цикл j}.$$

12. Показатель подвижности РТП.

Показатель подвижности характеризует динамические возможности РТП в зависимости от массы РТП и мощности двигателя [9]:

$$R_{\Pi} = \frac{N_{уд}}{(V_{max}^{ш} + V_{max}^{\Gamma})},$$

где $V_{max}^{ш}$ – максимальная скорость на шоссе, км/ч; V_{max}^{Γ} – максимальная скорость на грунте, км/ч; $N_{уд}$ – удельная мощность двигателя, л.с/т.

13. Показатель живучести РТП.

Показатель живучести образца военной техники может быть вычислен в соответствии с выражением [20]:

$$R_{ж} = P_{обн_{\Pi}} R_{бз},$$

где $P_{обн_{\Pi}}$ – вероятность обнаружения РТП противником, $R_{бз}$ – показатель бронезащиты.

$$P_{обн}(D) = k_{скр} \begin{cases} 0, & D > \bar{D}_{обн} \\ e^{-\left(\frac{D}{\bar{D}_{обн}}\right)^{\beta}}, & \end{cases},$$

где $k_{скр}$ – коэффициент скрытности РТП, ($0 \leq k_{скр} \leq 1$); D – дальность до объекта (цели), км; $\bar{D}_{обн}$ – средняя дальность действия средств обнаружения противника, км; тип цели: $\beta = 1$ – визуально обнаруживаемая; $\beta = 1,5$ – тепловизионная; $\beta = 2$ – радиоизлучающая; $\beta = 4$ – радиоотражающая; $\beta = 6$ – ультразвукоизлучающая; $\beta = 8$ – ультразвукоотражающая.

Показатель бронезащиты может быть вычислен в соответствии с выражением [20]

$$R_{бз} = \frac{b^{0,4}}{d^{0,5}},$$

где b – толщина брони, мм; d – калибр пушки (снаряда) противника, мм.

14. Боевая эффективность РТК:

$$БП = K_{ком} \sum_{j=1}^l (\gamma_1 B M_j + \gamma_2 R_{nj} + \gamma_3 R_{жj}).$$

где l – число типов РТП; $K_{ком}$ – коэффициент, обусловленный совместным использованием РТП комплекса, $K_{ком} > 1$ [6, 7]; γ_i – весовые коэффициенты ($\sum_{i=1}^3 \gamma_i = 1$).

Формула боевой эффективности РТК учитывает комплексное взаимодействие различных аспектов вооружений и их характеристик, а введение весовых коэффициентов и коэффициента синергии позволяет количественно оценить совместный эффект их применения. Весовые коэффициенты позволяют сбалансировать вклад различных факторов в общий боевой потенциал, делая формулу гибкой и адаптивной к различным условиям и задачам.

Реализация данного алгоритма в среде MATLAB показала достоверные результаты оценки боевых возможностей различных РТК наземного базирования, предназначенных для решения разведывательных и огневых задач. Используя данный алгоритм возможно решать задачи целераспределения в системе группового управления робототехническими комплексами.

Выводы. Предложенный научный подход оценки боевой эффективности группового применения робототехнического комплекса военного назначения, является гибким инструментом, способным дополнить модели боевых действий разнородных группировок войск различного масштаба.

Главной особенностью является исключение экспертов из процесса расчётов, что позволяет заложить его основы в алгоритмах автономного управления РТК ВН.

В рамках данной работы ведется разработка программного обеспечения в среде моделирования MatLab, на основе изложенной выше методики оценки боевого потенциала, позволяющего при небольшом объеме исходных данных о ТТХ РТК ВН, противнике и сценарии выполнения боевых задач, оценить боевой потенциал как отдельной РТП, так и РТК ВН в целом.

Также с использованием данной методики возможно отследить изменение боевого потенциала РТК ВН в ходе проведения операции при изменении частных показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шойгу С.К. Новые аспекты военно-технической политики РФ в современных условиях // Сб. "Федеральный справочник. Оборонно-промышленный комплекс России". – 2014. – № 10. – С. 99-103.
2. Мосиенко С.А., Лохтин В.И. Концепция построения наземного робототехнического ударного комплекса. – М.: «САМПОЛИГРАФИСТ», 2014. – 122 с.
3. Halem H. Ukraine's lessons for future combat: unmanned aerial systems and deep strike // The US Army War College Quarterly: Parameters. – 2023. – No. 53 (4). – P. 19-32.
4. Ермолов И.Л., Хрипунов С.П. Проблемы группового применения робототехнических комплексов и пути их решения // Экстремальная робототехника. – 2018. – Т. 1, № 1. – С. 279-285.
5. Буравлев А.И., Цырендоржиев С.Р., Брезгин В.С. Основы методологического подхода к оценке боевых потенциалов образцов ВВСТ и воинских формирований // Вооружение и экономика. – 2009. – № 3 (7). – С. 4-12.
6. Han S. Analysis of Relative Combat Power with Expert System // Journal of Digital Convergence. – 2016. – No. 14. – P. 143-150.
7. Wang P., Zhou Y., Wang J., Zhu C., Chen C., & Zhang W. A framework for key element evaluation of combat system // 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – 2017. – P. 3101-3106.
8. Евланов Л.Г., Кутузов В.А. Экспертные оценки в управлении: – М.: Экономика, 1978. – 133 с.
9. Саати Т. Аналитическое планирование. – М.: Радио и связь, 1991. – 223 с.
10. Naryshkin V.G. Indicators of the combat potential of military units // Military Thought. – 2009. – Vol. 18, No. 1. – P. 113-119.
11. Naryshkin V.G. Methodological bases for assessing and calculating the indicators of combat worthiness for subunits and units // Military Thought. – Jan.-Mar. 2009. – Vol. 18, No. 1. – P. 120-134.
12. Rao D., Mehra P.K. A methodology to evaluate combat potential and military force effectiveness for decision support // Journal of Battlefield Technology. – 2016. – No. 16(1). – P. 27-34.
13. Raymond, A.D. Assessing Combat Power: A Methodology for Tactical Battle Staffs. Свободный режим доступа: – <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA259261> (дата обращения: 20.02.2023).
14. Zanella J.A. Combat Power Analysis is Combat Power Density. – Свободный режим доступа: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a566701.pdf> (дата обращения: 20.02.2023).
15. Reach C., Kilambi V., Cozad M. Russian Assessments and Applications of the Correlation of Forces and Means, RAND Corporation, RR-4235-OSD, 2020. – Свободный режим доступа: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR4235.html (дата обращения 20.02.2023).
16. Zaitsev Col. A.S., Col. V.I., Grebenyuk. Determining rational composition of missile forces and artillery weapons in an operation (combat) // Military Thought. – 12, 2003. – No. 1. – P. 141-149.
17. Цыгичко В.И., Стокли Ф. Метод боевых потенциалов: история и настоящее // Военная мысль. – 1997. – № 4. – С. 23-28.
18. Бонин Л.С. Боевые свойства и эффективность вооружения и военной техники // Военная мысль. – 2005. – № 1. – С. 65-68.
19. Томашев В.Н. О совершенствовании методов оценки боевых возможностей войск // Наука и военная безопасность. – 2006. – № 2. – С. 18-22.
20. Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М. Концептуальное проектирование объектов бронетанковой техники: монография. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 196 с.

REFERENCES

1. Shoygu S.K. Novye aspekty voenno-tekhnicheskoy politiki RF v sovremennykh usloviyakh [New aspects of russian military technical policy in modern conditions], Sb. "Federal'nyy spravochnik. Oboronno-promyshlennyy kompleks Rossii" [Collection "Federal directory. Defense and industrial complex of Russia"], 2014, No. 10, pp. 99-103.
2. Mosienko S.A., Lokhtin V.I. Kontseptsiya postroeniya nazemnogo robototekhnicheskogo udarnogo kompleksa [Concept of constructing a ground robotic strike complex]. Moscow: «SAMPOLIGRAFIST», 2014, 122 p.
3. Halem H. Ukraine's lessons for future combat: unmanned aerial systems and deep strike, *The US Army War College Quarterly: Parameters*, 2023, No. 53 (4), pp. 19-32.
4. Ermolov I.L., Khripunov S.P. Problemy gruppovogo primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov i puti ikh resheniya [Problemy grupovogo primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov i puti ikh resheniya], *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme robotics], 2018, Vol. 1, No. 1, pp. 279-285.

5. *Buravlev A.I., TSyrendorzhiev S.R., Brezgin V.S.* Osnovy metodologicheskogo podkhoda k otsenke boevykh potentsialov obraztsov VVST i voinskikh formirovaniy [Fundamentals of methodological approach to the assessment of combat potentials of samples of military equipment and troops formations], *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economy], 2009, No. 3 (7), pp. 4-12.
6. *Han S.* Analysis of Relative Combat Power with Expert System, *Journal of Digital Convergence*, 2016, No. 14, pp. 143-150.
7. *Wang P., Zhou Y., Wang J., Zhu C., Chen C., & Zhang W.* A framework for key element evaluation of combat system, 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2017, pp. 3101-3106.
8. *Evlanov L.G., Kutuzov V.A.* Ekspertnye otsenki v upravlenii [Expert estimates in management]. Moscow: Ekonomika, 1978, 133 p.
9. *Saati T.* Analiticheskoe planirovanie [Analytical planning]. Moscow: Radio i svyaz', 1991, 223 p.
10. *Naryshkin V.G.* Indicators of the combat potential of military units, *Military Thought*, 2009, Vol. 18, No. 1, pp. 113-119.
11. *Naryshkin V.G.* Methodological bases for assessing and calculating the indicators of combat worthiness for subunits and units, *Military Thought*, Jan.-Mar. 2009, Vol. 18, No. 1, pp. 120-134.
12. *Rao D., Mehra P.K.* A methodology to evaluate combat potential and military force effectiveness for decision support, *Journal of Battlefield Technology*, 2016, No. 16 (1), pp. 27-34.
13. *Raymond, A.D.* Assessing Combat Power: A Methodology for Tactical Battle Staffs. Available at: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA259261> (accessed 20 February 2023).
14. *Zanella J.A.* Combat Power Analysis is Combat Power Density. Available at: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a566701.pdf> (accessed 20 February 2023).
15. *Reach C., Kilambi V., Cozad M.* Russian Assessments and Applications of the Correlation of Forces and Means, RAND Corporation, RR-4235-OSD, 2020. Available at: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR4235.html (accessed 20 February 2023).
16. *Zaitsev Col. A.S., Col. V.I., Grebenyuk.* Determining rational composition of missile forces and artillery weapons in an operation (combat), *Military Thought*, 12, 2003, No. 1, pp. 141-149.
17. *Tsygichko V.I., Stokli F.* Metod boevykh potentsialov: istoriya i nastoyashchee [Method of combat potentials: history and present], *Voennaya mysl'* [Military thought], 1997, No. 4, pp. 23-28.
18. *Bonin L.S.* Boevye svoystva i effektivnost' vooruzheniya i voennoy tekhniki [Combat properties and effectiveness of weapons and military equipment], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2005, No. 1, pp. 65-68.
19. *Tomashev V.N.* O sovershenstvovanii metodov otsenki boevykh vozmozhnostey voysk [On improving the methods of evaluating the combat capabilities of troops], *Nauka i voennaya bezopasnost'* [Science and military security], 2006, No. 2, pp. 18-22.
20. *Anipko O.B., Borisyuk M.D., Busyak Yu.M.* Kontseptual'noe proektirovanie ob'ektov bronetankovoy tekhniki: monografiya [Conceptual design of armored vehicles]. Khar'kov: NTU «KHPi», 2008, 196 p.

Статью рекомендовал к опубликования к.т.н. А.Е. Титов.

Гонтарь Дмитрий Николаевич – Военный учебный центр при Южном федеральном университете; e-mail dgontar@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79896340449; старший преподаватель; м.н.с.

Джаныбеков Руслан Юсуфович – e-mail dzhanybekov@sfedu.ru; тел.: +79185845504; начальник цикла; старший преподаватель.

Палеев Александр Викторович – e-mail apaleev@sfedu.ru; тел.: +78634680890, доб. 15408; к.э.н; начальник центра.

Семак Виталий Викторович – e-mail semak@sfedu.ru; тел.: +78634680890, доб. 15414; начальник кафедры радиоэлектронной борьбы.

Соловьев Виктор Владимирович – Научная лаборатория "Научно-технологическая лаборатория "Проектирования бортовых систем робототехнических комплексов"" Южного федерального университета; e-mail vsolovev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043438844; с.н.с.

Gontar Dmitry Nikolaevich – Military training center at Southern federal university; e-mail: dgontar@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79896340449; senior lecturer; junior researcher.

Dzhanybekov Ruslan Yusufovich – e-mail: dzhanybekov@sfedu.ru; phone: +79185845504; head of the course; senior lecturer.

Paleev Alexander Viktorovich – e-mail: apaleev@sfnedu.ru; phone: +78634680890, ext. 15408; can. of ec. sc.; head of the center.

Semak Vitaly Viktorovich – e-mail: semak@sfnedu.ru; phone: +78634680890, ext. 15414; head of the department of electronic warfare.

Solovyev Viktor Vladimirovich – Scientific laboratory "Scientific and Technological Laboratory of Designing Onboard Systems for Robotic Complexes" at Southern federal university; e-mail: vvsolovev@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043438844; senior researcher.

УДК 007:52

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-57-68

Б.С. Лапин, И.Л. Ермолов, О.П. Гойдин, С.А. Собольников

ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ОПОРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ

Целью исследования является формирование геометрической модели среды, содержащей информацию о параметрах подстилающей поверхности для использования в системе планирования движений группы роботов строем на высокой скорости. В статье исследована задача построения карты опорных поверхностей. Приведен анализ существующих исследований по теме определения характеристик опорных поверхностей мобильными роботами. Приведена классификация способов оценки характеристик опорной поверхности на дистанционные и контактные. На основе анализа преимуществ и недостатков известных дистанционных и контактных методов в работе предлагается комбинированный подход, позволяющий использовать преимущества обоих методов. Подход основан на дистанционном разделении пространства на кластеры по внешним параметрам подстилающей поверхности с потенциально одинаковыми внутренними свойствами, одновременном определении внутренних параметров подстилающей поверхности контактным методом и дальнейшем их объединении. При этом осуществляется постоянное уточнение параметров поверхности во время перемещения. Подход использует ограниченный перечень стандартных бортовых средств мобильного робота и не требует больших вычислительных затрат по сравнению с методами машинного обучения. Приводится описание дистанционного определения внешних параметров подстилающей поверхности, в основе которых лежат алгоритмы сегментации облака точек, не требующие предварительного обучения. В качестве аргументов для сегментации используются: координаты точек облака, цвет каждой точки и перепад высот в окрестности каждой точки. Описан алгоритм определения внутренних характеристик поверхности контактным способом. В качестве внутренних параметров рассматриваются коэффициенты трения между каждым колесом и текущей поверхностью. Эти коэффициенты позволяют определить предельные ускорения для каждого робота группы, которые необходимы для реализации системы планирования движений. В работе приводятся результаты экспериментальных исследований дистанционного определения параметров подстилающей поверхности в рамках предложенного подхода на данных из публичного набора KITTI. Результаты исследования подтверждают возможность формирования геометрической модели среды, сегментированной на области с различными характеристиками опорной поверхности без обучения с использованием стандартных аппаратных возможностей робота.

Картографирование; система технического зрения; опорная проходимость; планирование движения; кластеризация.

B.S. Lapin, I.L. Ermolov, O.P. Goydin, S.A. Sobolnikov

BUILDING A MAP OF REFERENCE SURFACES TO SOLVE THE PROBLEM OF PLANNING THE MOVEMENT OF A GROUP OF GROUND ROBOTS

The purpose of the study is to form a geometric model of the environment containing information about the parameters of the underlying surface for use in a system for planning the movements of a group of robots in formation at high speed. The article examines the problem of con-

structuring a map of support surfaces. An analysis of existing research on the topic of determining the characteristics of supporting surfaces by mobile robots is presented. A classification of methods for assessing the characteristics of a supporting surface into remote and contact ones is given. Based on an analysis of the advantages and disadvantages of known remote and contact methods, the work proposes a combined approach that makes it possible to use the advantages of both methods. The approach is based on remote division of space into clusters according to the external parameters of the underlying surface with potentially identical internal properties, simultaneous determination of the internal parameters of the underlying surface by the contact method and their further combination. In this case, the surface parameters are constantly updated during movement. The approach uses a limited list of standard on-board means of a mobile robot and does not require large computational costs compared to machine learning methods. A description is given of the remote determination of the external parameters of the underlying surface, which are based on point cloud segmentation algorithms that do not require preliminary training. The arguments for segmentation are: the coordinates of the cloud points, the color of each point, and the height difference in the vicinity of each point. An algorithm for determining the internal characteristics of a surface using the contact method is described. The friction coefficients between each wheel and the current surface are considered as internal parameters. These coefficients make it possible to determine the maximum accelerations for each robot in the group, which are necessary to implement the motion planning system. The paper presents the results of experimental studies of remote determination of the parameters of the underlying surface within the framework of the proposed approach using data from the public KITTI dataset. The results of the study confirm the possibility of forming a geometric model of the environment, segmented into areas with different characteristics of the supporting surface without training using standard hardware capabilities of the robot.

Mapping; vision system; motion planning; clustering; sensor fusion.

Введение. Обеспечение автономного движения мобильных роботов, в том числе в составе группы, на пересеченной местности является одной из важнейших задач в современной робототехнике [1]. Планирование движения автономных наземных мобильных роботов осложняется наличием высокой степени неопределенности, вносимой различием характеристик опорной поверхности. Степень неопределенности возрастает с увеличением разнообразия типов поверхности в зоне действия роботов. Эту неопределенность важно учитывать при планировании движения группы роботов строим особенно на высокой скорости, для чего необходимо определение параметров опорной поверхности во время перемещения.

Ранее авторами [2] рассматривалась задача планирования движения группы роботов строим с учетом различия параметров подстилающей поверхности на заранее сформированной карте. В настоящей статье приводится подход к построению геометрической модели среды (карты), содержащей характеристики различных типов опорных поверхностей, с помощью бортовых измерительных средств наземного мобильного робота.

В статье [2] предлагается решение задачи планирования траекторий перемещения строя роботов с минимизацией затраченного времени. Для этого необходима информация о максимально допустимых ускорениях, которые роботы могут развивать на траектории без проскальзывания. В свою очередь значения этих ускорений, зависят от параметров подстилающей поверхности. Поэтому для реализации предложенной системы планирования необходимо формировать карту, содержащую информацию о: типах подстилающей поверхности, границах областей соответствующих типов и максимально допустимых ускорениях. Однако в рамках изложенного подхода могут быть использованы и другие параметры.

При этом качество планирования траектории напрямую зависит от качества построения карты. Широкий круг задач, решаемый группой роботов, предполагает отсутствие априорной информации о зоне проведения работ. Поэтому задача построения модели должна решаться во время функционирования группы в темпе ее движения и по возможности штатными измерительными системами.

В настоящий момент широко применяются алгоритмы построения карты на основе данных дальномеров и/или камер глубины [3]. Такие алгоритмы позволяют оценивать геометрические параметры поверхностей, что позволяет решать задачу профильной проходимости. Этого недостаточно для полноценной навигации в естественной среде, которая изобилует различными неблагоприятными факторами: скользкой травой, лужами, снегом, льдом, слабонесущими грунтами др. Поэтому важной задачей является оценка параметров опорной проходимости [16].

Сложность идентификации характеристик опорной поверхности в первую очередь связана с разнородностью структур грунтовых оснований и ограниченностью средств, доступных к использованию на мобильных РТК.

Способы получения характеристик опорных поверхностей мобильным роботом можно разделить на два типа: дистанционный и контактный.

Дистанционный способ. В течение последних 20 лет проведено большое количество исследований по детектированию типов поверхностей [4–9] на основе данных видеокамер видимого диапазона, тепловизионных камер, лазерных дальномеров и гиперспектрометров [10–13]. Подробный анализ существующих методов в области классификации поверхностей движения по данным системы технического зрения (СТЗ) представлен в работе [14].

Данные методы позволяют косвенно оценивать характеристики поверхности на расстоянии (по внешнему виду или излучению). Большинство таких методов основаны на машинном обучении (ML). Необходимость в обучении является существенным недостатком т.к. требует формирования обширных обучающих выборок. При этом открытые наборы данных, содержащие одновременно информацию о внешнем виде поверхности и ее механические характеристики, авторам неизвестны. Еще одним фактором, осложняющим решение задачи с использованием обучения, является зависимость характеристик поверхности от параметров окружающей среды (температуры, влажности, и т.д.), что необходимо учитывать при обучении.

В тоже время дистанционные методы хорошо зарекомендовали себя для решения задач сегментации или кластеризации геометрической модели среды, что позволяет разбивать область пространства на участки с потенциально одинаковыми свойствами поверхности.

Контактный способ. Существуют работы, посвященные решению обратной задачи термомеханики [15–25]. Эта задача заключается в поиске параметров соответствующей модели взаимодействия движитель-основание по анализу динамического взаимодействия движителя с опорным основанием. Методы, решающие эту задачу, позволяют напрямую оценивать характеристики поверхности, в основном не используют машинное обучение, однако требуют непосредственного взаимодействия движителя с опорной поверхностью. В зависимости от способа измерения характеристик опорного взаимодействия требуют либо установку дополнительных специализированных измерительных устройств, либо расчёт сложных математических моделей, либо и то и другое.

Основной недостаток контактных методов – необходимость взаимодействия с опорой для получения информации о ней, что делает невозможным априорное планирование перемещения по текущей поверхности с учетом ее характеристик. Это в свою очередь может приводить к потере управления.

В работе предлагается комбинированный подход, объединяющий преимущества дистанционного и контактного. Подход основан на дистанционном разделении пространства на кластеры по внешним параметрам поверхности с потенциально одинаковыми внутренними свойствами поверхности, одновременном определении внутренних параметров подстилающей поверхности контактным методом и дальнейшем их объединении. При этом осуществляется постоянное уточнение параметров поверхности во время перемещения.

Дистанционное определение внешних параметров подстилающей поверхности. В основе дистанционной части системы лежат алгоритмы сегментации, применяющих методы кластерного анализа, что не требует предварительного обучения.

СТЗ робота состоит из трехмерного сканирующего лазерного дальномера (лидара) и цифровой цветной камеры. Лидар формирует облако точек, характеризующих расстояния до объектов среды, расположенных в области сканирования $W = \{V'_i = \langle X_i, Y_i, Z_i \rangle\} (i = 1, 2, \dots, n)$. Облако точек с помощью алгоритма KD TREE [26] представляется в виде дерева для увеличения скорости работы алгоритма кластеризации и ускорения поиска соседних точек в облаке.

После этого необходимо из множества точек W выделить подмножество W_0 точек, которые принадлежат опорной поверхности. Эта задача решалась нахождением горизонтальной плоскости под роботом с помощью алгоритма RANSAC [27], однако могут быть использованы и другие известные алгоритмы [28–30].

Далее каждой точке из множества W_0 необходимо присвоить значение цвета, получаемое в этой точке с помощью видеокамеры. Зачастую каждый пиксель изображения камеры характеризуется тремя значениями в формате RGB. Взаимное расположение камеры и дальномера должно быть юстировано и определена матрица перехода из системы координат (СК) камеры в СК лидара. С использованием матрицы перехода осуществляется проецирование точек из W_0 на плоскость изображения камеры. После чего каждая точка из W_0 дополняется цветом из соответствующего пикселя на изображении $V'_i = \langle X_i, Y_i, Z_i, R_i, G_i, B_i \rangle (i = 1, 2, \dots, k)$.

Перед тем, как использовать цветовую информацию для кластеризации, необходимо преобразовать представление цвета из формата RGB в HSV. В работе [8] показано, что раздельное сравнение тонов H, яркостей V и насыщенностей S цветов поверхностей является более эффективным, чем сравнение яркостей красных R, зеленых G и синих B составляющих цвета. Преобразование из RGB в HSV осуществляется с помощью следующих выражений:

$$R' = \frac{R}{255}; G' = \frac{G}{255}; B' = \frac{B}{255};$$

$$C_{max} = \max(R', G', B'); C_{min} = \min(R', G', B'); \Delta = C_{max} - C_{min};$$

$$H = \begin{cases} 0^\circ, & \Delta = 0, \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{G' - B'}{\Delta} \bmod 6 \right), & C_{max} = R', \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{B' - R'}{\Delta} + 2 \right), & C_{max} = G', \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{R' - G'}{\Delta} + 4 \right), & C_{max} = B'; \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0, & C_{max} = 0, \\ \frac{\Delta}{C_{max}}, & C_{max} \neq 0; \end{cases}$$

$$V = C_{max},$$

После чего множество рассматриваемых точек примет вид $W_0 = \{V'_i = \langle X_i, Y_i, Z_i, H_i, S_i, V_i \rangle\} (i = 1, 2, \dots, k)$.

Полученное облако точек необходимо дополнить информацией о распределении высот. В качестве такой информации может быть использована дисперсия и/или амплитуда перепада высот (координаты Z) в окрестности каждой точки V'_i облака W_0 .

Несмещённая оценка дисперсии перепада высот в окрестности точки V'_i определяется:

$$D(V'_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=0}^m (Z_i - \bar{Z})^2,$$

где m – число ближайших соседей точки V'_i в заданной окрестности.

Амплитуда перепада высот определяется:

$$A(V'_i) = \max(Z_{0...m}) - \min(Z_{0...m}).$$

Выбор между дисперсией и амплитудой зависит в первую очередь от качества данных, получаемых с лазерного дальномера. В дальнейшем в векторе V'_i будем использовать амплитуду перепадов высот для упрощения расчетов. Таким образом каждая точка из облака W_0 описывается семью компонентами $V'_i = \langle X_i, Y_i, Z_i, H_i, S_i, V_i, A_i \rangle$ ($i = 1, 2, \dots, k$). При этом, для улучшения качества расчета необходимо использовать облака точек высокой плотности, которые можно получить с использованием современных лидаров с неподвижным основанием (solid-state lidar) [31]. Популярны многолучевые трехмерные лазерные дальномеры на вращающейся основе (например, Velodyne VLP-16) подходят меньше т.к. дают разреженное облако точек. Их применение требует совмещения нескольких последовательно снятых в движении сканов с целью увеличения плотности облака для последующего анализа.

На следующем этапе осуществляется кластеризация - разделение окружающей робот поверхности на «схожие» области (кластеры). Качество кластеризации зависит от выбора алгоритма кластеризации и критерия сравнения («схожести») областей. В качестве критерия используется функция расстояния в семимерном пространстве состояний (X, Y, Z, H, S, V, A) . Однако, в зависимости от структуры СТЗ, может быть использована и дополнительная информация, например температура (если установлена тепловизионная камера) и спектральная сигнатура поверхности (если установлена гиперспектральная камера) т.п.

В качестве функции расстояния используется евклидова метрика:

$$f(V'_i, V'_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^7 (V'_{il} - V'_{jl})^2},$$

где V'_{il} - l -ый компонент вектора V'_i .

Для кластеризации используется алгоритм DBSCAN [32], который позволяет автоматически определять количество кластеров и их центры, а также фильтровать выбросы. В результате кластеризации из множества W_0 выделяются семейство подмножеств $\{W_\alpha\}_{\alpha \in N+1}$, где N - количество кластеров, а W_{N+1} - подмножество выбросов. При этом $\bigcap_{\alpha \in N+1} W_\alpha = \emptyset$, а $\bigcup_{\alpha \in N+1} W_\alpha = W_0$.

Определение внутренних характеристик поверхности контактным способом. Предлагается использовать метод, описанный и проверенный ранее в работе авторов [33]. Этот метод достаточно прост в реализации и не требует использования дополнительного оборудования, однако позволяет оценивать вектор параметров подстилающей поверхности U .

В качестве внутренних параметров поверхности в настоящей работе рассматриваются коэффициенты трения μ_i для каждого i -ого колеса на текущей подстилающей поверхности. Эти коэффициенты позволяют определить предельные нормальное a_n и тангенциальное a_τ ускорения для каждого робота группы, которые необходимы для реализации системы планирования движений [2].

Однако могут применяться и другие параметры в зависимости от аппаратного обеспечения робота. Таким образом $U = \langle \mu_1, \mu_2 \dots \mu_p \rangle$.

Определение значения коэффициента трения скольжения μ_i для каждого колеса можно получить, измерив момент, возникающий в приводе колеса, во время появления проскальзывания с помощью следующего выражения:

$$\mu_i = \frac{F_{ci}}{N_i} = \frac{M_i}{r_{ki} \cdot \cos(\alpha_i) \cdot N_i},$$

где N_i – сила нормальной реакции опоры колеса, M_i – измеренное значение момента на i -ом колесе, r_{ki} – радиус колеса, α_i – угол между направлением результирующей силы F_{ci} и направлением измеренной ее составляющей.

Сила нормальной реакции опоры определяется с помощью датчика давления на опору колеса. В случае отсутствия такого датчика вводится допущение о равномерном распределении веса робота между колесами во время движения.

$$N_1 = N_2 = \dots = N_p = \frac{mg}{p},$$

где m – масса робота, p – количество колес.

Факт проскальзывания можно определять, как с помощью данных навигационной системы робота, так и на основе информации о измеренном с колес моменте сил (или силе тока) [34, 35].

Объединение данных, полученных дистанционным и контактным способом.

Для построения карты опорных поверхностей необходима информация из навигационной системы робота (его положение в системе координат, связанной с рабочей областью), семейство подмножеств точек $\{W_\alpha\}_{\alpha \in N}$ окружающего пространства с соответствующими внешними характеристиками поверхности и данные о внутренних характеристиках поверхности U , по которой в данный момент движется робот.

Внутренние характеристики U оцениваются контактным способом на поверхности, непосредственно находящейся под роботом в текущий момент времени. Эта оценка ассоциируется со всеми точками кластера $W_t = \{V'_i = \langle X_i, Y_i, Z_i, H_i, S_i, V_i, \mu_1, \mu_2 \dots \mu_p \rangle\}$, на котором находится робот. При движении по поверхности одного типа (в рамках одного кластера) будет произведено множество замеров внешних и внутренних характеристик. Это позволяет уточнять характеристики поверхности путем их усреднения.

В дальнейшем массив данных о внешних характеристиках поверхности и ассоциированный с ним массив внутренних характеристик могут быть использованы, для обучения ML-модели.

Предложенный подход реализован в виде программного обеспечения. Экспериментальные исследования контактного способа определения внутренних характеристик приведены в статье [33]. В следующем разделе приводятся результаты экспериментальных исследований дистанционной части.

Экспериментальные исследования. Для проверки описанного метода разделения областей по внешним характеристикам, необходимы данные СТЗ – облака точек и видеоизображение. В качестве набора данных использовалась стандартная база KITTI [36]. Эта база данных включает в себя, в том числе, информацию с двух цветных камер Point Grey Flea 2 и многолучевого лазерного дальномера Velodyne HDL64E, которые синхронизированы во времени. Измерительный стенд состоял из СТЗ, установленного на крышу легкового автомобиля (рис. 1).



Рис. 1. Измерительный стенд, используемый для записи набора данных KITTI

Данные из базы KITTI получены в городской среде (рис. 2). В область видимости лазерного дальномера и камеры попали следующие типы поверхностей: асфальт, трава, тротуарная плитка.

Результат предварительной обработки, а именно – наложение цветовой информации на облако точек с лазерного дальномера представлен на рис. 3, а итоговое выделение области геометрической проходимости, с помощью RANSAC представлен на рис. 4.

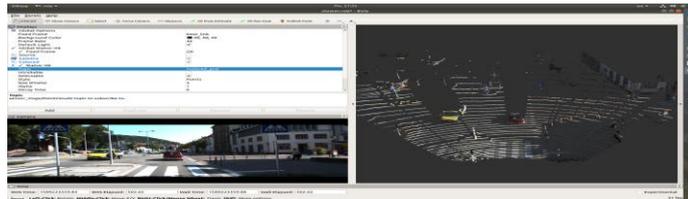


Рис. 2. Вид с камеры (база данных KITTI)

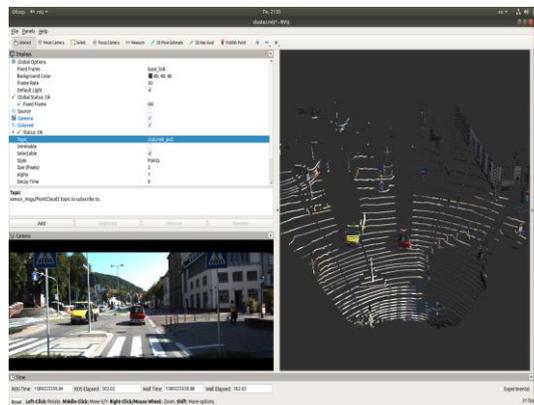


Рис. 3. Результат наложения цветовой информации на облако точек лазерного дальномера

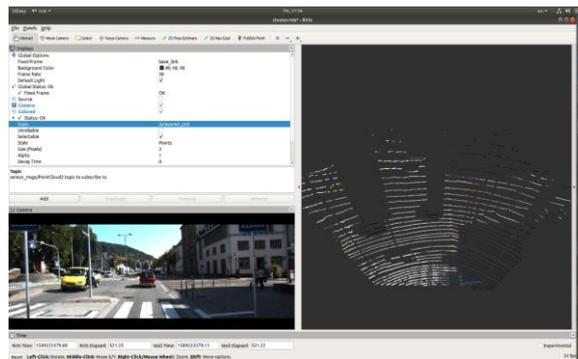


Рис. 4. Результат предварительной обработки данных с камеры и лазерного дальномера

Следующий этап заключался в определении границ поверхностей по внешним характеристикам. Для этого, для каждой точки отфильтрованного облака, были выбраны все соседи в радиусе 0.2 м. Облако точек предварительно представля-

лось в виде дерева, что позволило ускорить поиск соседних точек [26]. По полученным подмножествам точек осуществлялась оценка амплитуды перепада высот, данные значения ассоциировались с центральной для подмножества точкой и использовались в алгоритме кластеризации, при проведении эксперимента. Результат кластеризации представлен на рис. 5.

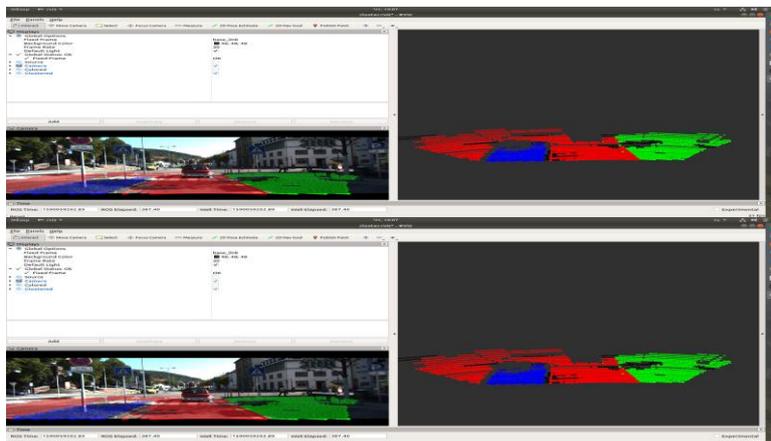


Рис. 1 Определение поверхностей по внешним характеристикам

В результате обработки изображений представленного набора алгоритм позволил выделить 3 кластера, соответствующих типам поверхностей с различными внешними характеристиками, что совпадает с наблюдаемым набором типов подстилающих поверхностей в реальной области.

Заключение. Предложенный в работе подход позволяет формировать геометрическую модель среды, сегментированную на области с различными характеристиками опорной поверхности без обучения с использованием стандартных аппаратных возможностей робота.

В настоящий момент экспериментально подтверждена работоспособность дистанционной и контактной частей системы картографирования по отдельности. В дальнейшем планируется формирование набора данных достаточного объема, включающего одновременно информацию для определения как внешних параметров опорной поверхности, так и внутренних. А также оценка эффективности предложенной системы в сравнении с методами, основанными на машинном обучении, с учётом ограниченных вычислительных возможностей бортовых средств мобильных роботов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Dorigo Marco.* Swarmanoid: A Novel Concept for the Study of Heterogeneous Robotic Swarms // IEEE Robotics and Automation Magazine. – 2013. – Vol. 20, No. 4. – P. 60-71.
2. *Ермолов И.Л., Лапин Б.С.* Распределенное планирование движения для группы совместно переносящих груз роботов с учетом свойств опорных поверхностей // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, № 6. – С. 327-334.
3. *Cadena C., Carlone L., Carrillo H., Latif Y., Scaramuzza D., Neira J., Reid I., Leonard J.J.* Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age // IEEE Transactions on Robotics. – 2016. – Vol. 32, No. 6. – P. 1309-1332.
4. *Вазяев А.В., Носков В.П., Рубцов И.В., Цариченко С.Г.* Распознавание объектов и типов опорной поверхности по данным комплексированной системы технического зрения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2. – С. 127-139.
5. *Robert E.K., Gary W.* Terrain Understanding for Robot Navigation // Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2007. – P. 895-900.

6. *Angelova A., Matthies L., Helmick D., Perona P.* Fast Terrain Classification Using Variable-Length Representation for Autonomous Navigation // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2007. – P. 1-8.
7. *Cristian D., Nicolas V., Martial H.* Classifier Fusion for Outdoor Obstacle Detection // Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. – 2004. – Vol. 1. – P. 665-671.
8. *Jean-Francois L., Nicolas V., Daniel H., Martial H.* Natural terrain classification using three-dimensional ladar data for ground robot mobility // Journal of Field Robotics. – November 2006. – Vol. 23, No. 10. – P. 839-861.
9. *Wolf D.F., Sukhame G.S., Fox D., Burgard W.* Autonomous Terrain Mapping and Classification Using Hidden Markov Models // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2005. – P. 2026-2031.
10. RobotEye REHS25 Hyperspectral Ultrafast Broadband Spectral Scanner: Product Datasheet // OCULAR Robotics. – 2015. – URL: <http://www.ocularrobotics.com/wp/wp-content/uploads/2015/12/RobotEye-REHS25-Hyperspectral-Datasheet.pdf> (дата обращения: 04.06.2020).
11. *Vishwanath S., Aswin C.S.* Programmable Spectrometry -- Per-pixel Classification of Materials using Learned Spectral Filters // Published in ArXiv. Computer Science, Engineering. – 2019.
12. *Lloyd W., Rishi R., Arman M., Richard J.M.* Hyperspectral CNN Classification with Limited Training Samples // BMVC 2016. – 2016.
13. *David B., Scott T., Anthony S., Peter R.* Vegetation Detection for Mobile Robot Navigation // Tech. Report, CMU-RI-TR-04-12, Robotics Institute, Carnegie Mellon University. – 2004.
14. *Wang S.* Road Terrain Classification Technology for Autonomous Vehicle. – 2019. – 107 p.
15. *Bekker M.G.* Theory of Land Locomotion. – The University of Michigan Press, 1962.
16. *Машков К.Ю., Наумов В.Н., Рубцов В.И.* Система автоматического определения характеристик грунта при динамическом взаимодействии движителя МРК с опорной поверхностью // Матер. Восьмой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог, 2013. – С. 87-95.
17. *Машков К.Ю., Рубцов В.И., Штифанов Н.В.* Автоматическая система обеспечения опорной проходимости мобильного робота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Вып. Специальная робототехника. – 2012. – С. 95-106.
18. *Овчинников А.М., Платонов А.К.* Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010 // Тр. научно-технической конференции-семинара. Вып. 4 / под ред. Р.Р. Назирова. – М.: КДУ, 2011. – С. 216-229.
19. *Taheri S., Sandu C., Taheri S., Pinto E., Gorsich D.* A technical survey on terramechanics models for tireterrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles // Journal of Terramechanics. – 2015. – Vol. 57. – P. 1-22.
20. *Upadhyaya S.K., Wulfsohn D., Mehlschau J.* An instrumented device to obtain traction related parameters // Journal of Terramechanics. – 1993. – Vol. 30. – P. 1-20.
21. *Cao P., Hall E., Zhang E.* Soil Sampling Sensor System on a Mobile Robot // in Proceedings of SPIE Intelligent Robots and Computer Vision XXI: Algorithms, Techniques, and Active Vision. – 2003. – Vol. 5267.
22. *Väljaots., Lehiste H., Kiik M., Leemet T.* Soil sampling automation using mobile robotic platform // Agronomy Research. Estonian University of Life Sciences. Institute of Technology. – 2018. – Vol. 16, No. 3. – P. 917-922.
23. *Wills B.* The design and development of a hydraulic bevameter // Journal of Terramechanics. 1964. – Vol. 1. – P. 91-97.
24. *Nama J.S., Park Y.J., Kim K.U.* Determination of rating cone index using wheel sinkage and slip // Journal of Terramechanics. – 2010. – Vol. 47. – P. 243-248.
25. *Iagnemma K., Dubowsky S.* Terrain estimation for high-speed rough-terrain autonomous vehicle navigation. // In Proc. SPIE Conference on Unmanned Ground Vehicle Technology IV. – 2002.
26. *Marius M., David G.L.* Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration // International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP'09). – 2009.
27. *Martin A.F., Robert C.B.* Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Comm. Of the ACM. – June 1981. – No. 24. – P. 381-395.
28. *Шенель И.О.* Построение модели проходимости окружающей среды по облаку точек стереокамеры с использованием иерархической карты высот // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1 (48). – С. 94-107.

29. Neuhaus F., Dillenberger D., Pellenz J., Paulus D. Terrain Drivability Analysis in 3D Laser Range Data for Autonomous Robot Navigation in Unstructured Environments // Proceedings of 12th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). – Sep. 2009. – P. 4-9.
30. Fleischmann P., Berns K. A Stereo Vision Based Obstacle Detection System for Agricultural Applications. – 2016. – P. 217-231.
31. Li N., Ho C.P., Xue J., Lim L.W., Chen G., Fu Y.H., Lee L.Y.T. A Progress Review on Solid-State LiDAR and Nanophotonics-Based LiDAR Sensors // Laser Photonics Rev. – 2022. – 16. – 2100511. – <https://doi.org/10.1002/lpor.202100511>.
32. Martin E., Hans-eter K., Jörg S., Xiaowei X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96) / Evangelos Simoudis, Jiawei Han, Usama M. Fayyad. – AAAI Press, 1996. – P. 226-231.
33. Lapin B.S., Ermolov I.L., Sobolnikov S.A. THE simply integrated approach for surface parameters detection by UGV // Extreme Robotics. – 2019. – Vol. 1, No. 1. – P. 137-144.
34. Forrest R.M., Neal S., Alonzo K. Continuous Vehicle Slip Model Identification on Changing Terrains // Proceedings of RSS 2012 Workshop on Long-term Operation of Autonomous Robotic Systems in Changing Environments. – July 2012.
35. Ojeda L., Cruz D., Reina G., Borenstein J. Current-Based Slippage Detection and Odometry Correction for Mobile Robots and Planetary Rovers // IEEE Transactions on Robotics. – April 2006. – Vol. 22, No. 2. – P. 366-378.
36. Andreas G., Philip L., Christoph S., Raquel U. Vision meets Robotics: The KITTI Dataset // International Journal of Robotics Research (IJRR). – 2013.

REFERENCES

1. Dorigo Marco. Swarmanoid: A Novel Concept for the Study of Heterogeneous Robotic Swarms, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2013, Vol. 20, No. 4, pp. 60-71.
2. Ermolov I.L., Lapin B.S. Rasprelennoe planirovanie dvizheniya dlya gruppy sovmestno perenosyashchikh gruz robotov s uchetom svoystv opornykh poverkhnostey [Distributed motion planning for a group of robots jointly carrying a load, taking into account the properties of supporting surfaces], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2023, Vol. 24, No. 6, pp. 327-334.
3. Cadena C., Carlone L., Carrillo H., Latif Y., Scaramuzza D., Neira J., Reid I., Leonard J.J. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age, *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, Vol. 32, No. 6, pp. 1309-1332.
4. Vazaev A.V., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Tsarichenko S.G. Raspoznavanie ob"ektov i tipov opornoj poverkhnosti po dannym kompleksirovannoy sistemy tekhnicheskogo zreniya [Recognition of objects and types of supporting surfaces according to data from an integrated technical vision system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2, pp. 127-139.
5. Robert E.K., Gary W. Terrain Understanding for Robot Navigation, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp. 895-900.
6. Angelova A., Matthies L., Helmick D., Perona P. Fast Terrain Classification Using Variable-Length Representation for Autonomous Navigation, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007, pp. 1-8.
7. Cristian D., Nicolas V., Martial H. Classifier Fusion for Outdoor Obstacle Detection, *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, 2004, Vol. 1, pp. 665-671.
8. Jean-Francois L., Nicolas V., Daniel H., Martial H. Natural terrain classification using three-dimensional ladar data for ground robot mobility, *Journal of Field Robotics*, November 2006, Vol. 23, No. 10, pp. 839-861.
9. Wolf D.F., Sukhatme G.S., Fox D., Burgard W. Autonomous Terrain Mapping and Classification Using Hidden Markov Models, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 2026-2031.
10. RobotEye REHS25 Hyperspectral Ultrafast Broadband Spectral Scanner: Product Datasheet, *OCULAR Robotics*, 2015. Available at: <http://www.ocularrobotics.com/wp/wp-content/uploads/2015/12/RobotEye-REHS25-Hyperspectral-Datasheet.pdf> (accessed 04 June 2020).
11. Vishwanath S., Aswin C.S. Programmable Spectrometry -- Per-pixel Classification of Materials using Learned Spectral Filters, *Published in ArXiv. Computer Science, Engineering*, 2019.
12. Lloyd W., Rishi R., Arman M., Richard J.M. Hyperspectral CNN Classification with Limited Training Samples, *BMVC 2016*, 2016.

13. David B., Scott T., Anthony S., Peter R. Vegetation Detection for Mobile Robot Navigation, *Tech. Report, CMU-RI-TR-04-12*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2004.
14. Wang S. Road Terrain Classification Technology for Autonomous Vehicle, 2019, 107 p.
15. Bekker M.G. Theory of Land Locomotion. The University of Michigan Press, 1962.
16. Mashkov K.Yu., Naumov V.N., Rubtsov V.I. Cistema avtomaticheskogo opredeleniya kharakteristik grunta pri dinamicheskom vzaimodeystvii dvizhitelya MRK s opornoj poverkhnost'yu [System for automatic determination of soil characteristics during dynamic interaction of the MRC propulsion device with the supporting surface], *Mater. Vos'moy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «er spektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Proceedings of the Eighth All-Russian Scientific and Practical Conference “Advanced Systems and Control Problems”]. Taganrog, 2013, pp. 87-95.
17. Mashkov K.Yu., Rubtsov V.I., Shtifanov N.V. Avtomaticheskaya sistema obespecheniya opornoj prokhodimosti mobil'nogo robota [Automatic system for ensuring the support patency of a mobile robot], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie. Vyp. Spetsial'naya robototekhnika* [Bulletin of MSTU im. N.E. Bauman. Ser. Mechanical engineering. Vol. Special robotics], 2012, pp. 95-106.
18. Ovchinnikov A.M., Platonov A.K. Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniya mobil'nymi ob"ektami-2010 [Technical vision in mobile object control systems-2010], *Tr. nauchno-tekhnicheskoy konferentsii-seminara* [Proceedings of the scientific and technical conference-seminar], Issue 4, ed. by R.R. Nazirova. Moscow: KDU, 2011, pp. 216-229.
19. Taheri S., Sandu C., Taheri S., Pinto E., Gorsich D. A technical survey on terramechanics models for tireterrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles, *Journal of Terramechanics*, 2015, Vol. 57, pp. 1-22.
20. Upadhyaya S.K., Wulfsohn D., Mehlschau J. An instrumented device to obtain traction related parameters, *Journal of Terramechanics*, 1993, Vol. 30, pp. 1-20.
21. Cao P., Hall E., Zhang E. Soil Sampling Sensor System on a Mobile Robot, in *Proceedings of SPIE Intelligent Robots and Computer Vision XXI: Algorithms, Techniques, and Active Vision*, 2003, Vol. 5267.
22. Väljaots , Lehiste H., Kiik M., Leemet T. Soil sampling automation using mobile robotic platform, *Agronomy Research. Estonian University of Life Sciences. Institute of Technology*, 2018, Vol. 16, No. 3, pp. 917-922.
23. Wills B. The design and development of a hydraulic bevameter, *Journal of Terramechanics*, 1964, Vol. 1, pp. 91-97.
24. Nama J.S., Park Y.J., Kim K.U. Determination of rating cone index using wheel sinkage and slip, *Journal of Terramechanics*, 2010, Vol. 47, pp. 243-248.
25. Iagnemma K., Dubowsky S. Terrain estimation for high-speed rough-terrain autonomous vehicle navigation, in *Proc. SPIE Conference on Unmanned Ground Vehicle Technology IV*, 2002.
26. Marius M., David G.L. Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration, *International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP'09)*, 2009.
27. Martin A.F., Robert C.B. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Comm. Of the ACM. June*, 1981, No. 24, pp. 381-395.
28. Shepel' I.O. Postroenie modeli prokhodimosti okruzhayushchey sredy po oblaku toчек stereokamery s ispol'zovaniem ierarkhicheskoy karty vysot [Construction of a model of environmental cross-country ability using a point cloud of a stereo camera using a hierarchical height map], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2018, No. 1 (48), pp. 94-107.
29. Neuhaus F., Dillenberger D., Pellenz J., Paulus D. Terrain Drivability Analysis in 3D Laser Range Data for Autonomous Robot Navigation in Unstructured Environments, *Proceedings of 12th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETF A)*, Sep. 2009, pp. 4-9.
30. Fleischmann P., Berns K. A Stereo Vision Based Obstacle Detection System for Agricultural Applications, 2016, pp. 217-231.
31. Li N., Ho C.P., Xue J., Lim L.W., Chen G., Fu Y.H., Lee L.Y.T. A Progress Review on Solid-State LiDAR and Nanophotonics-Based LiDAR Sensors, *Laser Photonics Rev.*, 2022, 16, 2100511. Available at: <https://doi.org/10.1002/lpor.202100511>.
32. Martin E., Hans-ete r K., örg S., Xiaowei X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise, *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*, Evangelos Simoudis, Jiawei Han, Usama M. Fayyad. AAAI Press, 1996, pp. 226-231.

33. *Lapin B.S., Ermolov I.L., Sobolnikov S.A.* THE simply integrated approach for surface parameters detection by UGV, *Extreme Robotics*, 2019, Vol. 1, No. 1, pp. 137-144.
34. *Forrest R.M., Neal S., Alonzo K.* Continuous Vehicle Slip Model Identification on Changing Terrains, *Proceedings of RSS 2012 Workshop on Long-term Operation of Autonomous Robotic Systems in Changing Environments*, July 2012.
35. *Ojeda L., Cruz D., Reina G., Borenstein J.* Current-Based Slippage Detection and Odometry Correction for Mobile Robots and Planetary Rovers, *IEEE Transactions on Robotics*, April 2006, Vol. 22, No. 2, pp. 366-378.
36. *Andreas G., Philip L., Christoph S., Raquel U.* Vision meets Robotics: The KITTI Dataset, *International Journal of Robotics Research (IJRR)*, 2013.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. В.П. Носков.

Лалин Борис Сергеевич – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; e-mail: mail@borislal.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79175651032; инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории.

Гойдин Олег Петрович – e-mail: crer@vniia.ru; руководитель центра робототехники и аварийного реагирования.

Собольников Сергей Александрович – e-mail: sasobolnikov@vniia.ru, тел.: +79263879088; к.т.н.; доцент; начальник научно-исследовательской лаборатории.

Ермолов Иван Леонидович – Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук; e-mail: ermolov@ipmnet.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84954343547; д.т.н.; профессор РАН; зам. директора по научной работе,

Lapin Boris Sergeevich – FSUE "VNIIA"; e-mail: mail@borislal.ru; Moscow, Russia; phone: +79175651032; research engineer of the research laboratory.

Goydin Oleg Petrovich – e-mail: crer@vniia.ru; head of the Center for robotics and emergency response.

Sobolnikov Sergey Aleksandrovich – e-mail: sasobolnikov@vniia.ru; phone: +79263879088; cand. of eng. sc.; associate professor; head of the research laboratory.

Ermolov Ivan Leonidovich – Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences; e-mail: ermolov@ipmnet.ru; Moscow, Russia; dr. of eng. sc.; professor RAS; deputy head of scientific work.

УДК 614.8

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-68-77

Е.В. Павлов, В.И. Ершов, А.Ю. Баранник, А.В. Лагутина

ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ И ДРУГИХ НЕОТЛОЖНЫХ РАБОТ

Предложен подход к обоснованию параметров робототехнического комплекса, предназначенного для проведения аварийно-спасательных работ и других неотложных работ при ликвидации последствий аварий на особо опасных объектах (далее – РТК). Данный подход основан на формулировании идеальной модели робототехнического комплекса и дальнейшем ее преобразовании с целью обеспечения возможности создания, на основе существующих промышленных технологий, перспективного образца, превосходящего по показателям существующие робототехнические средства. Выбранный подход определяет ряд положений в отношении процесса обоснования параметров техники и создания ее перспективных образцов и технологий, включая теоретические положения, которые следует положить в основу его рассмотрения; способы действий при его организации; алгоритм его осуществления. В ходе достижения поставленной цели – обоснования параметров рассматриваемого РТК, были решены следующие научные задачи: проанализированы проблемы создания модели оптимизации параметров, разработана «идеальная модель» оптимизации параметров, на ос-

нове которой подготовлена рациональная модель оптимизации параметров РТК. При решении данных задач были определены основные особенности идеальных РТК: автономность, гибкость, интеллектуальность, маневренность, программируемость, обладание сенсорной обратной связью. Кроме того, идеальные РТК должны обеспечивать: исключение гибели и травматизма личного состава при ликвидации чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС); повышение эффективности проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ (далее – АСДНР); гибкость и адаптивность при проведении АСДНР. Под рационализацией идеальной модели в данной статье предлагается понимать ее преобразование путем снижения требований к соответствующим параметрам. При этом рассматривается два вида рационализации параметров РТК: – по тактическим показателям – модель, которую целесообразно реализовать в случае, если стохастическую математическую модель действий РТК удастся разработать; – по техническим показателям – модель, используемую, если упомянутая модель действий РТК создана не будет. Такой подход дает возможность оценивать степень отклонения выбранных параметров РТК и используемых методов их обоснования от наилучших вариантов, а также наметить пути по их совершенствованию.

Модель оптимизации параметров; идеальная модель; рациональная модель; технические показатели; многокритериальная оценка; метод анализа иерархий.

E.V. Pavlov, V.I. Ershov, A.Y. Barannik, A.V. Lagutina

APPROACH TO JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF A ROBOTIC COMPLEX FOR CARRYING OUT EMERGENCY RESCUE AND OTHER EMERGENCY OPERATIONS

An approach is proposed to substantiate the parameters of a robotic complex designed for emergency rescue and other urgent work in the aftermath of accidents at particularly dangerous facilities (hereinafter – RTC). This approach is based on the formulation of an ideal model of a robotic complex and its further transformation in order to ensure the possibility of creating, on the basis of existing industrial technologies, a promising sample that surpasses existing robotic tools in terms of performance. The chosen approach defines a number of provisions regarding the process of substantiating the parameters of technology and the creation of its promising samples and technologies, including theoretical provisions that should be the basis for its consideration; methods of action in its organization; the algorithm of its implementation. In the course of achieving this goal – substantiating the parameters of the RTC under consideration, the following scientific tasks were solved: the problems of creating a model for optimizing parameters were analyzed, an "ideal model" for optimizing parameters was developed, on the basis of which a rational model for optimizing RTC parameters was prepared. When solving these tasks, the main features of ideal RTCs were identified: autonomy, flexibility, intelligence, maneuverability, programmability, possession of sensory feedback. In addition, ideal RTCs should ensure: the exclusion of deaths and injuries of personnel during emergency situations (hereinafter referred to as emergencies); improving the effectiveness of emergency rescue and other urgent work (hereinafter referred to as EROUW); flexibility and adaptability during EROUW. The rationalization of an ideal model in this article is proposed to be understood as its transformation by reducing the requirements for the corresponding parameters. At the same time, two types of rationalization of RTC parameters are considered: – according to tactical indicators, it is a model that is advisable to implement if a stochastic mathematical model of RTC actions can be developed; – according to technical indicators, the model used if the mentioned RTC action model is not created. This approach makes it possible to assess the degree of deviation of the selected RTC parameters and the methods used to justify them from the best options, as well as to outline ways to improve them.

Parameter optimization model; ideal model; rational model; technical indicators; multi-criteria assessment; hierarchy analysis method.

Введение. Анализ современных методов решения проблем выбора рациональных технических инноваций [1–3] показывает, что создание нового робототехнического комплекса (РТК) должно опираться на ряд обоснованных научно-технических оснований, которые в совокупности называются *подходом к решению* этой задачи. Правильно выбранный подход к созданию техники позволяет сформировать обоснованные ее параметры, на основе которых, в свою очередь, и

производится ее разработка. Выбранный подход определяет ряд важных положений в отношении процесса обоснования параметров техники и создания ее перспективных образцов и технологий:

- ◆ теоретические положения, которые следует положить в основу его рассмотрения;
- ◆ способы действий при его организации;
- ◆ алгоритм его осуществления.

В соответствии с исследованиями [4-6] основополагающими являются установки концептуального аспекта подхода, в которых заложена целевая направленность технических решений по созданию РТК. Они включают три группы частных подходов: 1) к техническому решению проблемы (основные исходные установки); 2) общенаучные (системный, процессуальный, ситуационный и другие); 3) направленные на поиск рациональных решений. Настоящая статья посвящена вопросам реализации подходов третьей группы, требующей определенных интеллектуальных напряжений и затрат, и обычно осуществляемых с помощью операций перебора и проб, которые зачастую носят стихийный характер.

Одним из частных подходов, направленных на поиск рациональных решений по обоснованию параметров РТК при ликвидации последствий аварий на особо опасных объектах, является подход в основе которого положено построение некоторой предварительно разработанной модели оптимизации параметров РТК, определенной в качестве идеальной, и дальнейшее ее последовательное изменение, обеспечивающее работоспособность преобразованной модели (рис. 1.).

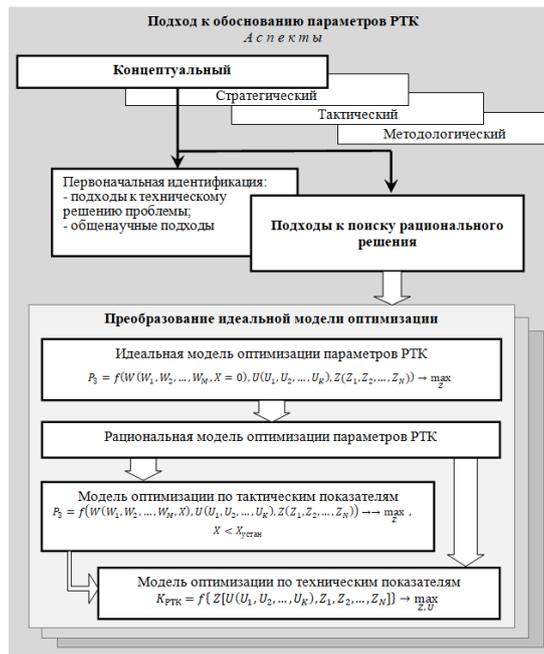


Рис. 1. Схема подхода к обоснованию параметров РТК для проведения АСДНР

Данный подход определяет ряд положений в отношении процесса обоснования параметров техники и создания ее перспективных образцов и технологий, включая теоретические положения, которые следует положить в основу его рассмотрения; способы действий при его организации; алгоритм его осуществления. В ходе достижения поставленной цели – обоснования параметров рассматривае-

мого РТК, необходимо решить следующие научные задачи: проанализировать проблемы создания модели оптимизации параметров, разработать идеальную модель оптимизации параметров и на ее основе создать рациональную модель оптимизации параметров РТК.

1. Модель оптимизации параметров РТК. Модель оптимизации параметров РТК включает формальное описание функционала, подлежащего оптимизации, а также ряд аргументов, отражающих состав подсистем РТК, их оптимизируемые параметры и условия функционирования [7–9]:

$$P_3 = f(W(W_1, W_2, \dots, W_M, X), U(U_1, U_2, \dots, U_K), Z(Z_1, Z_2, \dots, Z_N)) \rightarrow \max_Z, \quad (1)$$

где P_3 – вероятность выполнения задачи;

W – вектор условий, определяющих факт выполнения задачи, включающий:

W_1 – условие обеспечения минимальных материальных потерь защищаемого объекта: $C < C_{\text{норма}}$;

W_2 – условие обеспечения минимальных материальных потерь РТК: $N_i < N_{i\text{норма}}$;

W_3 – условие оперативности пожаротушения и проведения АСДНР: $T < T_{\text{зад}}$;

...;

X – допустимые потери личного состава;

U – множество внешних условий, влияющих на результат:

U_1 – поражающие факторы;

U_2 – погодные условия;

U_3 – источники огнетушащих веществ;

U_4 – возможное усиление;

...;

Z – множество параметров подсистем, которые могут входить в состав РТК:

Z_1 – подсистема принятия оперативного решения с параметрами (варианты):

– автономное управление и искусственный интеллект; – дистанционное управление; – комплексное управление; ...;

Z_2 – шасси (варианты): – гусеничное на базе танка; – колесное; – смешанное;

Z_3 – подсистема проведения АСР: параметры Z_{31}, Z_{32}, \dots ;

Z_4 – подсистема пожаротушения: параметры Z_{41}, Z_{42}, \dots ;

Z_5 – подсистема высотного пожаротушения: параметры Z_{51}, Z_{52}, \dots ;

Z_6 – подсистема рукавная: параметры Z_{61}, Z_{62}, \dots ;

Z_7 – подсистема насосная: параметры Z_{71}, Z_{72}, \dots

Ограничения, подлежащие учету:

♦ технические характеристики противопожарного оборудования и систем управления;

♦ работа в условиях поражающих факторов пожара и АСДНР.

Модель оптимизации параметров РТК является работоспособной, если:

1) множество возможных значений аргументов с учетом подлежащих учету ограничений не является пустым;

2) определены математическое выражение функционала и метод его оптимизации.

2. Идеальная модель оптимизации параметров РТК. Идеальная модель оптимизации параметров РТК – модель, обеспечивающая обоснование параметров идеального РТК.

Идеальный робототехнический комплекс при проведении АСДНР – это РТК, который обладает определенными характеристиками и свойствами, позволяющими выполнять задачи по предназначению с гарантированной эффективностью и максимальным результатом [10].

Идеальные РТК должны обладать следующими основными особенностями:

♦ *автономность* – способны работать и принимать решения самостоятельно, без постоянного управления оператором;

♦ *гибкость* – могут адаптироваться к различным ситуациям и изменять выполнение различные виды работ в зависимости от условий;

- ◆ *интеллектуальностью* – обладают способностью к обучению и анализу информации, что позволяет им улучшать свою производительность и эффективность;
- ◆ *маневренностью* – обладают высокой подвижностью и могут перемещаться в различных направлениях и по разным поверхностям;
- ◆ *сенсорной обратной связью* – оснащены различными сенсорами, которые позволяют воспринимать окружающую среду и реагировать на изменения в ней;
- ◆ *программируемостью* – могут быть запрограммированы для выполнения определенных задач и операций.

Идеальные РТК должны обеспечивать:

- ◆ исключение гибели и травматизма личного состава при ликвидации ЧС;
- ◆ повышение эффективности проведения АСДНР;
- ◆ гибкость и адаптивность при проведении АСДНР.

Идеальную модель оптимизации РТК можно представить в следующем формализованном виде:

$$P_3 = f(W(W_1, W_2, \dots, W_M, X = 0), U(U_1, U_2, \dots, U_K), Z(Z_1, Z_2, \dots, Z_N)) \rightarrow \max_Z, \quad (2)$$

где в отличие от общей модели имеются следующие особенности:

$X = 0$ – потери личного состава недопустимы;

Z – множество подсистем, которые могут входить в состав РТК;

Z_1 – подсистема принятия оперативного решения: автономное управление и искусственный интеллект;

Z_2 – шасси (варианты): гусеничное на базе танка Т-72;

Z_3 – подсистема проведения АСДНР: должна функционировать, параметры;

Z_4 – подсистема пожаротушения: должна функционировать, параметры;

Z_5 – подсистема высотного пожаротушения: должна функционировать, параметры;

Z_6 – подсистема рукавная: должна функционировать, параметры;

Z_7 – подсистема насосная: должна функционировать, параметры.

Ограничения, подлежащие учету:

◆ технические характеристики противопожарного оборудования и систем управления;

◆ тактические возможности РТК;

◆ работа в условиях поражающих факторов пожара и АСДНР;

Идеальная модель оптимизации РТК в настоящее время *не может быть реализована* по следующим причинам:

◆ не может быть гарантировано полное исключение потерь личного состава или его травмирования, так как не исключаются все способствующие этому операции;

◆ не создано автономное управление и искусственный интеллект РТК;

◆ не может быть реализовано принятие решения с использованием автономного управления и искусственного интеллекта;

◆ к настоящему времени не создана эффективная стохастическая математическая модель действий РТК, обеспечивающая получение удовлетворительных результатов расчета вероятности выполнения задачи по тушению пожара и проведения АСДНР.

3. Рациональная модель оптимизации параметров РТК. Невозможность по указанным выше причинам реализовать идеальную модель оптимизации параметров РТК вынуждает ее преобразовывать путем снижения требований к соответствующим ограничениям. В этом случае следует уже вести речь не об идеальной, а о рациональной модели [11–14]. Далее рассматривается два вида рациональной модели оптимизации параметров РТК:

◆ по тактическим показателям – модель, которую целесообразно реализовать в случае, если стохастическую математическую модель действий РТК удастся разработать;

◆ по техническим показателям – модель, используемую, если упомянутая модель действий РТК создана не будет.

Рациональная модель оптимизации РТК по **тактическим** показателям представляется в следующем виде:

$$P_3 = f(W(W_1, W_2, \dots, W_M, X), U(U_1, U_2, \dots, U_K), Z(Z_1, Z_2, \dots, Z_N)) \rightarrow \max_Z, \quad (3)$$

которая в отличие от идеальной модели имеет следующие особенности:

X – допускаются потери личного состава: $X < X_{устан}$;

Z_1 – подсистема принятия оперативного решения с параметрами (варианты):

◆ дистанционное управление;

◆ комплексное управление;

...

Рациональная модель оптимизации РТК по **техническим показателям** основана на применении методов многокритериальной оценки, где в качестве множества частных критериев берутся параметры подсистем, входящих в состав РТК, а также показатели возможностей РТК по действиям в различных условиях. Авторы статьи считают целесообразным, чтобы многокритериальная оценка осуществлялась с применением метода анализа иерархий с использованием аддитивной модели попарных сравнений альтернатив (значимости параметров и подсистем) [6–8]. Использование данного метода по сравнению с другими методами снижает неопределенность в построении ранжировок альтернатив, что и определяет его выбор.

Формализованное описание модели оптимизации параметров РТК по техническим показателям имеет следующий вид [16–18]:

$$K_{РТК} = f\{Z[U(U_1, U_2, \dots, U_K), Z_1, Z_2, \dots, Z_N]\} \rightarrow \max_{Z, U}, \quad (4)$$

где $K_{РТК}$ – качество варианта исполнения РТК;

f – операции многокритериальной оценки;

U – возможности РТК по действиям в множестве внешних условий, влияющих на результат:

U_1 – поражающие факторы;

U_2 – погодные условия;

U_3 – источники ОБ;

U_4 – возможное усиление; ...

Z – множество подсистем, которые могут входить в состав РТК:

Z_1 – подсистема принятия оперативного решения с параметрами (варианты):

◆ дистанционное управление;

◆ комплексное управление;

...;

Z_2 – шасси (варианты): гусеничное на базе танка Т-72;

Z_3 – подсистема проведения АСР: параметры;

Z_4 – подсистема пожаротушения: параметры;

Z_5 – подсистема высотного пожаротушения: параметры;

Z_6 – подсистема рукавная: параметры;

Z_7 – подсистема насосная: параметры.

Ограничения, подлежащие учету:

◆ технические характеристики противопожарного оборудования и систем управления;

◆ работа в условиях поражающих факторов пожара и АСДНР.

Реализация модели оптимизации параметров РТК по техническим показателям заключается в построении ранжировки ($K_{РТК1}, \dots, K_{РТКn}$) вариантов исполнения РТК и выбора из них варианта с наибольшим значением качества $K_{РТК} = \max(K_{РТК1}, \dots, K_{РТКn})$ [9]. Построение этой ранжировки с применением метода анализа иерархий с аддитивной моделью попарных сравнений заключается в решении матричного математического выражения [19–20]:

$$(K_{РТК\ 1}, \dots, K_{РТК\ n}) = (w_1, \dots, w_m) \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где (w_1, \dots, w_m) – вектор-строка нормированных весов критериев (m – количество критериев), определяемая методом попарных сравнений значимости критериев в процессе экспертных оценок;

(x_{j1}, \dots, x_{jn}) – строки матрицы решений, являющиеся ранжировками альтернатив (n – количество типов) по каждому j -тому критерию ($j = 1, \dots, m$), определяемыми методом попарных сравнений фактических значений критериев.

При применении метода попарных сравнений ранжировка альтернатив (w_1, \dots, w_n) , $i = 1, \dots, n$ строится по величинам их *весов*, рассчитываемым с использованием квадратной матрицы попарных сравнений Y (размерностью $n \times n$, где n – количество альтернатив). Матрица Y имеет сходство со спортивной турнирной таблицей, в которой в зависимости от применяемой модели попарных сравнений (аддитивной или мультипликативной) в клетки главной диагонали $(y_{11}, y_{22}, \dots, y_{nn})$ ставятся 0.5 или 1:

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{nn} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где значения элементов матрицы – результаты сравнения двух альтернатив a_i и a_j – определяются в соответствии со следующими правилами для аддитивной модели:

$y_{ij} = 1$, если $a_i \succ a_j$ – при парном сравнении принято, что альтернатива a_i важнее альтернативы a_j ;

$y_{ij} = 0$, если $a_i \prec a_j$ – альтернатива a_j важнее альтернативы a_i ;

$y_{ij} = 0.5$, если $a_i \approx a_j$ – альтернативы a_i и a_j по важности примерно одинаковы;

$y_{ii} = 0.5$ (при $j = i$);

$y_{ij} = 1 - y_{ji}$.

Веса каждой из альтернатив определяются по формуле:

$$w'_i = \sum_{i=1}^n y_{1i}, \quad (7)$$

Нормированные веса определяются как

$$w_i = \frac{w'_i}{\sum_{k=1}^n w'_k}, \quad (8)$$

Выполнение нормировки весов является удобным приемом для согласования оценок альтернатив с различными типами шкал измерения.

Заключение. В целом рассмотренный подход к обоснованию параметров РТК, предназначенного для проведения АСДНР при ликвидации последствий аварий на особо опасных объектах, позволяет построить рациональную работоспособную модель оптимизации, постепенно выполняя ее преобразования, отталкиваясь от исходной идеальной модели. Такой подход дает возможность оценивать степень отклонения выбранных параметров РТК и используемых методов их обоснования от наилучших вариантов, а также наметить пути по их совершенствованию. Из изложенного материала, согласно которому предлагается применять оптимизацию РТК по техническим показателям, следует, что для совершенствования процесса оптимизации в первую очередь следует разработать стохастическую математическую модель действий РТК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Липичу Н.В., Липичу К.И. Методология научного исследования: учеб. пособие. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – С. 24.
2. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология научного исследования. – М.: Либроком, 2010. – С. 134-138.

3. *Майданов А.С.* Методология научного творчества. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – С. 46-75.
4. *Abrosimov V., Mochalkin A.* Collective behavior strategy development based on friendship of robots // *Proceedings of 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, Valenciennes, France. – P. 38-4. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3191477.3191479>.
5. *Rzevski G., Skobelev P.* Managing Complexity. – *Wit Pr/Computational Mechanics*, 2014. – 216 p.
6. A Roadmap for US Robotics – From Internet to Robotics. – 2020 ed. – <https://www.semanticscholar.org>.
7. *Lan G.* Bundle-level type methods uniformly optimal for smooth and nonsmooth convex optimization // *Math. Program.* – 2015. – Vol. 149, No. 1–2. – P. 1-45.
8. *D'Aspremont A.* Smooth optimization with approximate gradient // *SIAM J. Optimizat.* – 2019. – Vol. 19, No. 3. – P. 1171-1183.
9. *Bach F., Levy K.Y.* A universal algorithm for variational inequalities adaptive to smoothness and noise // *COLT*, 2019.
10. *Павлов Е.В.* Разработка методики обоснования тактико-технических требований к робототехническому комплексу многорежимного пожаротушения // *Технологии гражданской безопасности*. – 2020. – Т. 17, № 2 (64). – С. 61-67.
11. Робототехника: Определение, свойства и примеры идеального класса робототехники // *Научные Статьи.Ру* – портал для студентов и аспирантов. – Дата последнего обновления статьи: 29.11.2023. – URL <https://nauchniestati.ru/spravka/idealnyj-klass-robototekhniki/> (дата обращения: 24.12.2023).
12. *Чварков С.В., Селиванов А.А., Ковальчук А.М.* Концептуальный подход к построению эмпирических основ формирования системы робототехнических комплексов военного назначения // *Вестник Академии военных наук*. – 2022. – № 1 (77). – С. 109-119.
13. *Саати Т.* Принятие решений – Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
14. *Орлов А.И.* Организационно-экономическое моделирование: учебник: в 3 ч. Ч. 2: Экспертные оценки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 486 с.
15. *Ларичев О.И.* Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных Странах: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2002. – 392 с.
16. *Боев В.Д., Сыпченко Р.П.* Компьютерное моделирование. Элементы теории и практики: учеб. пособие. – СПб.: ВАС, 2009.
17. *Алямовский А.А. [и др.]*. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 800 с. – ISBN 978-5-94157-994-5.
18. *Павлов Е.В., Баранник А.Ю.* Подход к разработке робототехнических комплексов, предназначенных для ведения аварийно-спасательных работ в зонах разрушений с пожарами // *Технологии гражданской безопасности*. – 2023. – Т. 20, № 4 (78). – С. 45-51.
19. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1989.
20. *Bodin Lawrence, Saul I. Gass.* Exercises for Teaching the Analytic Hierarchy Process (англ.) // *INFORMS Transactions on Education: journal*. – 2004. – January (Vol. 4, No. 2). Архивировано 21 мая 2009 года.

REFERENCES

1. *Lipchii N.V., Lipchii K.I.* Metodologiya nauchnogo issledovaniya: ucheb. posobie [Methodology of scientific research: a textbook]. Krasnodar: KubGAU, 2013, pp. 24.
2. *Novikov A.M., Novikov D.A.* Metodologiya nauchnogo issledovaniya [Methodology of scientific research]. Moscow: Librokom, 2010, pp. 134-138.
3. *Maydanov A.S.* Metodologiya nauchnogo tvorchestva [Methodology of scientific creativity]. Moscow: Izd-vo LKI, 2008, pp. 46-75.
4. *Abrosimov V., Mochalkin A.* Collective behavior strategy development based on friendship of robots, *Proceedings of 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, Valenciennes, France, pp. 38-4. DOI: <https://doi.org/10.1145/3191477.3191479>.
5. *Rzevski G., Skobelev P.* Managing Complexity. *Wit Pr/Computational Mechanics*, 2014, 216 p.
6. A Roadmap for US Robotics – From Internet to Robotics. 2020 ed. Available at: <https://www.semanticscholar.org>.
7. *Lan G.* Bundle-level type methods uniformly optimal for smooth and nonsmooth convex optimization, *Math. Program.*, 2015, Vol. 149, No. 1–2, pp. 1-45.
8. *D'Aspremont A.* Smooth optimization with approximate gradient, *SIAM J. Optimizat.*, 2019, Vol. 19, No. 3, pp. 1171-1183.

9. *Bach F., Levy K.Y.* A universal algorithm for variational inequalities adaptive to smoothness and noise, COLT, 2019.
10. *Pavlov E.V.* Razrabotka metodiki obosnovaniya taktiko-tekhnicheskikh trebovaniy k robototekhnicheskomu kompleksu mnogorezhimnogo pozharotusheniya [Development of a methodology for substantiating tactical and technical requirements for a multi-mode fire extinguishing robotic complex], *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti* [Technologies of Civil Safety], 2020, Vol. 17, No. 2 (64), pp. 61-67.
11. Robototekhnika: Opredelenie, svoystva i primery ideal'nogo klassa robototekhniki [Robotics: Definition, properties and examples of an ideal class of robotics], *Nauchye Stat'i.Ru – portal dlya studentov i aspirantov* [Scientific Articles.<url> is a portal for students and postgraduates]. Date of the last update of the article: 11/29/2023. Available at: <https://nauchniestati.ru/spravka/idealnyj-klass-robototekhniki/> (accessed 24 December 2023).
12. *Chvarkov S.V., Selivanov A.A., Koval'chuk A.M.* Kontseptual'nyy podkhod k postroeniyu empiricheskikh osnov formirovaniya sistemy robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [Conceptual approach to the construction of empirical foundations for the formation of a system of military robotic complexes], *Vestnik Akademii voennykh nauk* [Bulletin of the Academy of Military Sciences], 2022, No. 1 (77), pp. 109-119.
13. *Saati T.* Prinyatie resheniy – Metod analiza ierarkhiy [Decision-making - A method of analyzing hierarchies]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 278 p.
14. *Orlov A.I.* Organizatsionno-ekonomicheskoe modelirovanie: uchebnyk: v 3 ch. Ch. 2: Ekspertnye otsenki [Organizational and economic modeling: textbook: in 3 part. Part 2: Expert assessments]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2011, 486 p.
15. *Larichev O.I.* Teoriya i metody prinyatiya resheniy, a takzhe Khronika sobytij v Volshebnykh Stranakh: uchebnyk [Theory and methods of decision-making, as well as a chronicle of events in Magical Countries: Textbook]. 2nd ed. Moscow: Logos, 2002, 392 p.
16. *Boev V.D., Sypchenko R.P.* Komp'yuternoe modelirovanie. Elementy teorii i praktiki: ucheb. posobie [Computer modeling. Elements of theory and practice: Study guide]. St. Petersburg: VAS, 2009.
17. *Alyamovskiy A.A. [i dr.].* SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike [Computer modeling in engineering practice]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2012, 800 p. ISBN 978-5-94157-994-5.
18. *Pavlov E.V., Barannik A.Yu.* Podkhod k razrabotke robototekhnicheskikh kompleksov, prednaznachennykh dlya vedeniya avariynno-spatel'nykh rabot v zonakh razrusheniya s pozharami [An approach to the development of robotic complexes designed for conducting emergency rescue operations in areas of destruction with fires], *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti* [Technologies of Civil Safety], 2023, Vol. 20, No. 4 (78), pp. 45-51.
19. *Saati T.* Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy [Decision-making. The method of hierarchy analysis]. Moscow: Radio i svyaz', 1989.
20. *Bodin Lawrence, Saul I. Gass.* Exercises for Teaching the Analytic Hierarchy Process, *INFORMS Transactions on Education: journal*, 2004, January (Vol. 4, No. 2). Archived on May 21, 2009.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.П. Чумак.

Павлов Евгений Владимирович – Всероссийский ордена «Знак Почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России»; e-mail: pavlov-yr@mail.ru; г. Балашиха, Россия; тел.: 89167850002; старший научный сотрудник научно-исследовательского центра пожарной техники и пожарной автоматике.

Ершов Владимир Иванович – e-mail: evi-monino@mail.ru; тел.: 89690301515; к.в.н.; профессор; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра пожарной техники и пожарной автоматике.

Баранник Александр Юрьевич – Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, федеральный центр науки и высоких технологий; e-mail: auba@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89166951214; к.т.н., с.н.с.; ведущий научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра «Развития технических средств и технологий».

Лагутина Анна Викторовна – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; тел.: 89057118834; старший научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра «Развития технических средств и технологий».

Pavlov Evgeny Vladimirovich – All-Russian Order "Badge of Honor "Research Institute of Fire Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia"; e-mail: pavlov-vp@mail.ru; Balashikha, Russia; phone: +79167850002; senior researcher at the Research Center for Fire Engineering and Fire Automation.

Ershov Vladimir Ivanovich – e-mail: evi-monino@mail.ru; phone: +79690301515; cand. of mil. sc.; professor; leading researcher of the Research Center for Fire Engineering and Fire Automation.

Barannik Alexander Yuryevich – All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergency of the EMERCOM of Russia (Federal Science and High Technologies Center); e-mail: auba@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79166951214; cand. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher of the 6th Research Center Development of technical means and technologies.

Lagutina Anna Viktorovna – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; phone: +79057118834; senior researcher of the 6th Research Center Development of technical means and technologies.

УДК 519.6+004.021

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-77-88

Б.В. Румянцев, С.В. Прокопчина, А.А. Кочкаров

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ

Организация непрерывного мониторинга значительных пространств с динамически меняющимися условиями и обстановкой является одной из ключевых задач в различных направлениях жизнедеятельности человека. Особо остро эта задача стоит в России с учетом ее территорий (земель), предназначенных для сельскохозяйственной деятельности. Особую важность организации непрерывного мониторинга подчеркивает и развитие концепции и технологий точного земледелия. В качестве средств для решения этой системной задачи могут использоваться различные робототехнические и беспилотные системы, оснащенные необходимым оборудованием в соответствии с локальными задачами непрерывного мониторинга. Непрерывный мониторинг при этом может быть обеспечен только применением эффективных алгоритмов построения траектории движения используемых подвижных робототехнических и беспилотных (в первую очередь авиационных) систем. Повышение эффективности таких алгоритмов с математической точки зрения всегда усложняется циклическостью траекторий движения, т.е. построением гамильтонова цикла. В рамках данной работы предлагается метод конструирования оптимальной траектории движения при выполнении задач непрерывного циклического мониторинга сельскохозяйственных полей. Метод основан на поиске гамильтонова цикла на графе карты местности и позволяет автоматически строить оптимальный замкнутый путь для произвольной карты местности. Отличительной особенностью метода является использование модифицированного алгоритма поиска гамильтонова цикла. Алгоритм может быть масштабирован для карт, соответствующих графам с большим (более 100) количеством вершин, для которых стандартный алгоритм поиска гамильтонова цикла методом перебора требует значительно большего времени выполнения, чем предложенный алгоритм. Показано, что используемый алгоритм обладает в 17 раз меньшей константой роста временной сложности, чем стандартный алгоритм поиска гамильтонова цикла. Это позволяет увеличить количество вершин графа, используемого для поиска гамильтонова цикла в режиме реального времени (от 0.1 до 100 секунд), на порядок (от 30 до 500). Разработанный алгоритм может быть внедрён в современные беспилотные системы мониторинга состояния сельскохозяйственных полей для оптимизации траектории движения беспилотных аппаратов в режиме реального времени (0.1-100 секунд), внося тем самым вклад в динамично развивающуюся область точного земледелия.

Теория графов; Гамильтонов цикл; временная сложность; мониторинг; точное земледелие.

B.V. Rumiantsev, S.V. Prokopchina, A.A. Kochkarov

**ALGORITHM FOR THE CONSTRUCTION OF THE TRAJECTORY
OF UNMANNED VEHICLES FOR MONITORING THE CONDITION
OF AGRICULTURAL FIELDS**

Organizing continuous monitoring of large spaces with dynamically changing conditions and conditions is one of the key tasks in various areas of human life. This task is especially acute in Russia, taking into account its territories (lands) intended for agricultural activities. The particular importance of organizing continuous monitoring is also emphasized by the development of the concept and technology of precision farming. As a means to solve this system problem, various robotic and unmanned systems can be used, equipped with the necessary equipment in accordance with the local tasks of continuous monitoring. Continuous monitoring can only be ensured by the use of effective algorithms for constructing the movement trajectory of the mobile robotic and unmanned (primarily aviation) systems used. Increasing the efficiency of such algorithms from a mathematical point of view is always complicated by the cyclical nature of motion trajectories, i.e. construction of a Hamiltonian cycle. This work proposes a method for constructing an optimal trajectory for continuous cyclic monitoring tasks of agricultural fields. The method is based on finding a Hamiltonian cycle on the graph of the terrain map and allows for the automatic construction of an optimal closed path for any terrain map. A distinctive feature of the method is the use of a modified algorithm for finding Hamiltonian cycles. The algorithm can be scaled for maps corresponding to graphs with a large (more than 100) number of vertices, for which the standard brute-force algorithm for finding Hamiltonian cycles requires significantly more execution time than the proposed algorithm. It is shown that the algorithm used has a 17 times smaller growth constant in time complexity compared to the standard algorithm for finding Hamiltonian cycles. This allows for an increase in the number of vertices in the graph used for finding Hamiltonian cycles in real-time mode (0.1-100 seconds) by an order of magnitude (from 30 to 500). The developed algorithm can be implemented in modern unmanned monitoring systems for optimizing the trajectory of agricultural fields monitoring by unmanned vehicles in real-time mode, thus contributing to the dynamically evolving field of precision agriculture.

Graph theory; Hamiltonian cycle; time complexity; monitoring; precision agriculture.

Введение. Задача поиска оптимального маршрута мониторинга и патрулирования местности в настоящее время имеет особую актуальность благодаря использованию автоматизированных беспилотных устройств, которые не требуют присутствия оператора и могут использоваться в качестве подвижных платформ для различных типов датчиков: оптических, акустических, химических и т.д. Эти устройства позволяют решать широкий спектр задач, связанных с автоматизацией процессов пространственного мониторинга [1–4]. Тип используемых датчиков определяется характером задач, которые должны быть решены при патрулировании местности. Так, патрулирование может проводиться с целью картографирования местности [5], поиска полезных ископаемых [6], эхолокации [7] и также для локальной регистрации погодных условий [8]. Перспективным направлением применения алгоритмов патрулирования является их использование в рамках сельскохозяйственной сферы для реализации стратегии точного земледелия (precision agriculture) [9], где патрулирование может осуществляться с целью наблюдения за состоянием растений, истребления вредителей, а также выявления потенциальных угроз урожаю [10].

Поскольку эффективное патрулирование местности требует построения оптимального пути движения на заданной карте, задача эффективного патрулирования практически неизбежно требует использования теории графов [11]. Графовые подходы к решению задачи патрулирования активно используются в современных работах. Часто рассматриваемой проблемой является патрулирование с использованием нескольких подвижных сенсоров [12]. Так, в работе [13] решается проблема эффективного патрулирования с использованием нескольких роботов в известной среде путем назначения индивидуальных зон патрулирования каждому подвижному сенсору. В работе [14] решается та же проблема и демонстрируется метод динамического разбиения графа на области ответственности сенсоров путём

локальных взаимодействий между ними. В работе [15] авторы обсуждают подход к автоматизации патрулирования территории с использованием набора подвижных роботов и предлагают алгоритм для разбиения карты между роботами, основанный также на использовании теории графов.

Статья [16] посвящена стохастической графовой стратегии для патрулирования местности с помощью набора сенсоров, которая может превзойти детерминированные подходы. Другой подход к решению проблемы патрулирования в рамках обсуждается в [17]. В данной работе авторы предлагают строить маршрут патрулирования путем сокращения полного графа местности на основе важности каждого отдельного узла для процедуры патрулирования, что позволяет сократить временную сложность алгоритма, что особенно важно в контексте проблемы больших графов.

В рамках данной работы предлагается реализовать процедуру патрулирования на всем графе с использованием одного сенсора, перемещающегося по карте с заданным расположением препятствий, что является альтернативой вышеупомянутым подходам на основе разбиения многих графа на зоны ответственности и его редуцирования. В этом случае, как будет обсуждаться ниже, соответствующий метод для реализации эффективного патрулирования местности – это построение графа карты местности, который допускает построение гамильтонова цикла [11], то есть замкнутого пути, проходящего через каждую вершину графа ровно один раз. Задача поиска гамильтонова цикла в настоящее время является актуальной математической проблемой, имеющей прикладной характер в различных областях. В частности, это области, где требуется реализовать поиск оптимального пути движения объекта. Эти области включают в себя транспортно-логистическую сферу [18, 19], направления геологоразведки [20] и, как уже упоминалось выше, область патрулирования местности [21, 22]. Несмотря на свою актуальность, задача поиска гамильтонова цикла остается одной из самых сложных оптимизационных математических задач в настоящее время. Проблема поиска гамильтонова пути и, в частности, поиска гамильтонова цикла, является NP-полной проблемой и в случае алгоритма полного перебора имеет экспоненциальную временную сложность [11]. При наличии априорной информации о графе, используемой для поиска гамильтонова пути, возможно снизить сложность времени проблемы до субэкспоненциального [23] и даже до полиномиального [24] уровня. Экспоненциальная сложность поиска гамильтонова пути на произвольном графе ограничивает количество вершин графа, что позволяет решать проблему в режиме реального времени. Этот фактор особенно важен в приложениях, где требуется построить оптимальную траекторию движения при быстром изменении конфигурации графа. Мотивацией данной работы является разработка алгоритма реального времени с временем выполнения 0.1-100 секунд на современных вычислительных системах для построения оптимального маршрута патрулирования в виде гамильтонова цикла, который обеспечивает полное покрытие заданной карты местности. Новизна метода обусловлена модифицированным алгоритмом поиска гамильтонова цикла, который лежит в основе предложенного метода и обеспечивает значительное ускорение процедуры поиска по сравнению со стандартным алгоритмом полного перебора, сохраняя экспоненциальную временную сложность. Далее рассматривается полная формулировка задачи, краткое представление разработанного теоретико-графового метода для построения оптимальной траектории патрулирования и результаты исследования эффективности разработанного подхода.

Постановка задачи. В рамках данной работы рассматривается задача патрулирования местности на заданной двухмерной карте с препятствиями (рис. 1).

Термин "патрулирование" (или "мониторинг") в данной работе означает перемещение одного беспилотного сенсора по карте, сопровождающееся регистрацией обобщенных целей, которые могут быть обнаружены с равной вероятностью в любой точке карты. Термин "препятствия" означает области карты, где не могут быть размещены цели и сенсоры. В реальной ситуации такими препятствиями могут быть горные хребты, водоемы и элементы инфраструктуры, которые могут оказаться не-

преодолимыми препятствиями как для наземных, так и для летающих беспилотных сенсоров. В контексте рассматриваемого подхода сенсору назначается поле зрения, в котором он может зарегистрировать цель. Поле зрения представляет собой круг радиуса R с центром в точке текущего расположения сенсора (рис. 2).

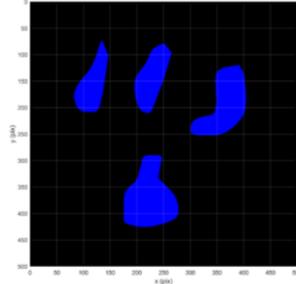


Рис. 2. Пример двумерной карты местности, рассматриваемый в данной работе. Темно-синий цвет обозначает препятствия, то есть области, где невозможно разместить датчик и где нет необходимости проводить процедуру патрулирования. Черный цвет обозначает область, где необходимо проводить процедуру патрулирования и где может быть размещен датчик. Белая сетка, отмечающая отметки с шагом 50 пикселей, используется для визуальной ориентации и не относится к рассматриваемой проблеме

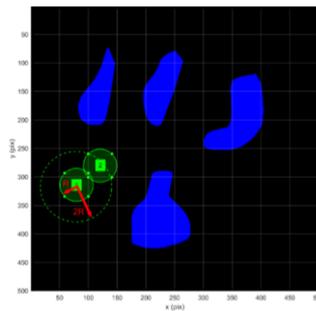


Рис. 3. Поля зрения датчика (# 1 и # 2, зеленый цвет). Находясь в центре области # 1, за одну итерацию времени датчик может переместиться в любую точку, расположенную внутри круга радиуса $2R$ (зеленая пунктирная линия), включая точку, определяющую центр поля зрения # 2

В рассматриваемой модели предполагается, что в процессе мониторинга сенсор перемещается по карте дискретным образом с шагом $\Delta \vec{r}$, который меньше или равен диаметру $2R$ его поля зрения ($1 \text{ пиксель} \leq |\Delta \vec{r}| \leq 2R$). Это приближение соответствует реальной ситуации при условии, что шаг времени Δt намного меньше полного времени мониторинга T ($\Delta t \ll T$). Использование этого приближения позволяет рассматривать движение сенсора как движение между центрами полей зрения, расположенных на области мониторинга с некоторым перекрытием (плотностью) между ними.

При осуществлении мониторинга в области, покрытых полями зрения, возможно формализовать движение датчика на карте как движение между вершинами графа, который строится в соответствии с расположением полей зрения. Можно показать, что для минимизации времени обнаружения целей траектория движения должна представлять собой гамильтонов цикл [21]. Основная идея заключается в следующем: в случае одного датчика, движущегося с постоянной скоростью и не-

подвижных целей, время регистрации целей Δt_{reg} равно времени полного обзора (или охвата) мониторинговой области датчиком Δt_{sweep} , которое обратно пропорционально скорости обзора датчика:

$$\Delta t_{sweep} = \frac{S_{total}}{dS_{swept}/dt}. \quad (1)$$

Общая площадь зоны мониторинга обозначается как S_{total} , а dS_{swept}/dt – скорость обзора, которая представляет собой площадь, охваченную сенсором на карте за единицу времени. Для минимизации времени обзора Δt_{sweep} и, следовательно, времени регистрации Δt_{reg} при заданной площади карты S_{total} необходимо максимизировать скорость обзора dS_{swept}/dt . В свою очередь, при заданной скорости движения датчика это можно достичь, если каждая точка карты будет охвачена ровно один раз за период Δt_{sweep} . Это обеспечивается движением сенсора вдоль гамильтонова пути на графе местности. В случае движущихся целей однократный обход зоны патрулирования может быть недостаточным для регистрации всех целей, и может потребоваться более одного цикла обхода. Циклический обход зоны патрулирования, который гарантирует охват каждой точки карты ровно один раз за один цикл патрулирования с равным периодом охвата, требует возвращения датчика в исходную точку на каждом цикле патрулирования. Это можно обеспечить, используя в качестве траектории движения датчика гамильтонов цикл вместо гамильтонова пути. Таким образом, оптимальная траектория движения, которая минимизирует время обнаружения движущихся целей в рассматриваемой задаче, является гамильтоновым циклом. Таким образом, задачу эффективного патрулирования местности можно разделить на две последовательные задачи. Первая задача – реализация эффективного охвата зоны мониторинга сенсорами и построение графа местности в соответствии с полученным размещением полей зрения. Вторая задача – поиск гамильтонова цикла на построенном графе местности, который представляет собой оптимальную траекторию движения датчика.

Алгоритм покрытия целевой зоны. Для покрытия зоны мониторинга областью обзора датчиков используется следующий алгоритм (рис. 3).

Для обеспечения эффективного мониторинга карты местности, характеризующейся минимальной площадью перекрытия между областями обзора датчиков и препятствиями, размер области обзора R должен быть меньше или равен минимальному расстоянию между препятствиями на данной карте. На первом этапе на карте строится сетка с равным шагом Δr , состоящая из областей обзора, где шаг Δr устанавливается как $\Delta r = \rho \cdot 2R$, $\rho \in (0,1]$ – это коэффициент, определяющий плотность размещения областей обзора. Термин "плотность" используется, потому что ρ определяет расстояние между соседними областями обзора. Следовательно, чем меньше ρ , тем больше областей обзора размещается на данной площади, что указывает на увеличение плотности размещения областей обзора.

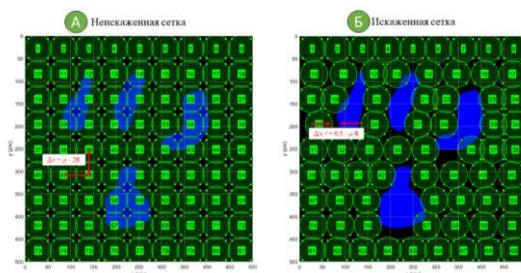


Рис. 4. А – неискаженная сетка областей обзора датчиков. $\Delta r = \rho \cdot 2R$ – расстояние между узлами сетки; б – Искаженная сетка областей обзора датчиков. Минимальный размер не покрытой части карты по оси x составляет $\Delta x \leq 0.5$

Для обеспечения эффективного мониторинга карты местности, характеризующейся минимальной площадью пересечения между областями обзора датчиков и препятствиями, размер области обзора R должен быть меньше или равен минимальному расстоянию между препятствиями на данной карте.

На втором этапе сетка искажается: шаг сетки изменяется таким образом, чтобы размер не покрытой части карты вдоль оси x был меньше или равен $0.5 \cdot \rho R$. Области обзора размещаются в узлах искаженной сетки, находящихся вне препятствий.

В результате проведенной процедуры на карте формируется сетка, состоящая из областей обзора датчиков. После прохождения через каждый узел сетки датчик обеспечивает практически полное сканирование зоны целевого мониторинга. Как будет обсуждаться далее, фундаментальный предел покрытой площади составляет 0.75 для квадратной карты, заполненной круглыми областями обзора без перекрытия. Это означает, что площадь карты, охваченная датчиком с круглой областью обзора, будет практически полностью охвачена, то есть 75% площади карты будет просканировано. Это фундаментальное ограничение, которое нельзя преодолеть в задаче патрулирования с использованием сенсора с круглой формой области обзора. Возможным решением здесь является перекрытие областей обзора на карте местности, что неизбежно приводит к потере оптимальности патрулирования, поскольку в этом случае будут "выделенные" точки, которые датчик патрулирует более длительное время, чем другие.

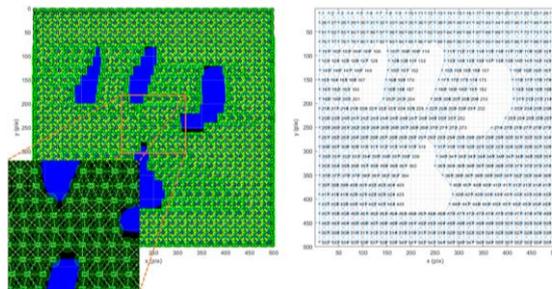


Рис. 4. (Слева) Размещение областей обзора датчиков; (Справа) соответствующий граф местности G_1

Как упоминалось выше, оптимальная траектория движения, которая минимизирует время обнаружения подвижных целей в рассматриваемой задаче, является гамильтоновым циклом. Для поиска гамильтонова цикла сетка областей обзора датчиков рассматривается как простой неориентированный граф $G_1(V_1, E_1)$ с вершинами, расположенными в соответствующих узлах сетки, то есть в центрах областей обзора датчиков. Ребра E_1 графа $G_1(V_1, E_1)$ соединяют те вершины V_1 , которые находятся на расстоянии шага датчика $|\Delta r|$ друг от друга, $|\Delta r| \leq 2R$. Граф местности $G_1(V_1, E_1)$ не содержит «петель» (i, i) и параллельных $(i, j)_k$ ребер [11].

Алгоритм поиска гамильтонова цикла. Идея алгоритма заключается в следующем. В рамках поставленной задачи патрулирования количество вершин графа местности V_1 может быть слишком велико для применения стандартного алгоритма полного перебора [23] для поиска гамильтонова цикла в режиме реального времени, указанного в данной работе как 0.1–100 секунд (3 порядка величины времени). Для преодоления проблемы размера графа предлагается следующий метод. Граф местности разбивается на так называемые кластеры, т.е. отдельные связанные графы $g_k(v_k, e_k)$, $k \in [1, n]$, $n = |V_1|/N$, $v_k \in V_1$, содержащие небольшое количество вершин N ($N=20-30$ в рамках проведенных вычислительных экспериментов), что позволяет применять стандартный алгоритм полного перебора для поиска гамильтонова пути в режиме реального времени в рамках каждого кластера (рис. 5).

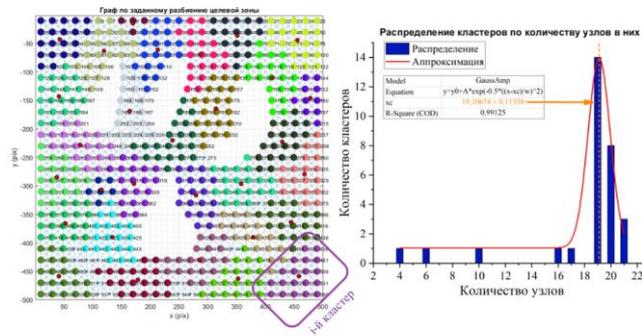


Рис. 5. (Слева) Кластеризация вершин V_1 графа местности G_1 . Цвета обозначают кластеры g_k , красные точки – "центры масс" каждого кластера g_k . (Справа) Распределение кластеров g_k по числу вершин $|v_k|$. Оно показывает, что среднее количество вершин в кластерах g_k близко к выбранному ограничивающему числу $N=21$

Разбиение графа местности $G_1(V_1, E_1)$ на кластеры $g_k(v_k, e_k)$ позволяет рассматривать набор кластеров $\{g_k(v_k, e_k)\}$ как один высокоуровневый граф $G_0(V_0, E_0)$, который может быть рассмотрен как граф местности в нулевом приближении, где кластеры $g_k(v_k, e_k)$ действуют как вершины V_0 , а рёбра E_0 соединяют вершины V_0 , соответствующие соседним кластерам (рис. 6).

В нулевом приближении можно считать, что движение датчика в рамках процедуры патрулирования осуществляется по графу $G_0(V_0, E_0)$, что обеспечивает поиск гамильтонова цикла на его вершинах в режиме реального времени благодаря низкому количеству вершин V_0 . На следующем этапе для уточнения маршрута рассматривается движение датчика в рамках каждого кластера $g_k(v_k, e_k)$. Траектория движения датчика в каждом кластере задается как гамильтонов путь $p_k(g_k)$, который позволяет сенсору двигаться от начальной вершины в k -ом кластере $g_k(v_k, e_k)$ к соединенной с k -ым кластером вершине $(k+1)$ -го кластера $g_{k+1}(v_{k+1}, e_{k+1})$. Последняя вершина становится начальной вершиной в $(k+1)$ -ом кластере. Поиск каждого гамильтонова пути $p_k(g_k)$ осуществляется с использованием стандартного алгоритма полного перебора, который благодаря низкому ($N=20-30$) количеству вершин кластера может быть реализован в режиме реального времени. Путем объединения гамильтоновых путей $p_k(g_k)$ в соответствии с гамильтоновым циклом по графу $G_0(V_0, E_0)$ строится общий гамильтонов цикл $C_1(G_1)$ по графу $G_1(V_1, E_1)$ (рис. 7).

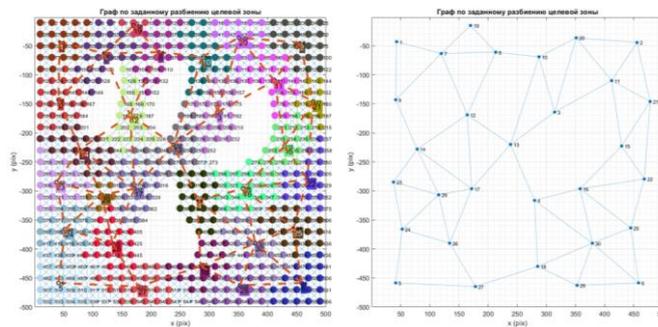


Рис. 6. (Слева) Кластеры g_k , соединенные вершинами V_0 . (Справа) соответствующий граф кластеров G_0

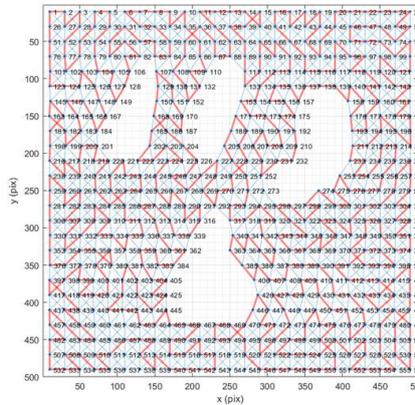


Рис. 7. Построенный гамильтонов цикл $C_1(G_1)$ на графе местности G_1

Результаты и обсуждение. Для оценки эффективности обсуждаемого подхода к поиску оптимального маршрута патрулирования предлагается, в первую очередь, оценить эффективность алгоритма покрытия карты местности, а во-вторых, сравнить временную сложность предложенного алгоритма поиска гамильтонова цикла с временной сложностью стандартного алгоритма полного перебора.

Реализация метода полного перебора, использованного в рамках обсуждаемой работы, представлена в [25]. Этот рекурсивный алгоритм на каждой итерации проверяет, может ли соседняя вершина быть добавлена в гамильтонов цикл или она уже была добавлена. Таким образом, алгоритм перебирает варианты пути и в итоге находит гамильтонов цикл, если он существует для данного графа.

Выполнение обсуждаемых алгоритмов проводилось в MATLAB R2021b (Mathworks, Natick, MA, USA) с использованием процессора 11-го поколения Intel Core i7-11800H, 2.30GHz.

Эффективность алгоритма покрытия карты местности. Для оценки эффективности алгоритма покрытия карты местности может быть использовано соотношение S_{Σ}/S_{Ω} , где S_{Σ} – общая площадь зоны мониторинга, охватываемой полями обзора датчика, S_{Ω} – общая площадь зоны мониторинга. В качестве эталонного значения этого соотношения может быть использовано значение, характеризующее покрытие квадратной зоны мониторинга неперекрывающимися полями обзора датчика (рис. 8). Значение отношения S_{Σ}/S_{Ω} в этом случае равно $\pi/4 \approx 0.75$ для каждого радиуса поля зрения датчика, вписанного в зону мониторинга.

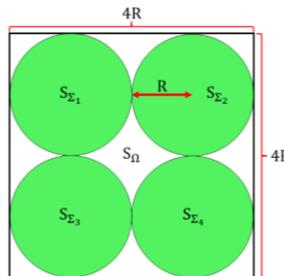


Рис. 8. Схема эталонной конфигурации патрулирования. В случае четырех полей обзора ($n=4$), который изображен на схеме, эффективность покрытия равна

$$\frac{S_{\Sigma}}{S_{\Omega}} = \frac{4 \cdot \pi R^2}{4R \cdot 4R} = \frac{\pi}{4}. \text{ В случае произвольного числа полей обзора, вписанных в зону мониторинга, эффективность также равна } \pi/4, \text{ поскольку } \frac{S_{\Sigma}}{S_{\Omega}} = \frac{n \cdot \pi R^2}{(2R \cdot \sqrt{n})^2} = \frac{\pi}{4}$$

Основываясь на этом значении, можно охарактеризовать эффективность покрытия следующим образом: $S_{\Sigma}/S_{\Omega} < 0.75$ соответствует недостаточному охвату целевой зоны мониторинга, $S_{\Sigma}/S_{\Omega} = 0.75$ соответствует максимальному охвату целевой зоны при условии отсутствия перекрытия областей обзора, $S_{\Sigma}/S_{\Omega} > 0.75$ соответствует увеличению площади охвата целевой зоны за счет перекрытия полей зрения. Таким образом, приходится выбирать между максимизацией охватываемой площади целевой зоны и минимизацией площади перекрытия полей зрения. Обсуждаемый алгоритм позволяет достичь значений S_{Σ}/S_{Ω} на уровне 0.75–0.85, что указывает на относительно низкое (отношение площади перекрытия к площади целевой зоны составляет $S_{\cap}/S_{\Sigma} \approx 0.01 - 0.03$ на карте на рис. 2) перекрытие полей зрения, что обеспечивает увеличение площади покрытия по сравнению со случаем $S_{\Sigma}/S_{\Omega} = 0.75$. Возможное усовершенствование этого алгоритма покрытия для увеличения зоны покрытия при сохранении площади перекрытия полей обзора заключается в реализации процедуры искажения сетки покрытия относительно осей x и y .

Эффективность алгоритма поиска гамильтоновой схемы. Для характеристики эффективности предлагаемого алгоритма поиска гамильтоновой схемы используется понятие временной сложности [26]. Строгий математический вывод вычислительной сложности предлагаемого алгоритма, по-видимому, с трудом поддается формализации, поскольку производительность алгоритма зависит от конфигурации карты. Однако статистический подход, который реализуется путем измерения времени выполнения алгоритма на различных картах, позволяет экспериментально определить сложность как математический закон. Именно этот подход был использован в рамках настоящей работы для установления закона роста временной сложности. Сравнение экспериментально определенной временной сложности для модифицированного алгоритма и стандартного метода полного перебора представлено на рис. 9.

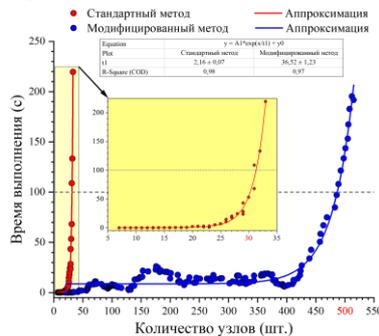


Рис. 9. Сравнение экспериментально определенной временной сложности для модифицированного алгоритма и стандартного метода полного перебора

Чтобы получить эти зависимости, алгоритмы были запущены для различных карт со случайным расположением препятствий и разными размерами зон видимости, что позволило получить различное количество вершин графа рельефа.

Как показано на Рис.9, стандартный алгоритм перебора выполняется в режиме реального времени (0.1–100 секунд) в случае графов с числом вершин до 30, в то время как предлагаемый модифицированный метод позволяет расширить этот диапазон до 500 вершин. Следует отметить, что значения 30 и 500 вершин определяют количество вершин, соответствующее увеличению времени выполнения на три порядка для стандартных алгоритмов перебора и модифицированных алгоритмов соответственно.

Оба обсуждаемых алгоритма обладают экспоненциальным законом роста временной сложности при увеличении объема входных данных, который представлен числом вершин графа рельефа V_1 . Однако константа роста t_1 (см. рис. 9) кривой временной сложности для модифицированного алгоритма значительно ниже (в $36.52/2.16 \approx 17$ раз), чем для алгоритма полного перебора. Благодаря этому факту можно увеличить более чем на порядок (с 30 до 500 вершин, примерно в $500/30 \approx 17$ раз) количество вершин графа рельефа, сохранив неизменным характер процедуры поиска в реальном времени. Таким образом, по сравнению со стандартным алгоритмом перебора использование предложенного модифицированного алгоритма позволяет значительно увеличить количество вершин графа, которые используются для поиска гамильтоновой схемы в режиме реального времени (0.1–100 с).

Заключение. В рамках настоящей работы разработан метод построения оптимального маршрута для патрулирования произвольной карты местности. Метод основан на использовании модифицированного алгоритма поиска гамильтоновой схемы на графе местности. Продемонстрировано, что предложенный метод эффективен как при охвате зоны мониторинга, поскольку обеспечивает практически полный охват участка местности, так и при поиске гамильтонового цикла на графе местности, поскольку обеспечивает увеличение скорости поиска по сравнению со стандартным методом перебора. Более того, по сравнению с методом полного перебора предложенный алгоритм поиска гамильтонового цикла позволяет более чем на порядок увеличить количество вершин графа (с 30 до 500 вершин, в $500/30 \approx 17$ раз), на котором происходит поиск в режиме реального времени (0.1–100 секунд). Предложенный подход кластеризации вершин, который используется в рамках разработанной процедуры поиска гамильтонового цикла, может быть масштабирован на графы с большим числом вершин путем рекурсивной многоуровневой кластеризации вершин графа местности.

Реализация предложенного способа в практических случаях могла бы быть следующей. Пользователь загружает 2D-карту местности в компьютерную программу, которая использует описанный алгоритм для построения траектории патрулирования. Построенный маршрут (т.е. последовательный набор 2D координат) загружается в автоматическое устройство перемещения, на котором установлен датчик. Наконец, устройство перемещения начинает патрулировать местность в соответствии с загруженным маршрутом, в то время как текущее положение устройства отслеживается, например, с помощью GPS.

Таким образом, обсуждаемый метод может быть применен как в рамках задач патрулирования местности сельскохозяйственных полей, так и в области общих задач, требующих использования быстрого алгоритма поиска гамильтонового цикла на больших графах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hammad A., Da Costa B., Soares C., and Haddad A.* The Use of Unmanned Aerial Vehicles for Dynamic Site Layout Planning in Large-Scale Construction Projects, *Buildings*, Dec. 2021, Vol. 11, No. 12, 602 p. DOI: 10.3390/buildings11120602.
2. *Nex F. and Remondino F.* UAV for 3D mapping applications: a review, *Appl. Geomat.*, Mar. 2014, Vol. 6, No. 1, pp. 1-15. DOI: 10.1007/s12518-013-0120-x.
3. *Eun J., Song B.D., Lee S., and Lim D.-E.* Mathematical Investigation on the Sustainability of UAV Logistics, *Sustainability*, Oct. 2019, Vol. 11, No. 21, 5932 p. DOI: 10.3390/su11215932.
4. *Joshi G.P., Alenezi F., Thirumoorthy G., Dutta A.K., and You J.* Ensemble of Deep Learning-Based Multimodal Remote Sensing Image Classification Model on Unmanned Aerial Vehicle Networks, *Mathematics*, Nov. 2021, Vol. 9, No. 22, 2984 p. DOI: 10.3390/math9222984.
5. *Lindner G., Schraml K., Mansberger R., and Hübl .* 'UAV monitoring and documentation of a large landslide', *Appl. Geomat.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–11, Mar. 2016, doi: 10.1007/s12518-015-0165-0.

6. *érez-Álvarez R., Sedano-Cibrián ., De Luis-Ruiz .M., Fernández-Maroto G., and Pereda-García R.* Mining Exploration with UAV, Low-Cost Thermal Cameras and GIS Tools—Application to the Specific Case of the Complex Sulfides Hosted in Carbonates of Udías (Cantabria, Spain), *Minerals*, Jan. 2022, Vol. 12, No. 2, 140 p. DOI: 10.3390/min12020140.
7. *Kloepper L.N. and Kinniry M.* Recording animal vocalizations from a UAV: bat echolocation during roost re-entry, *Sci. Rep.*, May 2018, Vol. 8, No. 1, 7779 p. DOI: 10.1038/s41598-018-26122-z.
8. *Chodorek A., Chodorek R.R., and Yastrebov A.* Weather Sensing in an Urban Environment with the Use of a UAV and WebRTC-Based Platform: A Pilot Study, *Sensors*, Oct. 2021, Vol. 21, No. 21, 7113 p. DOI: 10.3390/s21217113.
9. *Su J., Zhu X., Li S., and Chen W.-H.* AI meets UAVs: A survey on AI empowered UAV perception systems for precision agriculture, *Neurocomputing*, Jan. 2023, Vol. 518, pp. 242-270. DOI: 10.1016/j.neucom.2022.11.020.
10. *Radoglou-Grammatikis P., Sarigiannidis P., Lagkas T., and Moscholios I.* A compilation of UAV applications for precision agriculture, *Comput. Netw.*, May 2020, Vol. 172, 107148 p. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107148.
11. *Chen W.K.* *Applied Graph Theory*. in North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics. Elsevier Science, 2012. [Online]. Available: <https://books.google.ru/books?id=kAcBm96mUvsC>.
12. *Pasqualetti F., Franchi A., and Bullo F.* On Cooperative Patrolling: Optimal Trajectories, Complexity Analysis, and Approximation Algorithms, *IEEE Trans. Robot.*, Jun. 2012, Vol. 28, No. 3, pp. 592-606. DOI: 10.1109/TRO.2011.2179580.
13. *Portugal D. and Rocha R.* MSP algorithm: multi-robot patrolling based on territory allocation using balanced graph partitioning, in *Proceedings of the 2010 ACM Symposium on Applied Computing*, Sierre Switzerland: ACM, Mar. 2010, pp. 1271-1276. DOI: 10.1145/1774088.1774360.
14. *Elor Y. and Bruckstein A.M.* Multi-a(ge)nt Graph Patrolling and Partitioning, in *2009 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*, Milan, Italy: IEEE, 2009, pp. 52-57. DOI: 10.1109/WI-IAT.2009.125.
15. *Legovich Yu.S., Diane S.A.K., and Rusakov K.D.* Integration of modern technologies for solving territory patrolling problems with the use of heterogeneous autonomous robotic systems, in *2018 11th International Conference 'Management of large-scale system development' (MLSD)*, Moscow: IEEE, Oct. 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/MLSD.2018.8551884.
16. *Caraballo L. ., Díaz-Báñez .M., Fabila-Monroy R., and Hidalgo-Toscano C.* Stochastic strategies for patrolling a terrain with a synchronized multi-robot system, *Eur. J. Oper. Res.*, Sep. 2022, Vol. 301, No. 3, pp. 1099-1116. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.11.049.
17. *Basak A., Fang F., Nguyen T.H., and Kiekintveld C.* Abstraction Methods for Solving Graph-Based Security Games, in *Autonomous Agents and Multiagent Systems*, N. Osman and C. Sierra, Eds., in Lecture Notes in Computer Science. Vol. 10003. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 13-33. DOI: 10.1007/978-3-319-46840-2_2.
18. *Pan J.-S., Song P.-C., Chu S.-C., and Peng Y.-J.* Improved Compact Cuckoo Search Algorithm Applied to Location of Drone Logistics Hub, *Mathematics*, Mar. 2020, Vol. 8, No. 3, 333 p. DOI: 10.3390/math8030333.
19. *Li Y., Zhang W., Li P., Ning Y., and Suo C.* A Method for Autonomous Navigation and Positioning of UAV Based on Electric Field Array Detection, *Sensors*, Feb. 2021, Vol. 21, No. 4, 1146 p. DOI: 10.3390/s21041146.
20. *Raymond A.S.* Stratigraphic sedimentary inversion using paths in graphs, 2017.
21. *Goncharenko V.L., Kochkarov A.A., Yatskin D.V., and Rumiantsev B.V.* Modeling the Detection of Moving Objects by Means of a Spatially Distributed Continuous Monitoring System with a Dynamic Structure, *Adv. Syst. Sci. Appl.*, 2022, Vol. 2, 110 p. DOI: 10.25728/ASSA.2022.22.2.1147.
22. *Luo, Zhang, Wang, Wang, and Meng.* Traffic Patrolling Routing Problem with Drones in an Urban Road System, *Sensors*, Nov. 2019, Vol. 19, No. 23, 5164 p. DOI: 10.3390/s19235164.
23. *Deineko V.G., Klinz B., and Woeginger G.J.* Exact algorithms for the Hamiltonian cycle problem in planar graphs, *Oper. Res. Lett.*, May 2006, Vol. 34, No. 3, pp. 269-274. DOI: 10.1016/j.orl.2005.04.013.
24. *Deogun J.S. and Steiner G.* Polynomial Algorithms for Hamiltonian Cycle in Cocomparability Graphs, *SIAM J. Comput.*, Jun. 1994, Vol. 23, No. 3, pp. 520-552. DOI: 10.1137/S0097539791200375.

25. Biswas P. Hamiltonian (Graph, Source, Destination). in MATLAB Central File Exchange. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/51610-hamiltonian-graph-source-destination>.
26. Sipser M. Introduction to the Theory of Computation, *ACM Sigact News*, 1996, Vol. 27, No. 1, pp. 27-29.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.О. Жуков.

Румянцев Борис Вадимович – Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; e-mail: rymbor17@gmail.com; г. Москва, Россия; аспирант.

Прокопчина Светлана Васильевна – e-mail: svprokopchina@fa.ru; д.т.н.; профессор.

Кочкаров Азрет Ахматович – e-mail: akochkar@gmail.com; д.т.н.; профессор.

Rumiantsev Boris Vadimovich – Financial University under the Government of the Russian Federation; e-mail: rymbor17@gmail.com; Moscow, Russia.

Prokopchina Svetlana Vasilyevna – e-mail: svprokopchina@fa.ru; dr. of eng. sc.; professor.

Kochkarov Azret Akhmatovich – e-mail: akochkar@gmail.com; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.93

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-88-100

Л.А. Рыбак, А.А. Волошкин, В.С. Перевузник, Д.И. Малышев
ОПТИМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ
РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ
МЕХАНОТЕРАПИИ НА БАЗЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ*

Анализ состояния исследований показал, что в настоящее время восстановительная механотерапия широко применяется для реабилитации больных с функциональными нарушениями опорно-двигательной системы, вызванными последствиями сосудистых заболеваний, нарушений нейрорегуляции двигательной активности, травм и патологии опорно-двигательного аппарата. В восстановительной механотерапии чаще всего используют роботы последовательной структуры, которые обладают необходимой рабочей областью, но при этом имеют низкую грузоподъемность, в результате чего приходится масштабировать систему. Отличным решением для реализации механотерапии на основе робототехнических средств являются роботы параллельной структуры. В статье представлены структура и модель в двух вариантах исполнения: одномодульный роботизированный комплекс (РТК) для реабилитации одной конечности и двухмодульный роботизированный комплекс для реабилитации обеих конечностей. Каждый модуль включает активный 3-PRRR манипулятор для перемещения стопы пациента и пассивный ортез на базе RRR механизма для поддержки нижней конечности. На основе клинических аспектов в области реабилитации сформулированы требования к разрабатываемому РТК для реабилитации нижних конечностей с учетом антропометрических данных пациентов. Разработана математическая модель, описывающая зависимость положений звеньев активных и пассивных механизмов двух модулей от углов в шарнирах пассивного ортеза с учетом вариантов креплений кинематических цепей активных манипуляторов к подвижным платформам и их конфигураций. Разработан метод параметрического синтеза гибридной робототехнической системы модульной структуры с учетом сформированных уровней параметрических ограничений в зависимости от эргономичности и технологичности конструкции на основе критерия в виде свёртки, включающей два компонента, один из которых основан на минимизации недостижимых точек траектории с учетом особенностей антропометрических данных, а другой –

*Данная работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта FZWN-2020-0017. С использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

на компактности конструкции. Разработан цифровой двойник РТК и подвесной предохранительный механизм в составе РТК с использованием средств САД/САЕ системы NX. Проектирование пассивного RRR механизма выполнено путем реверсивного инжиниринга с использованием 3D сканирования. Представлены результаты математического моделирования, а также результаты анализа.

Тренажерный комплекс; виртуальная модель; 3-PRRR манипулятор; прямая задача кинематики; параметрический синтез.

L.A. Rybak, A.A. Voloshkin, V.S. Pervuznik, D.I. Malyshev

OPTIMAL SYNTHESIS OF THE STRUCTURE AND PARAMETERS OF A ROBOTIC SYSTEM FOR REGENERATIVE MECHANOTHERAPY BASED ON PARALLEL MECHANISMS

An analysis of the state of research has shown that currently restorative mechanotherapy is widely used in the rehabilitation of patients with functional disorders of the musculoskeletal system caused by the consequences of vascular diseases, disorders of neuroregulation of motor activity, injuries and pathology of the musculoskeletal system. In restorative mechanotherapy, I most often use robots of a sequential structure that have the necessary working area, but at the same time have a low load capacity, as a result of which the system has to be scaled. Parallel robots are an excellent solution for the implementation of mechanotherapy based on robotic tools. The article presents the structure and model in two versions: a single-module robotic complex (RTC) for the rehabilitation of one limb and a two-module robotic complex for the rehabilitation of both limbs. Each module includes an active 3 - PRRR manipulator to move the patient's foot and a passive orthosis based on an RRR mechanism to support the lower limb. Based on the clinical aspects in the field of rehabilitation, the requirements for the developed RTC for the rehabilitation of the lower limbs are formulated, taking into account the anthropometric data of patients. A mathematical model has been developed describing the dependence of the positions of the links of the active and passive mechanisms of the two modules on the angles in the joints of the passive orthosis, taking into account the options for attaching kinematic chains of active manipulators to mobile platforms and their configurations. A method of parametric synthesis of a hybrid robotic system of modular structure has been developed, taking into account the formed levels of parametric constraints depending on the ergonomics and manufacturability of the design based on a criterion in the form of a convolution comprising two components, one of which is based on minimizing unattainable trajectory points taking into account the features of anthropometric data, and the other on the compactness of the design. A digital RTC twin and an outboard safety mechanism as part of the RTC have been developed using CAD/CAE tools of the NX system. The design of the passive RRR mechanism was carried out by reverse engineering using 3D scanning. The results of mathematical modeling, as well as the results of analysis, are presented.

Simulator; virtual model; 3-PRRR manipulator; direct kinematics problem; parametric synthesis.

Введение. В настоящее время в текущей геополитической ситуации и в практическом здравоохранении существует ряд задач, оптимальным способом решения которых является применение роботизированных средств. Особенно актуально применение РТК в целях быстрого восстановления пациентов, получивших различного рода травмы нижних конечностей, в том числе военнослужащих. Задачи восстановительной механотерапии касаются не только лечения и реабилитации пострадавших военнослужащих с нарушением опорно-двигательного аппарата, но и осуществления функций их самообслуживания, социальной адаптации, а также восстановления двигательных функций у пациентов, перенесших эндопротезирование суставов. К протезированию прибегают тогда, когда поврежденные части тела не могут быть восстановлены другими способами. Имплантатами замещают клапаны сердца, участки сосудов, части внутренних органов, связки, сухожилия, кости, суставы. Под термином «эндопротезирование» чаще всего подразумевают операцию по замене элементов опорно-двигательного аппарата, установление функциональных искусственных суставов пациентам с прогрессирующим разрушением хрящевой ткани. Операция позволяет избежать инвалидизации. Грамотно

проведенное вмешательство и послеоперационное восстановление возвращает больных к полноценной активной жизни. Ежегодно в мире выполняется около 500000 операций эндопротезирования суставов нижних конечностей и потребность в этих операциях постоянно возрастает, что свидетельствует о значительной актуальности этой проблемы [1, 2]. Хорошие результаты оперативного лечения достигаются в том числе благодаря проведению реабилитации, в которой нуждаются все больные в послеоперационном периоде для закрепления и улучшения полученного эффекта. Реабилитационные мероприятия имеют особую актуальность после эндопротезирования тазобедренного сустава для больных с множественным поражением суставов, заболеванием контралатерального сустава, сопутствующей соматической и неврологической патологией, двухсторонним, бесцементным или ревизионным эндопротезированием, стойким болевым синдромом и незначительным улучшением функционального состояния после операции, контрактурой коленного сустава [3]. Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что в пред- и послеоперационном периодах применяются различные методики реабилитации [4] с акцентом на методы функциональной терапии (лечебная гимнастика, гидрокинезотерапия и др.) Реабилитационные мероприятия пациентам осуществляются в соответствии с утвержденными принципами: раннее начало (12-48 часов), комплексность, обоснованность, индивидуальный характер, этапность, преемственность, мультидисциплинарный характер, длительность до сохранения положительной динамики. Проведенные исследования демонстрируют сложность построения универсальной системы для реабилитации. Каждый пациент имеет свои особенности и ошибки при восстановлении здоровой походки при эндопротезировании бедра и колена [5]. Можно отметить, что значительную часть упражнений возможно выполнять при помощи РТК, при этом исправление ошибок при реабилитации возможно будет исправлять, внося в программу корректировки.

В настоящее время существует множество устройств для реабилитации нижних конечностей [6–12]. Среди известных моделей роботизированных систем механотерапии, можно выделить такие, как BioDex, Cybex Humac Norm и Ekso Bionics Ekso (все – США), LOKOMAT®PRO (Швейцария), Amadeo и ReWalk (Израиль), Cyberdyne HAL (Япония) [13–15]. В России налажено производство тренажеров и экзоскелетов ОРМЕД и ЭкзоАтлет. Для восстановления локомоторной функции всей нижней конечности применяются – EriGo, Lokomat, Lokohelp, Rehabot, GaitTrainer, Lopes и другие роботизированные устройства. В механотерапии восстановление двигательной функции пациента осуществляется за счет движущихся элементов реабилитационной системы. Авторы в предыдущих работах [16,17] уже рассматривали проектирование тренажерного комплекса (ТК) для реабилитации нижних конечностей на основе робота параллельной структуры. Однако эти работы учитывают, как правило, реабилитацию только одной конечности или одного сустава конечности. В этой статье рассмотрены варианты оптимизации и проектирования РТК для реабилитации как одной, так и двух конечностей.

Требований к конструктивным параметрам. Геометрические параметры тренажера должны обеспечивать заданную траектории движения конечности, которая строится на основе повторения движений, соответствующих походке человека и отведению конечности в тазобедренном суставе.

Под имитацией походки будем понимать движение каждой из конечностей в соответствии со следующим законом:

$$\alpha_i(t) = 0.5(\alpha_{max} + \alpha_{min} + \sin(t + 180^\circ(i - 1))(\alpha_{max} - \alpha_{min})). \quad (1)$$

$$\beta_i(t) = 0.5(\beta_{max} + \beta_{min} - \cos(t + 180^\circ(i - 1))(\beta_{max} - \beta_{min})), \quad (2)$$

где i – индекс конечности (1 – левая, 2 – правая), α_{min} , α_{max} – минимальный и максимальный угол сгибания тазобедренного сустава, β_{min} , β_{max} – коленного сустава. Для увеличения рабочего диапазона отработки сгибания тазобедренного сус-

тава α_{min} был принят равным $\alpha_{min} = -20^\circ$. Остальные ограничения углов в суставах были приняты в соответствии с клиническими сведениями выше, т.е. $\alpha_{max} = 20^\circ, \beta_{min} = -60^\circ, \beta_{max} = 0^\circ$.

Предлагаемая система должна обеспечивать возможность реабилитации пациентов с различными антропометрическими данными. На рисунке 1а представлены основные антропометрические данные конечностей на основе статистических данных в соответствии с ГОСТ 56620.2-2015 (ISO/TR 7250-2:2010). Исходя из толщины ортеза ноги человека, равной 15 мм, ширина бедра принята больше на 30 мм ($15 \text{ мм} \cdot 2$), а окружность бедра больше на 95 мм ($15 \text{ мм} \cdot 2 \cdot \pi = 94,25 \text{ мм}$). Учитывая увеличенную толщину ортеза для голени стопы, равную 30 мм с учётом возможности добавления дополнительных предохранительных элементов, окружность икроножной мышцы увеличена на 188 мм, длина стопы на 30 мм, а ширина стопы на 60 мм. Также с учётом возможности добавления предохранительных конструктивных элементов длина голени увеличена на 200 мм. С учётом полученных размеров, были построены графики изменения положения центра голеностопного сустава в процессе движения по сформированной траектории (рис. 1,б).

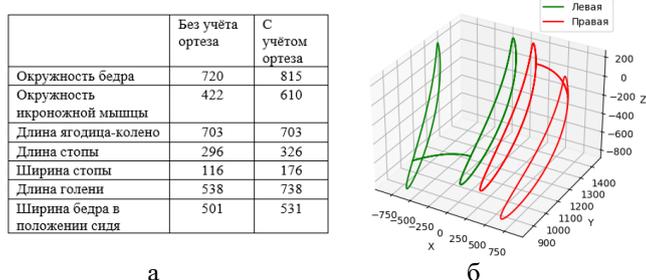


Рис. 1. Требования к геометрическим параметрам; а – антропометрические данные конечностей; б – траектория движения центра голеностопного сустава

Рассмотрим структуру предлагаемого РТК, которая будет обеспечивать возможность движения по сформированной траектории.

Структура и математическая модель. Предлагаемый РТК представляет собой систему для реабилитации одной конечности, включающую один модуль выполненный на базе активного 3-PRRR механизма параллельной структуры, обеспечивающего перемещение закрепленной стопы пациента, и плоского RRRR механизма последовательной структуры в качестве пассивного ортеза для поддержания нижней конечности (рис. 2,а), в случае двухмодульной структуры состоит из двух идентичных модулей (рис. 2,б). Взаимное перемещение выходных звеньев двух манипуляторов позволяют выполнять имитацию походки здорового человека.

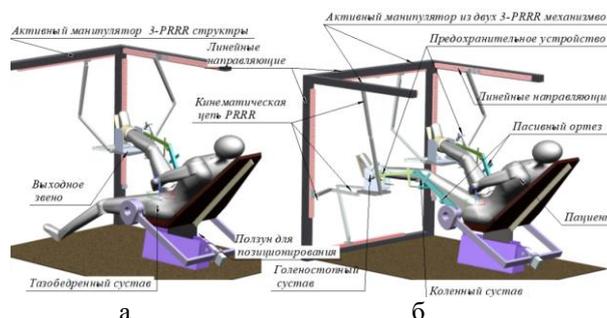


Рис. 2. 3D модель РТК: а – с одним модулем для реабилитации; б – с двумя модулями для реабилитации.

Рассмотрим структуру двухмодульной робототехнической системы (рис. 3). На рисунке I – левый модуль для реабилитации левой конечности, II – для реабилитации правой конечности. Механизм 3-PRRR, который обеспечивает перемещение конечности пациента за счет активных приводов, состоит из трех кинематических цепей, неподвижного основания и подвижной платформы. 3-PRRR механизм (триптерон), обеспечивает необходимые степени свободы (поступательные перемещения по трём осям) и отсутствие особых положений, так как матрица Якоби механизма является единичной. Каждая цепь содержит одну приводную поступательную пару (P) и три вращательных шарнира (R). Линейные приводы соединены с активными линейными поступательными парами, которые в свою очередь соединены с направляющими и пассивными RRR-цепями, соединенными с подвижной платформой. Конфигурации кинематических цепей $A_{ij}B_{ij}C_{ij}D_{ij}$ (здесь и далее в формулах i – индекс модуля: 1 – левый модуль, 2 – правый модуль, j – индекс кинематических цепей активных манипуляторов) являются вариативными, что означает возможность выгибания цепей в различных направлениях. Каждая из цепей имеет 2 возможные конфигурации, обозначенные как l_{ij} . Также представленная структура в сравнении с одномодульной предполагает использование формы платформ $D_{i1}D_{i2}D_{i3}$ не в виде правильного треугольника, а в виде прямоугольного треугольника с вариативностью вариантов крепления кинематических цепей к платформе. Это предполагает, что шарниры D_{ij} могут располагаться с различной стороны относительно центра платформы (D_{i1} может располагаться как в отрицательном, так и в положительном направлении вдоль оси Y, D_{i2} – вдоль оси X, D_{i3} – вдоль оси Z). Активный манипулятор связан с пассивным ортезом через звено GP, соединяющее шарнир G голенистоного сустава пассивного ортеза и центр P подвижной платформы активного манипулятора. Каждый из пассивных отрезков включает в себя 4 вращательных шарнира, два из которых соответствуют тазобедренному суставу (E_i с углами α_i сгибания/разгибания и γ_i отведения/приведения сустава), один коленному (F_i с углом β_i сгибания/разгибания сустава) и один голенистоному (G_i с углом θ_i сгибания/разгибания сустава). Точка, соответствующая носку стопы человека обозначена как H_i . Взаимное расположение активного манипулятора и пассивного ортеза, а также взаимное расположение двух активных манипуляторов, определяются значением двух постоянных координат каждой из направляющих активного манипулятора относительно базовой системы координат, расположенной в центре таза пациента. На рис. 3 наглядно видно влияние изменения координат направляющих на конфигурацию системы на примере второй направляющей левого модуля (A_{12}), имеющей меньшее значение координаты Z в сравнении с первой направляющей (A_{11}) модуля левой ноги и первой и второй направляющей модуля правой ноги (A_{21} и A_{22}).

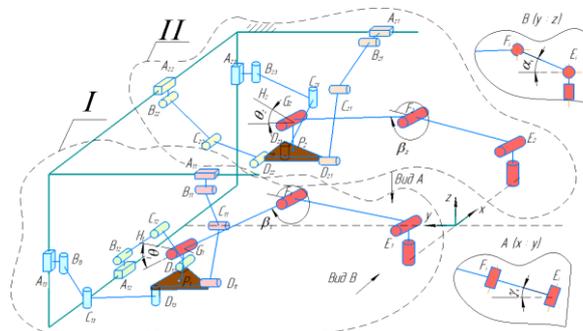


Рис. 3. Расчетная схема реабилитационной системы:
(I – левый модуль для левой конечности; II – правый модуль для правой конечности)

Геометрические параметры разрабатываемой системы должны обеспечивать достижимость всех точек траекторий реабилитационных процедур. Для проверки достижимости положения РТК с учётом пересечений звеньев требуется определить положение всех звеньев активного манипулятора и пассивного ортеза. Входными данными при этом являются размеры звеньев и углы в суставах пациента: α_i сгибания тазобедренного сустава, γ_i отведения тазобедренного сустава, β_i сгибания коленного сустава и θ_i сгибания голеностопного сустава. В этом случае координаты центров шарниров E_i определим как

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} -L_{OE} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} L_{OE} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

С учётом углов α_i и γ_i координаты центров шарнира F_i определим как

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{E}_i + \begin{bmatrix} L_{EF} \cos \alpha_i \sin \gamma_i \\ L_{EF} \cos \alpha_i \cos \gamma_i \\ L_{EF} \sin \alpha_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

С учётом угла β_i координаты центров шарниров G_i определим как

$$\mathbf{G}_i = \mathbf{F}_i + \begin{bmatrix} L_{FG} \cos(\alpha_i + \beta_i) \sin \gamma_i \\ L_{FG} \cos(\alpha_i + \beta_i) \cos \gamma_i \\ L_{FG} \sin(\alpha_i + \beta_i) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

С учётом угла θ_i координаты крайней точки звена $G_i H_i$, соответствующего стопе человека определим как

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{G}_i + \begin{bmatrix} L_{GH} \cos(\alpha_i + \beta_i + \theta_i) \sin \gamma_i \\ L_{GH} \cos(\alpha_i + \beta_i + \theta_i) \cos \gamma_i \\ L_{GH} \sin(\alpha_i + \beta_i + \theta_i) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Координаты центров P_i подвижных платформ активных манипуляторов определим как:

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{G}_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -L_{GP} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Под центром P_i подвижных платформ при этом понимается точка, которая располагается по осям X и Y в центре окружности, вписанной в треугольник платформы с катетами d_x и d_y , а по оси Z в середине платформы, имеющей толщину d_z .

Для определения координат центров шарниров D_{ij} рассмотрим варианты крепления кинематических платформ. Обозначим варианты закрепления шарнира D_{ij} переменной p_{ij} , которая может принимать значение 1 (в случае закрепления в отрицательном направлении по соответствующей оси координат относительно прямого угла) или 2 (в положительном направлении). Для использования значений 1 и 2 в формулах координат шарниров введём следующую функцию, которая в случае аргумента 1 возвращает значение -1, а в случае аргумента 2 возвращает значение 1:

$$\lambda(x) = (2x - 3). \quad (6)$$

С учётом (6) координаты центров шарниров центров D_{ij} определим как

$$\mathbf{D}_{i1} = \mathbf{P}_i + \begin{bmatrix} -r\lambda(p_{i2}) \\ (d_y - r)\lambda(p_{i1}) \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{D}_{i2} = \mathbf{P}_i + \begin{bmatrix} (d_x - r)\lambda(p_{i2}) \\ -r\lambda(p_{i1}) \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{D}_{i3} = \mathbf{P}_i + \begin{bmatrix} -r\lambda(p_{i2}) \\ -r\lambda(p_{i1}) \\ \frac{d_z\lambda(p_{i3})}{2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где j – индекс кинематических цепей активных манипуляторов: 1 – цепь с линейным перемещением направляющей по оси Y, 2 – X, 3 – Z r – радиус вписанной ок-

ружности платформы, который определим по формуле $r_i = \frac{d_{xi} + d_{yi} - \sqrt{d_{xi}^2 + d_{yi}^2}}{2}$

Координаты центров шарниров B_{ij} по двум измерениям зависят от положения направляющих (координаты, не зависящие от положения платформы) и по третьему соответствуют координате центра шарнира D_{ij} , т.е.

$$\mathbf{B}_{i1} = \begin{bmatrix} x_{Bi1} \\ y_{Di1} \\ z_{Bi1} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{i2} = \begin{bmatrix} x_{Di2} \\ y_{Bi2} \\ z_{Bi2} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{i3} = \begin{bmatrix} x_{Bi3} \\ y_{Bi3} \\ z_{Di3} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Обозначим варианты конфигураций кинематических цепей как l_{ij} принимают значение 1 и 2 в соответствии с рис. 3,а. Учитывая, что центр шарнира C_{ij} располагается на пересечении окружности с центром B_{ij} и радиусом L_{BCij} и окружности с центром D_{ij} и радиусом L_{CDij} , то координаты C_{ij} можно определить как

$$\mathbf{C}_{i1} = \begin{bmatrix} \frac{x_{Bi1} + s_{i1}(x_{Di1} - x_{Bi1}) - \lambda(l_{i1})g_{i1}(z_{Di1} - z_{Bi1})}{L_{BDi1}} \\ y_{Di1} \\ \frac{z_{Bi1} + s_{i1}(z_{Di1} - z_{Bi1}) + \lambda(l_{i1})g_{i1}(x_{Di1} - x_{Bi1})}{L_{BDi1}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $s_{ij} = \frac{L_{BCij}^2 - L_{CDij}^2 + L_{BDij}^2}{2L_{BDij}}$, $g_{ij} = \sqrt{L_{BCij}^2 - s_{ij}^2}$, $L_{BDij} = \|\mathbf{D}_{ij} - \mathbf{B}_{ij}\|$, $x_{Dij}, y_{Dij}, z_{Dij}$ – координаты центров шарниров D.

Координаты шарниров C_{i2} и C_{i3} определяются аналогичным образом. При этом в отличие от C_{i1} , для которого есть вариативность координат по оси X и Y, для C_{i2} – вариативность по осям Y и Z, C_{i3} – X и Z.

Для обеспечения работоспособности и достижимости, требуемых для реабилитационного процесса положений рабочих платформ двух модулей в пространстве, исключая при этом возможные их столкновения в процессе функционирования и взаимные пересечения при наличии большого количества звеньев двух модулей необходимо обеспечить условие, определяющее эти критерии. Для этого, используя полученные выражения для координат центров шарниров (1-10), выполним проверку ориентации механизмов на возможные пересечения их звеньев. Для звеньев, соединённых посредством шарниров, проверка пересечений может быть выполнена посредством вычисления значения угла между звеньями и его сопоставления с минимально допустимым значением. Для звеньев, не соединённых между собой, пересечения могут быть проверены с использованием геометрического подхода, рассмотренного в [18].

Запишем условие недостижимости положения подвижной платформы, выраженное длинами звеньев активного манипулятора, которое имеет вид

$$L_{BDij} > L_{BCij} + L_{CDij}, \quad (11)$$

где $L_{BDij} = \|\mathbf{D}_{ij} - \mathbf{B}_{ij}\|$

Полученное неравенство будем далее использовать для решения задач параметрического синтеза и выбора оптимальных конфигураций РТК.

Постановка задачи оптимизации и численное моделирование.

1. Выбор параметров оптимизации, которые включает как непрерывные, так и дискретные.

1.1. В качестве непрерывных параметров оптимизации используем длины звеньев L_{BCij} , L_{CDij} , положения направляющих x_{Bi1} , z_{Bi1} , y_{Bi1} , z_{Bi1} , x_{Bi3} , y_{Bi3} и горизонтальные размеры платформ.

1.2. В качестве дискретных параметров используем варианты p_{ij} креплений кинематических цепей к подвижным платформам посредством шарниров D_{ij} и варианты l_{ij} конфигураций кинематических цепей.

2. Выбор критерия оптимизации. В связи с тем, что в результате оптимизации необходимо определить геометрические параметры, при которых обеспечена компактность конструкции, тогда критериальную функцию запишем в виде

$$F = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 (L_{BCij} + L_{CDij}) \rightarrow \min.$$

3. Ограничением оптимизации является достижимость всех точек траектории, описанной ранее в разделе 2 и отсутствие пересечений для каждой из этих точек, т.е.

$$N^- = 0,$$

где N^- – количество точек траектории в дискретной форме с учётом заданной точности Δt , которые недостижимы.

Ввиду значительного сокращения области допустимых значений параметров и вследствие ограничения оптимизации, а также возможности использования ограничения в составе критериальной функции в виде $N^- \rightarrow \min$, исключим ограничение оптимизации, однако учтём его в критериальной функции

$$F' = \vartheta \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 (L_{BCij} + L_{CDij}) + N^- + \rho(1 - \vartheta) \rightarrow \min, \quad (12)$$

где, ρ – заданный коэффициент штрафа, ϑ – функция Хэвисайда:

$$\vartheta = \begin{cases} 1, & \text{если } N^- = 0 \\ 0 & \text{– иначе} \end{cases}.$$

В качестве алгоритма оптимизации используем параллельную модификацию PSO алгоритма [19], который успешно зарекомендовал себя для решения широкого круга оптимизационных задач.

Введём дополнительные ограничения, связанные с эргономикой и технологичностью конструкции: ограничение на равенство координат Y всех направляющих, то есть $y_{B12} = y_{B13} = y_{B22} = y_{B23}$, а также равенство координат X направляющих для левой и правой ноги, т.е. $x_{B11} = x_{B13}$ и $x_{B21} = x_{B23}$.

Ограничения на основе диапазонов переменных координат направляющих, предполагающие расположение направляющих для каждой из цепей в пределах 300 мм выше или ниже диапазона изменения переменных координат направляющих.

$$\begin{cases} z_{Bij} \in [z_{Bi3} - 300; z_{Bi3}] \vee z_{Bij} \in [z_{Bi3}; z_{Bi3} + 300], j \in 1,2, \\ x_{B1j} \in [x_{B12} - 300; x_{B12}], x_{B2j} \in [x_{B22}; x_{B22} + 300], j \in 1,3, \\ y_{Bij} \in [y_{Bi1}; y_{Bi1} + 300], j \in 2,3, \end{cases}$$

где x_{Bi2} и x_{Bi2} – границы диапазона перемещения x_{Bi2} направляющих, z_{Bi3} и z_{Bi3} – диапазона z_{Bi3} , y_{Bi1} – верхняя граница диапазона перемещения y_{Bi1} .

Ограничение на равенство длин звеньев модулей $L_{BC1j} = L_{BC2j}$, $L_{CD1j} = L_{CD2j}$.

Назначим исходные данные платформы и параметры оптимизации алгоритма. Назначим исходные данные платформы и параметры оптимизации алгоритма. Исходя из перпендикулярного расположения стопы относительно голени, примем угол в голеностопных суставах $\theta_i = 90^\circ$. Размеры звеньев пассивных ортезов заданы в соответствии с антропометрическими данными согласно рисунку 1а. L_{OE} определим как половину разницы ширины и диаметра бедра, то есть $L_{OE} = (531 - 260)/2 = 135,5$ мм, $L_{EF} = 703$ мм, $L_{FG} = 738$, $L_{GH} = 326$, диаметры звеньев ортеза $d_{EF} = 259$ мм, $d_{FG} = 194$ мм, $L_{GH} = 176$ мм.

Диаметры звеньев активных манипуляторов примем равными $d_{link} = 80$ мм. Для обеспечения возможности движения $C_{i3}D_{i3}$ под платформой без столкновения со звеньями $C_{i1}D_{i1}$ и $C_{i2}D_{i2}$ должно выполняться условие $d_Z > 2d_{link}$, следовательно примем размер $d_Z = 170$ мм. Размер L_{GP} для исключения столкновений между звеньями ортезов и звеньями $C_{i3}D_{i3}$ вычислим как: $L_{GP} = d_{FG} + 1,1d_{link} + 0,5d_Z = 270$ мм.

Диапазоны параметры оптимизации:

1. Непрерывные: размеры звеньев: $L_{BCij} \in [200; 900]$, $L_{CDij} \in [200; 900]$.

♦ координаты направляющих:

$x_{B11} \in [-2000; -50]$, $z_{B11} \in [-1500; 1500]$, $y_{B12} \in [0; 2000]$,

$z_{B12} \in [-1500; 1500]$, $x_{B13} \in [-50; 2000]$, $y_{B13} \in [0; 2000]$,

$x_{B21} \in [50; 2000]$, $z_{B21} \in [-1500; 1500]$, $y_{B22} \in [0; 2000]$,

$z_{B22} \in [-1500; 1500]$, $x_{B23} \in [50; 2000]$, $y_{B23} \in [0; 2000]$,

♦ размеры платформ:

$d_x \in [100; 300]$, $d_y \in [100; 300]$.

2. Дискретные: варианты креплений кинематических цепей к подвижным платформам $p_{ij} \in 1,2$.

♦ варианты конфигураций кинематических цепей $l_{ij} \in 1,2$.

Шаг времени при проверке точек траектории $\Delta t = 5$, коэффициент штрафа $\rho = 100000$. Параметры алгоритма PSO: количество особей в начальной популяции $N = 10000$, число поколений $W = 4$, число групп $G = 2$, значения свободных параметров $\alpha_{PSO} = 0,7$, $\beta_{PSO} = 1,4$, $\gamma_{PSO} = 1,4$. Для повышения эффективности каждая из итераций поиска оптимальных конфигураций выполняется в два этапа. На первом этапе выполняется поиск оптимального решения с исходными диапазонами параметров, на втором этапе диапазон каждого из параметров уменьшается в 5 раз, а центр новых диапазонов совпадает с лучшим найденным решением по результату первого этапа.

Для выполнения оптимизации разработан программный комплекс, включающий модуль оптимизации на языке программирования C++ с использованием параллельных вычислений для одновременного вычисления критериальной функции различных особей популяции PSO алгоритма, а также модули визуализации на языке Python, которые позволяют построить графики изменения положения центров шарниров и визуализировать движение ТК с учётом пересечений для проверки оптимальных конфигураций. Выполнено 10 итераций оптимизации. В каждой из итераций получен оптимальный набор параметров, которые представлены на рис. 4,а. Для верификации полученной оптимальной конфигурации выполнена визуализация отработки движения по сформированной траектории (рис. 4,б).

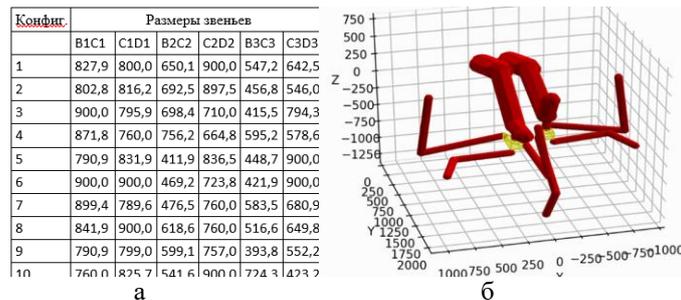


Рис. 4. Оптимальные конфигурации: а – таблица значений; б – визуализация выбранной конфигурации

Исходя из незначительной разницы критериальной функции при существенном увеличении показателей технологичности и эргономичности, выберем конфигурацию 9 в качестве окончательной для изготовления прототипа.

Цифровое проектирование и прототипирование. На основе полученных геометрических параметров построен 3D модель тренажерного комплекса для восстановительной механотерапии, при помощи САПР системы NX в двух вариациях с одним модулем (рис. 5,а) и двумя модулями (рис. 5,б).

Обеспечение безопасности пациента во время активной реабилитации обеспечено за счет установки подвешного механизма с упругими элементами, которое демпфирует избыточную нагрузку со стороны активного манипулятора (рис. 5,в). Шарниры А и В жестко закреплены на голенистоопной части ортеза, которую считаем условно неподвижной. Силы со стороны активного манипулятора прикладываются к шарниру D. Если сила будет больше заданной, то произойдет обратимая деформация (сжатие) упругих элементов 3 (газлифтов), за счет поворота рычагов 2 и 4, в то время как крепление ортеза 1 останется неподвижным. Таким образом избыточная нагрузка не передается на пассивный ортез. Подробный расчет подвешного механизма с упругими элементами представлен в работе [20].

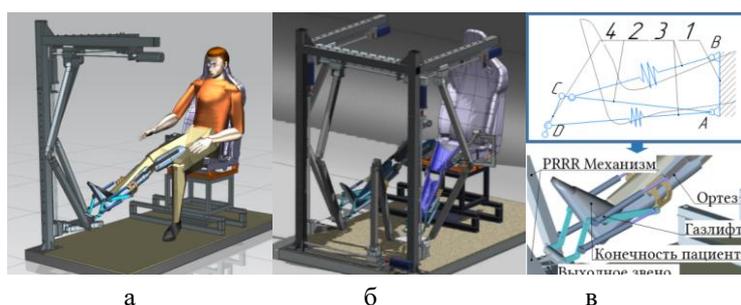


Рис. 5. Тренажерного комплекса для восстановительной механотерапии: а – 3D модель ТК с одним модулем; б – 3D модель ТК с двумя модулями; с – схема и 3D модель подвешного механизма с упругими элементами

Для более точного повторения походки, пассивный ортез был изготовлен индивидуально для испытуемого. На основе изготовленного ортеза, создан цифровой двойник при помощи методов цифрового копирования (рис. 6,а). При помощи 3D сканера CREALITY CR-Scan 01 было получено облако точек, которые формируют геометрию поверхности ортеза. Полученная геометрия в формате STL, загружается в рабочую область CAD системы для построения цифрового двойника (рис. 6,б).

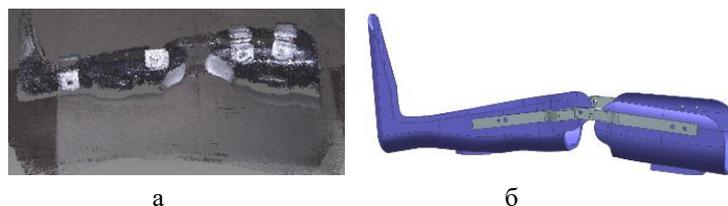


Рис. 6. Создание цифрового двойника ортеза: а – 3D модель, полученная с помощью сканера, б – обработанная 3D модель ортеза

На основе полученной 3D модели ТК, разработан прототип тренажерного комплекса для восстановительной механотерапии с одним модулем (рис. 7).



Рис. 7. Экспериментальный образец тренажерного комплекса для восстановительной механотерапии

Для управления прототипом использован промышленный логический контроллер ОВЕН ПЛК 210. Контроллер использует среду разработки (IDE) CODESYS V3.5, поддерживает языки программирования стандарта МЭК 61131-3 и дополнительный язык SFC, что позволяет разрабатывать человеко-машинный интерфейс и конфигурировать обмен данными с устройствами.

Для обеспечения посадки пациентов с различными антропометрическими данными применено кресло с возможностью регулировки в 3 положениях: наклон спинки кресла, а также продольное и поперечное перемещение кресла в плоскости основания системы реабилитации. Для продольного перемещения кресла использован шаговый двигатель с крутящим моментом 20 кг/см, а для поперечного перемещения использован шаговый двигатель, крутящий момент которого составляет 34 кг/см. Для управления данными двигателями применены программируемые контроллеры шаговых двигателей SMSD-4.2. Перемещение кресла выполняется при помощи ШВП по двум линейным направляющим.

В качестве упругих элементов подвесного механизма использованы газовые лифты GL105, обеспечивающие требуемые усилия для удовлетворения требований по безопасности реабилитационных упражнений.

После изготовления прототипа проведено тестирование всех компонентов. Для обеспечения безопасности было проведено испытание предохранительного устройства.

Заключение. По результатам оптимизации геометрических параметров механизма получена наилучшая конфигурация. Ограничения на закрепление выходного звена, позволили существенно улучшить эргономичности и технологичности конструкции. Полученный цифровой двойник, позволил спроектировать и изготовить экспериментальный образец тренажерного комплекса с одним модулем, который успешно прошел испытания. Предложено и экспериментально подтверждено использование для обеспечения безопасности подвесного предохранительного устройства для компенсации избыточной нагрузки, действующей со стороны активного манипулятора на конечность пациента, что позволяет за счет упругих элементов компенсировать движения активного манипулятора, недопустимые физиологией пациента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент 2809544 Российская Федерация, А 61 N 1/00. Способ реабилитации пациентов после тотального эндопротезирования тазобедренного сустава в раннем послеоперационном периоде / С.Н. Смирнова, Е.А. Мельникова, И.А. Захарова, А.Е. Майбродская; заявитель и патентообладатель ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского. – № 2022127993; заявл. 28.10.2022; опубл. 12.12.2023, Бюл. № 35.
2. Куртичев И.В. Структура коксартроза в различных возрастных группах у больных, нуждающихся в первичном эндопротезировании тазобедренного сустава // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 3.
3. Nicholas J. Rehabilitation of patients with Rheumatic Disorders // Physical medicine and rehabilitation / Braddom R. (ed). – W.B. Saunders Company, 1996. – P. 711-727.
4. Эндопротезирование тазобедренного сустава // Руководство по реабилитации больных с двигательными нарушениями / под редакцией А.Н. Беловой, О.Н. Щепетовой. – М.: Антитор, 1999. – Т. 2. – Гл. 10. – С. 435-448ю
5. Курбанов С.Х. Индивидуальная реабилитация после эндопротезирования тазобедренного сустава: автореф. дисс. ... д-ра мед. наук. – СПб., 2009. – 38 с.
6. Bouri M., Stauffer Y., Schmitt C., Allemand Y., Gnemmi S., Clavel R. The WalkTrainerTM: A Robotic System for Walking Rehabilitation // International Conference on Robotics and Biomimetics. – 2006.
7. Wang Y., Wang K., Zhang Z., Liang-Liang Chen L. Mechanical Characteristics Analysis of a Bionic Muscle Cable-Driven Lower Limb Rehabilitation Robot // Journal of Mechanics in Medicine and Biology. – 2020.

8. Электронный ресурс: <https://www.woodway.com/products/loko-help> (дата обращения: 27.04.2021).
9. Rios A., Hernandez E., Jaime A., Keshkar S., De la Garza R. Kinematics Analysis of a New 3DOF Parallel Manipulator as Walking Rehabilitation Device // 15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE). – 2018.
10. Almaghout K., Tarvirdizadeh B., Alipour K., Hadi A. Design and control of a lower limb rehabilitation robot considering undesirable torques of the patient's limb // Journal of Engineering in Medicine. – 2020.
11. Bouri M., Le Gall B., Clavel R. A new concept of parallel robot for rehabilitation and tness: the Lambda // In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). – 2009. – P. 2503-2508.
12. Электронный ресурс: <https://www.hocoma.com/solutions/erigo/> (дата обращения: 27.04.2021).
13. Hidler J.M., Wall A.E. Alterations in muscle activation patterns during robotic-assisted walking // ClinBiomech (Bristol, Avon). – 2005. – Vol. 20 (2).
14. Lam T., Anderschitz M., Dietz V. Contribution of Feedback and Feed forward Strategies to Locomotor Adaptations // J Neurophysiol. – 2006. – Vol. 95. – P. 766-773.
15. Mirbagheri M.M., Tsao C., Pelosin E., Rymer W.Z. Therapeutic Effects of Robotic-Assisted Locomotor Training on Neuromuscular Properties // Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). – 2005. – P. 561-564.
16. Voloshkin A., Rybak L., Mohan S G., Dubrovin A. Nozdracheva L. Designing a Robotized System for Rehabilitation Taking Into Account Anthropological Data of Patients // New Trends in Medical and Service Robotics. – 2021.
17. Voloshkin A., Virabyan L., Mamaev V., Kholoshevskaya L. Design of mechanisms of a robotic system for rehabilitation of the lower limbs // Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering" (ToPME 2020) 2nd-4th. – 2020.
18. Behera L., Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Determination of Workspaces and Intersections of Robot Links in a Multi-Robotic System for Trajectory Planning // Appl. Sci. – 2021. – Vol. 11. – P. 4961.
19. Truelsen T. and Bonita R. The worldwide burden of stroke: current status and future projections // in Handbook of clinical neurology. – 2009. – Vol. 92. – P. 327-336.
20. Voloshkin A., Tereshchenko A., Carbone G., Rybak L., Nozdracheva A. Design of a Suspension Lever Mechanism in Biomedical Robotic System // Frontiers in Robotics and AI. – 2022. –Vol. 9.

REFERENCES

1. Smirnova S.N., Mel'nikova E.A., Zakharova I.A., Maybrodskaya A.E. Patent. 2809544 Russian Federation, A 61 N 1/00. Sposob reabilitatsii patsientov posle total'nogo endoprotezirovaniya tazobedrennogo sustava v rannem posleoperatsionnom periode [A method of rehabilitation of patients after total hip replacement in the early postoperative period], applicant and patent holder of the State Medical University of the Russian Academy of Medical Sciences named after M.F. Vladimirovsky. No. 2022127993; application No. 28.10.2022; publ. 12.12.2023, Bull. No. 35.
2. Kirpichev I.V. Stuktura koksartroza v razlichnykh vozrastnykh gruppakh u bol'nykh, nuzhdayushchikhsya v pervichnom endoprotezirovanii tazobedrennogo sustava [The structure of coxarthrosis in various age groups in patients requiring primary hip replacement], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2015, No. 3.
3. Nicholas J. Rehabilitation of patients with Rheumatic Disorders. *Physical medicine and rehabilitation*, Braddom R. (ed). W.B. Saunders Company, 1996, pp. 711-727.
4. Endoprotezirovanie tazobedrennogo sustava [Hip arthroplasty], *Rukovodstvo po reabilitatsii bol'nykh s dvigatel'nymi narusheniyami* [Guidelines for rehabilitation of patients with motor disorders], ed. by A.N. Belovoy, O.N. Shchepetovoy. Moscow: Antidor, 1999, Vol. 2, Ch. 10, pp. 435-448yu
5. Kurbanov S.Kh. Individual'naya reabilitatsiya posle endoprotezirovaniya tazobedrennogo sustava: avtoref. diss. ... d-ra med. nauk [Individual rehabilitation after hip replacement: abstract. dr. of eng. sc. diss.]. St. Petersburg, 2009, 38 p.
6. Bouri M., Stauffer Y., Schmitt C., Allemand Y., Gnemmi S., Clavel R. The WalkTrainer™: A Robotic System for Walking Rehabilitation, *International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2006.

7. Wang Y., Wang K., Zhang Z., Liang-Liang Chen L. Mechanical Characteristics Analysis of a Bionic Muscle Cable-Driven Lower Limb Rehabilitation Robot, *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 2020.
8. Available at: <https://www.woodway.com/products/loko-help> (accessed 27 April 2021).
9. Rios A., Hernandez E., Jaime A., Keshtkar S., De la Garza R. Kinematics Analysis of a New 3DOF Parallel Manipulator as Walking Rehabilitation Device, *15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2018.
10. Almaghout K., Tarvirdizadeh B., Alipour K., Hadi A. Design and control of a lower limb rehabilitation robot considering undesirable torques of the patient's limb, *Journal of Engineering in Medicine*, 2020.
11. Bouri M., Le Gall B., Clavel R. A new concept of parallel robot for rehabilitation and tness: the Lambda, *In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2009, pp. 2503-2508.
12. Available at: <https://www.hocoma.com/solutions/erigo/> (accessed 27 April 2021).
13. Hidler J.M., Wall A.E. Alterations in muscle activation patterns during robotic-assisted walking, *ClinBiomech (Bristol, Avon)*, 2005, Vol. 20 (2).
14. Lam T., Anderschitz M., Dietz V. Contribution of Feedback and Feed forward Strategies to Locomotor Adaptations, *J Neurophysiol*, 2006, Vol. 95, pp. 766-773.
15. Mirbagheri M.M., Tsao C., Pelosin E., Rymer W.Z. Therapeutic Effects of Robotic-Assisted Locomotor Training on Neuromuscular Properties, *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2005, pp. 561-564.
16. Voloshkin A., Rybak L., Mohan S G., Dubrovin A. Nozdracheva L. Designing a Robotized System for Rehabilitation Taking Into Account Anthropological Data of Patients, *New Trends in Medical and Service Robotics*, 2021.
17. Voloshkin A., Virabyan L., Mamaev V., Kholoshevskaya L. Design of mechanisms of a robotic system for rehabilitation of the lower limbs, *Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering" (ToPME 2020) 2nd-4th*, 2020.
18. Behera L., Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Determination of Workspaces and Intersections of Robot Links in a Multi-Robotic System for Trajectory Planning, *Appl. Sci.*, 2021, Vol. 11, pp. 4961.
19. Truelsen T. and Bonita R. The worldwide burden of stroke: current status and future projections, in *Handbook of clinical neurology*, 2009, Vol. 92, pp. 327-336.
20. Voloshkin A., Tereshchenko A., Carbone G., Rybak L., Nozdracheva A. Design of a Suspension Lever Mechanism in Biomedical Robotic System, *Frontiers in Robotics and AI.*, 2022, Vol. 9.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Афонин.

Рыбак Лариса Александровна – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, e-mail: rlbgtu@gmail.com; г. Белгород, Россия; тел.: +74722230530; д.т.н.; профессор; директор НИИ Робототехники и систем управления.

Волошкин Артём Александрович – e-mail: voloshkin.artem.a@gmail.com; тел.: +79524349277; инженер – исследователь.

Перевузник Виктория Сергеевна – e-mail: viktorija.kuzmina@yandex.ru; тел.: +79805288097; инженер.

Малышев Дмитрий Иванович – e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; тел.: +79507134397; м.н.с.

Rybak Larisa Alexandrovna – Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; e-mail: rlbgtu@gmail.com; Belgorod, Russia; phone: +74722230530; dr. of eng. sc.; professor, director of Research Institute of Robotics and Control Systems.

Voloshkin Artem Aleksandrovich – e-mail: voloshkin.artem.a@gmail.com; phone: +79524349277; research engineer.

Perevuznik Victoria Sergeevna – e-mail: viktorija.kuzmina@yandex.ru; phone: +79507134397; junior researcher.

Malyshev Dmitry Ivanovich – e-mail: malyshev.d.i@ya.ru; phone: +79507134397; junior researcher.

И.Е. Селезнева**ЭКОНОМИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ
АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ
И МЕХАНИЗМЫ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ**

Эксплуатирующие организации и потенциальные потребители авиационных работ и услуг могут не в полной мере получать выгоды от внедрения безэкипажных или высокоавтоматизированных ВС, внедряя их лишь локально, в рамках традиционных бизнес-моделей применения авиации, нередко даже в фиксированных объемах, характерных для ВС прежних поколений, с более высокой стоимостью эксплуатации. Целью работы является определение границ области формирования интегрированных авиационных систем (ИАС) как эффективного механизма внедрения технологий автоматизации управления воздушными судами, когда внедрение беспилотных или высокоавтоматизированных ВС будет эффективно при формировании ИАС. На основе модели оптимального патрулирования рассчитаны численности ВС без формирования ИАС и при формировании ИАС. Определены значения эксплуатационных затрат и значения штрафов и потерь от аварийных ситуаций при формировании ИАС с беспилотными и (или) высокоавтоматизированными ВС и без формирования ИАС с беспилотными и (или) высокоавтоматизированными ВС и с пилотируемыми ВС. Определена зависимость области эффективности формирования ИАС от исследуемых параметров. Проведены параметрические расчеты для характерных значений параметров. Показано, что максимального экономического эффекта позволяет достичь формирование оптимальных ИАС с безэкипажными или высокоавтоматизированными ВС, в которых по глобальному экономическому критерию оптимизируется как парк ВС и стратегия его применения, так и «ответные» бизнес-процессы потребителя авиационных работ и услуг. Определены границы значений затрат на внедрение технологий автоматизации в зависимости от длины патрулируемой сети, когда внедрение беспилотных или высокоавтоматизированных ВС будет эффективно только при формировании ИАС, и без формирования ИАС и когда внедрение беспилотных или высокоавтоматизированных ВС будет неэффективно, эффективно будет оставить пилотируемые ВС. Таким образом, действенным механизмом распространения технологий автоматизации управления и повышения эффективности бизнес-процессов в различных отраслях является формирование целостных ИАС силами организаций-разработчиков и производителей АТ, в интересах потенциальных потребителей авиационных работ и услуг.

Интегрированные авиационные системы; высокоавтоматизированные ВС; беспилотные ВС; численность парка ВС; длина патрулируемой трассы.

I.E. Selezneva**ECONOMIC BARRIERS TO THE INTRODUCTION OF AIRCRAFT
CONTROL AUTOMATION TECHNOLOGIES AND MECHANISMS
TO OVERCOME THEM**

Operating organizations and potential consumers of aviation works and services may not fully benefit from the introduction of non-emergency or highly automated aircrafts, introducing them only locally, within the framework of traditional business models of aviation application, often even in fixed volumes characteristic of aircraft of previous generations, with a higher cost of operation. The aim of the work is to define the boundaries of the field of formation of integrated aviation systems (IAS) as an effective mechanism for the introduction of aircrafts control automation technologies, when the introduction of unmanned or highly automated aircrafts will be effective in the formation of IAS. Based on the optimal patrol model, the numbers of aircraft fleet without the formation of the IAS and with the formation of the IAS are calculated. The values of operating costs and the values of fines and losses from emergencies with the formation of IAS with unmanned and (or) highly automated aircrafts and without the formation of IAS with unmanned

and (or) highly automated aircrafts and with manned aircrafts are determined. The dependence of the IAS formation efficiency area on the studied parameters is determined. Parametric calculations have been performed for the characteristic values of the parameters. It is shown that the maximum economic effect can be achieved by the formation of optimal IAS with unmanned or highly automated aircraft, in which, according to the global economic criterion, both the aircraft fleet and its application strategy and the "response" business processes of the consumer of aviation works and services are optimized. The boundaries of the cost values for the introduction of automation technologies are determined depending on the length of the patrolled highway, when the introduction of unmanned or highly automated aircraft will be effective only when forming an IAS, and without the formation of an IAS, and when the introduction of unmanned or highly automated aircraft will be ineffective, manned aircraft will be effective. Thus, an effective mechanism for the dissemination of control automation technologies and improving the efficiency of business processes in various industries is the formation of IAS by aviation equipment development organizations and manufacturers, in the interests of potential consumers of aviation works and services.

Integrated aviation systems; highly automated aircraft; unmanned aircraft; the number of aircraft fleet; the length of the patrolled highway.

Введение. Внедрение технологий автоматизации управления, с одной стороны, сокращает эксплуатационные затраты ВС (уменьшаются затраты на содержание экипажа и «неснижаемый остаток» массы ВС, причем, особенно существенно – при малых полезных нагрузках, и сопряженные с ним составляющие затрат (подробнее см. работы [1–4, 9, 13])), но с другой стороны высоки постоянные затраты на проведение НИР, ОКР для разработки и внедрения данных технологий (подробнее о других рисках и аспектах внедрения высокоавтоматизированных ВС см. работы [14–20]). Необходимо определить условия, когда внедрение технологий автоматизации управления будет экономически эффективно, т.е. сокращение эксплуатационных затрат в паре ВС покрывает дополнительные постоянные затраты на их разработку и внедрение.

В свою очередь внедрение высокоавтоматизированных и (или) беспилотных ВС возможно как локально, в рамках традиционных бизнес-моделей применения авиации, в фиксированных объемах, характерных для ВС прежних поколений, с более высокой стоимостью эксплуатации; так и в рамках формирования оптимальных ИАС (подробнее см. работы [5–7, 10–12]) с безэкипажными или высокоавтоматизированными ВС, в которых по глобальному экономическому критерию оптимизируется как авиационная составляющая, так и «ответная часть» отрасли-потребителя. Причем, при внедрении автоматизированных ВС с более низким уровнем эксплуатационных затрат возможна субоптимизация ИАС для более полного использования этих преимуществ.

Опишем условие эффективности формирования ИАС:

Если

♦ выигрыш от внедрения высокоавтоматизированных (в т.ч. беспилотных) ВС в рамках интегрированных авиационных систем, ИАС, т.е. посредством совместной оптимизации авиационной составляющей и «ответной части» отрасли-потребителя, покрывает дополнительные постоянные затраты на внедрение новых технологий,

♦ а при внедрении беспилотных ВС (БВС) (далее в тексте под БВС понимаются как БВС, так и высокоавтоматизированные ВС) без формирования оптимальной ИАС суммарные (с учетом новых постоянных затрат) затраты и потери не сократятся по сравнению с нынешним состоянием (или даже возрастут), то именно формирование ИАС является эффективным механизмом внедрения технологий автоматизации управления функционированием изделий АТ и выполнением миссий.

Не ограничивая общности рассмотрим распространенный и практически важный пример формирования ИАС для обнаружения и локализации чрезвычайных ситуаций, ЧС. Это могут быть аварии на технических объектах (например,

утечки на трубопроводах), лесные пожары и т.п. ситуации. Причем, новые высокоавтоматизированные ВС (в т.ч. беспилотные) могут использоваться как для обнаружения ЧС, так и для их локализации.

Условия эффективности формирования ИАС как механизма внедрения технологий автоматизации управления функционированием изделий АТ и выполнением миссий можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} C_{\text{эксн}}^{\text{ПВС}} + C_{\text{штраф}}^{\text{ПВС}} - (C_{\text{эксн}}^{\text{ИАС}} + C_{\text{штраф}}^{\text{ИАС}}) > \Delta C^{\text{БВС}}; \\ \Delta C^{\text{БВС}} + C_{\text{эксн}}^{\text{БВС}} + C_{\text{штраф}}^{\text{БВС}} > C_{\text{эксн}}^{\text{ПВС}} + C_{\text{штраф}}^{\text{ПВС}}. \end{cases}$$

где $C_{\text{эксн}}^{\text{ПВС}}$ – затраты на эксплуатацию пилотируемых ВС (ПВС),

$C_{\text{штраф}}^{\text{ПВС}}$ – потери (штрафы), связанные с ЧС, при эксплуатации ПВС,

$C_{\text{эксн}}^{\text{ИАС}}$ – затраты на эксплуатацию БВС в рамках оптимальной ИАС, сформированной с учетом их возможностей,

$C_{\text{штраф}}^{\text{ИАС}}$ – потери (штрафы), связанные с ЧС, при эксплуатации БВС в рамках оптимальной ИАС,

$\Delta C^{\text{БВС}}$ – дополнительные постоянные затраты на внедрение БВС,

$C_{\text{эксн}}^{\text{БВС}}$ – затраты на эксплуатацию парка БВС без формирования оптимальной ИАС (т.е. они просто заменяют ПВС без изменения объемов выполняемых авиационных работ),

$C_{\text{штраф}}^{\text{БВС}}$ – потери (штрафы), связанные с ЧС, при эксплуатации БВС без формирования оптимальной ИАС. $C_{\text{штраф}}^{\text{БВС}} = C_{\text{штраф}}^{\text{ПВС}}$, поскольку объемы авиационных работ останутся такими же, как и для пилотируемых ВС.

Таким образом формирование ИАС будет эффективным механизмом внедрения технологий автоматизации управления, если дополнительные постоянные затраты на внедрение БВС будут принимать значения в следующем интервале:

$$C_{\text{эксн}}^{\text{ПВС}} - C_{\text{эксн}}^{\text{БВС}} < \Delta C^{\text{БВС}} < (C_{\text{эксн}}^{\text{ПВС}} + C_{\text{штраф}}^{\text{ПВС}}) - (C_{\text{эксн}}^{\text{ИАС}} + C_{\text{штраф}}^{\text{ИАС}}).$$

Модели затрат на эксплуатацию парка ВС. Затраты на эксплуатацию парка БВС без формирования оптимальной ИАС можно оценить по следующей формуле:

$$C_{\text{эксн}}^{\text{БВС}} = FC + N_B \cdot \eta_B \cdot c_{\text{лч}_B},$$

где FC – годовые постоянные затраты на создание и поддержание необходимой наземной инфраструктуры для организации патрулирования; N_B – количество БВС; η_B – среднегодовой налет БВС; $c_{\text{лч}_B}$ – стоимость летного часа БВС.

А затраты на эксплуатацию ПВС:

$$C_{\text{эксн}}^{\text{ПВС}} = FC + N_{\text{П}} \cdot \eta_{\text{П}} \cdot c_{\text{лч}_\text{П}},$$

где $N_{\text{П}}$ – количество ПВС, $\eta_{\text{П}}$ – среднегодовой налет ПВС, $c_{\text{лч}_\text{П}}$ – стоимость летного часа ПВС.

Причем без формирования оптимальной ИАС БВС заменяют ПВС без изменения объемов выполняемых авиационных работ, т.е. $N_B = N_{\text{П}} = N$ и $\eta_B = \eta_{\text{П}} = \eta$. И экономия затрат при внедрении БВС достигается за счет сниже-

ния стоимости летного часа: $c_{лчБ} < c_{лчП}$. При формировании оптимальной ИАС увеличится качество обслуживания, т.е. объем авиационных работ, объем полетов. Таким образом $N_{ИАС} > N_B$ и /или $\eta_{ИАС} > \eta_B$, где $N_{ИАС}$ – количество БВС при формировании оптимальной ИАС, $\eta_{ИАС}$ – среднегодовой налет БВС при формировании оптимальной ИАС. Предположим, что при формировании оптимальной ИАС увеличится именно количество БВС, а частота полетов БВС не изменится: $\eta_{ИАС} = \eta_B = \eta_{П} = \eta$, $N_{ИАС} > N_B = N$.

Затраты на эксплуатацию БВС в рамках оптимальной ИАС, сформированной с учетом их возможностей можно оценить по следующей формуле:

$$C_{эксп}^{ИАС} = FC + N_{ИАС} \cdot \eta_{ИАС} \cdot c_{лчБ}.$$

Тогда условие эффективности формирования ИАС как механизма внедрения технологий автоматизации управления функционированием изделий АТ и выполнением миссий можно представить в следующем виде:

$$N \cdot \eta \cdot (c_{лчП} - c_{лчБ}) < \Delta C^{БВС} < (N \cdot \eta \cdot c_{лчП} + C_{штраф}^{ПВС}) - (N_{ИАС} \cdot \eta \cdot c_{лчБ} + C_{штраф}^{ИАС}),$$

Причем $N_{ИАС} > N_B = N$, $c_{лчБ} < c_{лчП}$ и $C_{штраф}^{БВС} > C_{штраф}^{ИАС}$.

Сумму потерь из-за аварийных ситуаций без формирования оптимальной ИАС можно выразить следующей формулой, см. [4]:

$$C_{штраф}^{ПВС} = C_{штраф}^{БВС} = L \cdot \omega \cdot z \cdot (365 \cdot 12 \cdot \frac{L}{N \cdot \eta \cdot v} + \bar{t}_{устр}),$$

где L – длина патрулируемой трассы, км, ω – интенсивность возникновения аварийных ситуаций, $(год \cdot км)^{-1}$, z – ущерб, ден.ед., в расчете на одну аварию в час, v – средняя скорость полета в режиме патрулирования, км./ч., и $\bar{t}_{устр}$ – средняя длительность устранения аварии, час.

Оптимальную численность ПВС и БВС без формирования ИАС можно определить, исходя из условия минимума суммарных эксплуатационных затрат $\frac{\partial(C_{эксп}^{ПВС} + C_{штраф}^{ПВС})}{\partial N} = 0$, по следующей формуле, см. [8]:

$$N^{opt} = \frac{L}{\eta} \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z}{c_{лчП} \cdot v}}.$$

Сумму потерь из-за аварийных ситуаций при формировании оптимальной ИАС:

$$C_{штраф}^{ИАС} = L \cdot \omega \cdot z \cdot (365 \cdot 12 \cdot \frac{L}{N_{ИАС} \cdot \eta \cdot v} + \bar{t}_{устр}).$$

Оптимальную численность БВС при формировании ИАС можно определить, исходя из условия $\frac{\partial(C_{эксп}^{ИАС} + C_{штраф}^{ИАС})}{\partial N_{ИАС}} = 0$, по следующей формуле:

$$N_{ИАС}^{opt} = \frac{L}{\eta} \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z}{c_{лчБ} \cdot v}}.$$

И можно определить эксплуатационные затраты и штрафы при оптимальных численностях ВС.

В рамках рассматриваемой модели величина затрат на внедрение технологий автоматизации управления ΔC^{BBC} рассматривается как постоянная, не зависящая от масштабов рынков, численности парка ВС.

Анализ влияния параметров на границы области эффективности формирования ИАС. Определим влияние параметров на ширину рассматриваемой области – где формирование ИАС является эффективным механизмом внедрения технологий автоматизации управления функционированием изделий АТ и выполнением миссий:

$$N \cdot \eta \cdot (c_{лчП} - c_{лчБ}) < \Delta C^{BBC} < (N \cdot \eta \cdot c_{лчП} + C_{итраф}^{ПВС}) - (N_{ИАС} \cdot \eta \cdot c_{лчБ} + C_{итраф}^{ИАС});$$

$$(N_{ИАС} - N) \cdot \eta \cdot c_{лчБ} < N_{ИАС} \cdot \eta \cdot c_{лчБ} - N \cdot \eta \cdot c_{лчП} + \Delta C^{BBC} < C_{итраф}^{ПВС} - C_{итраф}^{ИАС}.$$

Подставим оптимальные значения количества ВС при формировании оптимальной ИАС $N_{ИАС}$ и без ее формирования N и значения потерь из-за аварийных ситуаций без формирования оптимальной ИАС $C_{итраф}^{ПВС}$ и при формировании оптимальной ИАС $C_{итраф}^{ИАС}$:

$$\frac{L}{\eta} \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z}{v}} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{c_{лчБ}}} - \sqrt{\frac{1}{c_{лчП}}} \right) \cdot \eta \cdot c_{лчБ} < \eta \cdot \left(\frac{L}{\eta} \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z}{c_{лчБ} \cdot v}} \cdot c_{лчБ} - \right.$$

$$\left. \frac{L}{\eta} \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z}{c_{лчП} \cdot v}} \cdot c_{лчП} \right) + \Delta C^{BBC} < \frac{L^2 \cdot \omega \cdot z \cdot 365 \cdot 12}{N \cdot \eta \cdot v} - \frac{L^2 \cdot \omega \cdot z \cdot 365 \cdot 12}{N_{ИАС} \cdot \eta \cdot v};$$

$$L \cdot \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z}{v}} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{c_{лчБ}}} - \sqrt{\frac{1}{c_{лчП}}} \right) \cdot c_{лчБ} <$$

$$< L \cdot \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z \cdot c_{лчБ}}{v}} - L \cdot \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z \cdot c_{лчП}}{v}} + \Delta C^{BBC} <$$

$$< \frac{L^2 \cdot \omega \cdot z \cdot 365 \cdot 12}{\eta \cdot v} \cdot \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N_{ИАС}} \right);$$

также подставляем значения $N_{ИАС}$ и N :

$$L \cdot \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z}{v}} \cdot (\sqrt{c_{лчП}} - \sqrt{c_{лчБ}}) \cdot \sqrt{\frac{c_{лчБ}}{c_{лчП}}} <$$

$$< L \cdot \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z}{v}} \cdot (\sqrt{c_{лчБ}} - \sqrt{c_{лчП}}) + \Delta C^{BBC} <$$

$$< L \cdot \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z}{4 \cdot v}} \cdot (\sqrt{c_{лчП}} - \sqrt{c_{лчБ}});$$

$$(\sqrt{c_{лчП}} - \sqrt{c_{лчБ}}) \cdot \sqrt{\frac{c_{лчБ}}{c_{лчП}}} <$$

$$< (\sqrt{c_{лчБ}} - \sqrt{c_{лчП}}) + \frac{\Delta C^{BBC}}{L} \cdot \sqrt{\frac{v}{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z}} <$$

$$< \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{c_{лчП}} - \sqrt{c_{лчБ}});$$

$$\sqrt{\frac{c_{лчБ}}{c_{лчП}}} < \frac{\Delta C^{BBC}}{L} \cdot \sqrt{\frac{v}{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z \cdot (\sqrt{c_{лчП}} - \sqrt{c_{лчБ}})}} - 1 < \frac{1}{2};$$

$$\sqrt{\frac{c_{лчБ}}{c_{лчП}}} + 1 < \frac{\Delta C^{BBC}}{L} \cdot \sqrt{\frac{v}{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z \cdot (\sqrt{c_{лчП}} - \sqrt{c_{лчБ}})}} < \frac{3}{2};$$

$$\left(\sqrt{\frac{c_{лчБ}}{c_{лчП}}} + 1\right) \cdot L \cdot \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z \cdot (\sqrt{c_{лчП}} - \sqrt{c_{лчБ}})}{v}} < \Delta C^{БВС} < \\ < \frac{3}{2} L \cdot \sqrt{\frac{365 \cdot 24 \cdot \omega \cdot z \cdot (\sqrt{c_{лчП}} - \sqrt{c_{лчБ}})}{v}}.$$

Таким образом, область эффективности формирования ИАС расширяется при снижении стоимости летного часа беспилотника $c_{лчБ}$. Причем чем сильнее выполняется неравенство $\sqrt{\frac{c_{лчБ}}{c_{лчП}}} < \frac{1}{2}$, т.е. $\sqrt{c_{лчБ}} < \frac{\sqrt{c_{лчП}}}{2}$, тем шире область эффективности формирования ИАС.

Параметрические расчеты границы области формирования ИАС как эффективного механизма внедрения технологий автоматизации управления функционированием изделий АТ и выполнением миссий. Экономия затрат при внедрении беспилотных или высокоавтоматизированных ВС оценивается в сравнении с вертолетом «Ансат» как примером относительно массового и легкого пилотируемого вертолета. Используются следующие значения параметров. Пусть среднегодовой налет вертолета $\eta = 3000$ л.ч./г.; стоимость летного часа вертолета Ансат $c_{лчП} = 0,000095$ млрд.руб./ч., стоимость летного часа БВС принимает два различных значения: $c_{лчБ} = 0,00000095$ млрд.руб./ч.; $0,0000095$ млрд.руб./ч., $\omega = \frac{0,004}{2 \text{ км}}$,

$z = 0,0004$ млрд.руб./авар.ч., $v = 50$ км./ч., $t_{устр} = 12$ ч. Длина патрулируемой сети варьируется от 1 000 км. до 150 000 км.

Рассчитаны оптимальные значения количества ВС при формировании оптимальной ИАС и без ее формирования. Определены значения потерь из-за аварийных ситуаций и эксплуатационные затраты в случаях при внедрении высокоавтоматизированных технологий при формировании оптимальной ИАС и без ее формирования, и без внедрения высокоавтоматизированных технологий.

На графиках (рис. 1, 2) представлены границы (рассчитанные по моделям оптимального патрулирования) затрат на внедрение БВС или высокоавтоматизированных технологий, при которых внедрение таких технологий будет выгодно только при формировании оптимальной ИАС.

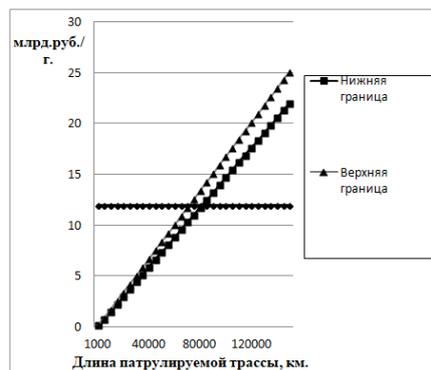


Рис. 1. Границы области формирования ИАС как эффективного механизма внедрения технологий автоматизации управления функционированием изделий АТ и выполнением миссий в зависимости от длины патрулируемой сети

$$c_{лчБ} = 0,0000095 \text{ млрд.руб./ч.}$$

На рис. 1 значения границ затрат рассчитаны в предположении, что стоимость летного часа высокоавтоматизированного ВС уменьшится в 10 раз по сравнению с пилотируемым ВС и примет значение $c_{лч_в} = 0,00000095 \text{ млрд.руб./ч.}$

На рис. 2 значения границ затрат рассчитаны в предположении, что стоимость летного часа высокоавтоматизированного ВС уменьшится в 100 раз по сравнению с пилотируемым ВС и примет значение $c_{лч_в} = 0,00000095 \text{ млрд.руб./ч.}$

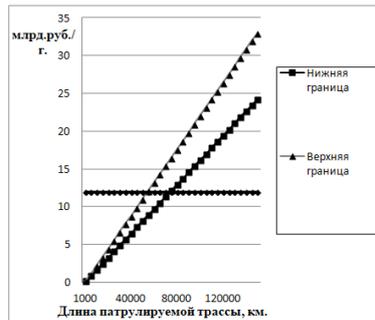


Рис. 2. Границы области формирования ИАС как эффективного механизма внедрения технологий автоматизации управления функционированием изделий АТ и выполнением миссий в зависимости от длины патрулируемой сети

$$c_{лч_в} = 0,00000095 \text{ млрд.руб./ч.}$$

Графики построены в зависимости от длины сети патрулирования, где внедряется технология, области ее применения. Постоянные затраты на графиках отображаются в виде «палочки». При очень малых масштабах применения технологии, внедрять новые технологии невыгодно даже при формировании оптимальной ИАС. По мере увеличения масштабов применения новой технологии (при движении по горизонтальной оси вправо) ее внедрение сначала будет эффективно только при формировании оптимальной ИАС, а затем и без ее формирования путем простой замены старых технологий на новые.

Заключение. Экономические барьеры и механизмы их преодоления изучены на примере внедрения беспилотных или высокоавтоматизированных ВС в сфере патрулирования магистральных трубопроводов. Определены границы значений затрат на внедрение технологий автоматизации в зависимости от длины патрулируемой сети, при которых формирование ИАС является эффективным механизмом внедрения технологий автоматизации управления функционированием изделий АТ и выполнением миссий (внедрение беспилотных или высокоавтоматизированных ВС будет эффективно только при формировании ИАС). Если значения затрат на внедрение технологий автоматизации меньше вычисленных значений нижней границы, то внедрение беспилотных или высокоавтоматизированных ВС будет эффективно и без формирования ИАС. Если же значения затрат на внедрение технологий автоматизации больше вычисленных значений верхней границы, то само внедрение беспилотных или высокоавтоматизированных ВС с или без формирования ИАС будет неэффективно, эффективно будет оставить ПВС.

При малых масштабах распространения технологии (характерных на начальных этапах внедрения новых технологий и формирования новых рынков) внедрять новые технологии невыгодно даже при формировании оптимальной ИАС, фактор постоянных затрат на внедрение технологий автоматизации управления будет наиболее значимым – от его величины зависит минимально-необходимый масштаб распространения технологии, при котором внедрение данной технологии станет эффек-

тивно с экономической точки зрения, причем чем выше уровень постоянных затрат на внедрение новых технологий тем шире должен быть масштаб распространения технологии. При увеличении масштабов и численности парка ВС, вначале, использование указанных технологий будет эффективно только при формировании оптимальных ИАС, а затем, по мере увеличения масштабов использования технологий, и без формирования оптимальных ИАС потребители авиационных работ и услуг будут иметь естественную экономическую заинтересованность в использовании технологий автоматизации управления. Однако при малочисленных парках именно формирование оптимальной ИАС может стать действенным организационным механизмом эффективного и взаимовыгодного внедрения таких технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Варюхина Е.В., Клочков В.В.* Интеллектуальные авиационные технологии обеспечения безопасности полетов и приемлемой общей стоимости владения авиационной техникой // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: Сб. тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации. – М.: МГТУ ГА, 2023. – С. 441-443.
2. *Гласов В.В., Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В.* Непараметрический метод функциональной реконфигурации системы управления воздушного судна при отказах исполнительных подсистем // Сб. тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». – М.: ГосНИИ АС, 2020. – С. 210-211.
3. *Дутов А.В., Гласов В.В., Шакунов А.В., Косьянчук В.В., Зыбин Е.Ю., Леликов М.А.* Основные цели, задачи, этапы и технологии интеллектуализации комплексов бортового оборудования перспективных воздушных судов гражданской авиации // Техника воздушного флота. – 2023. – № 1. – С. 26-35.
4. *Егер С.М., Лисейцев Н.К., Самойлович О.С.* Основы автоматизированного проектирования самолетов. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
5. *Егошин С.Ф., Клочков В.В.* Задачи развития санитарной авиации и совершенствования пространственной организации здравоохранения в России // Россия: Тенденции и перспективы развития. Ежегодник. – М., 2020. – С. 628-637.
6. *Егошин С.Ф., Клочков В.В.* Интегрированная авиационная система обеспечения общественной безопасности // Вестник Воронежского института МВД России. – 2021. – № 2. – С. 46-56.
7. *Желтов С.Ю., Кислицын Ю.Д., Самойлов Д.В., Хохлов С.В.* Современные подходы в моделировании авиационных систем // Сб. тезисов докладов IV Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». – М.: ГосНИИ АС, 2020. – 5 с.
8. *Клочков В.В., Никитова А.К.* Методы прогнозирования спроса на беспилотные летательные аппараты и работы по воздушному патрулированию // Проблемы прогнозирования. – 2007. – № 6. – С. 144-151.
9. *Клочков В.В., Рождественская С.М., Фридлянд А.А.* Обоснование приоритетных направлений развития авиационной техники для местных воздушных линий // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2018. – № 20 (331). – С. 93-102.
10. *Клочков В.В., Топоров Н.Б., Егошин С.Ф.* Интегрированные авиационные системы // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2021. – № 90. – С. 94-120.
11. *Платонова А.В.* Формирование инновационно-ориентированной интегрированной среды в авиастроении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: экономика и менеджмент. – 2021. – Т. 13, № 3. – С. 132-138.
12. *Селезнева И.Е., Клочков В.В., Егошин С.Ф.* Математическая модель межотраслевой координации стратегий развития (на примере здравоохранения и авиастроения) // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2022. – Вып. 99. – С. 57-80.
13. *Тихонов А.И.* Организационно-экономические механизмы выбора стратегии развития предприятия авиационной промышленности // Вестник академии знаний. – 2020. – № 37 (2). – С. 325-330.
14. *Anania E.C., Rice S., Pierce M., Winter S.R., Capps ...Milner M.N.* Public support for police drone missions depends on political affiliation and neighborhood demographics // Technology in Society. – 2019. – No. 57. – P. 95-103.

15. Boucher P. You wouldn't have your granny using them: Drawing boundaries between acceptable and unacceptable applications of civil drones // *Science and Engineering Ethics*. – 2015. – 22 (5). – P. 1391-1418. – Retrieved from <https://link-springercom.ezproxy.libproxy.db.erau.edu/article/10.1007%2Fs11948-015-9720-7>.
16. Brown J.P. The Effect of Automation on Human Factors in Aviation // *The Journal of Instrumentation, Automation and Systems*. – 2016. – Vol. 3, No. 2. – P. 31-46.
17. Cameron E.D. Unmanned aircraft systems: Factors that affect the acceptance of unmanned aircraft usage within the united states national airspace system. University of North Dakota, 2014. – Retrieved from <http://ezproxy.libproxy.db.erau.edu/>
18. Clothier R.A., Greer D.A., Greer D.G., Mehta A.M. Risk perception and the public acceptance of drones // *Risk Analysis Journal*. – 2015. – <https://doiorg.ezproxy.libproxy.db.erau.edu/10.1111/risa.12330>.
19. Kharoufah H., Murray J., Baxter G., Wild G. A review of human factors causations in commercial air transport accidents and incidents: From to 2000–2016 // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2018. – Vol. 99. – P. 1-13.
20. Read G., O'Brien A., Stanton N.A., Salmon P.M. What is going on? Contributory factors to automation-related aviation incidents and accidents // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. – 2020. – Vol. 64. Issue 1. – P. 1697-1701.

REFERENCES

1. Varyukhina E.V., Klochkov V.V. Intellektual'nye aviatsionnye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti poletov i priemlemy obshchey stoimosti vladeniya aviatsionnoy tekhnikoy [Intelligent aviation technologies to ensure flight safety and an acceptable total cost of ownership of aviation equipment], *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: Sb. tezisov dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu otechestvennoy grazhdanskoy aviatsii* [Civil aviation at the current stage of development of science, technology and society: Sat. abstracts of reports of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 100th anniversary of domestic civil aviation]. Moscow: MGTU GA, 2023, pp. 441-443.
2. Glasov V.V., Zybin E.Yu., Kos'yanchuk V.V. Neparаметрический метод функциональной реконфигурации системы управления воздушного судна при отказе исполнительного подсистемы [Nonparametric method of functional reconfiguration of an aircraft control system in the event of failures of the executive subsystem], *Sb. tezisov dokladov IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie aviatsionnykh sistem»* [Collection of abstracts of reports of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference “Modeling of Aviation Systems”]. Moscow: GosNII AS, 2020, pp. 210-211.
3. Dutov A.V., Glasov V.V., Shakun A.V., Kos'yanchuk V.V., Zybin E.Yu., Lelikov M.A. Osnovnye tseli, zadachi, etapy i tekhnologii intellektualizatsii kompleksov bortovogo oborudovaniya perspektivnykh vozдушnykh sudov grazhdanskoy aviatsii [Main goals, objectives, stages and technologies for intellectualization of on-board equipment complexes of promising civil aviation aircraft], *Tekhnika vozдушnogo flota* [Air fleet technology], 2023, No. 1, pp. 26-35.
4. Eger S.M., Liseyev N.K., Samoylovich O.S. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya samoletov [Fundamentals of computer-aided aircraft design]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 232 p.
5. Egoshin S.F., Klochkov V.V. Zadachi razvitiya sanitarnoy aviatsii i sovershenstvovaniya prostranstvennoy organizatsii zdravookhraneniya v Rossii [Tasks of developing sanitary aviation and improving the spatial organization of healthcare in Russia], *Rossiya: Tendentsii i perspektivy razvitiya. Ezhegodnik* [Russia: Trends and development prospects. Yearbook]. Moscow, 2020, pp. 628-637.
6. Egoshin S.F., Klochkov V.V. Integrirovannaya aviatsionnaya sistema obespecheniya obshchestvennoy bezopasnosti [Integrated aviation system for ensuring public safety], *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii* [Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia], 2021, No. 2, pp. 46-56.
7. Zheltov S.Yu., Kislitsyn Yu.D., Samoylov D.V., Khokhlov S.V. Sovremennye podkhody v modelirovanii aviatsionnykh sistem [Modern approaches to modeling aviation systems], *Sb. tezisov dokladov IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Modelirovanie aviatsionnykh sistem»* [Collection of abstracts of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference “Modeling of Aviation Systems”]. Moscow: GosNII AS, 2020, 5 p.

8. Klochkov V.V., Nikitova A.K. Metody prognozirovaniya sprosa na bespilotnye letatel'nye apparaty i raboty po vozдушному patrulirovaniyu [Methods for forecasting demand for unmanned aerial vehicles and air patrol work], *Problemy prognozirovaniya* [Forecasting problems], 2007, No. 6, pp. 144-151.
9. Klochkov V.V., Rozhdestvenskaya S.M., Fridlyand A.A. Obosnovanie prioritnykh napravleniy razvitiya aviatsionnoy tekhniki dlya mestnykh vozдушnykh liniy [Justification of priority directions for the development of aviation technology for local air lines], *Nauchnyy vestnik GosNII GA* [Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation], 2018, No. 20 (331), pp. 93-102.
10. Klochkov V.V., Toporov N.B., Egoshin S.F. Integrirovannye aviatsionnye sistemy [Integrated aviation systems], *Upravlenie bol'shimi sistemami: Sb. trudov* [Management of large systems: Collection of works], 2021, No. 90, pp. 94-120.
11. Platonova A.V. Formirovanie innovatsionno-orientirovannoy integrirovannoy sredy v aviastroenii [Formation of an innovation-oriented integrated environment in the aircraft industry], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: ekonomika i menedzhment* [Bulletin of the South Ural State University. Series: economics and management], 2021, Vol. 13, No. 3, pp. 132-138.
12. Selezneva I.E., Klochkov V.V., Egoshin S.F. Matematicheskaya model' mezhotraslevooy koordinatsii strategiy razvitiya (na primere zdravookhraneniya i aviastroeniya) [Mathematical model of intersectoral coordination of development strategies (using the example of healthcare and aircraft manufacturing)], *Upravlenie bol'shimi sistemami: Sb. trudov* [Management of large systems: Collection of works], 2022, Issue 99, pp. 57-80.
13. Tikhonov A.I. Organizatsionno-ekonomicheskie mekhanizmy vybora strategii razvitiya predpriyatiya aviatsionnoy promyshlennosti [Organizational and economic mechanisms for choosing a development strategy for an aviation industry enterprise], *Vestnik akademii znaniy* [Bulletin of the Academy of Knowledge], 2020, No. 37 (2), pp. 325-330.
14. Anania .C., Rice S., i erce M., Winter S.R., Capps ...Milner M.N. Public support for police drone missions depends on political affiliation and neighborhood demographics, *Technology in Society*, 2019, No. 57, pp. 95-103.
15. Boucher P. You wouldn't have your granny using them: Drawing boundaries between acceptable and unacceptable applications of civil drones, *Science and Engineering Ethics*, 2015, 22 (5), pp. 1391-1418. Retrieved from <https://link-springercom.ezproxy.libproxy.db.erau.edu/article/10.1007%2Fs11948-015-9720-7>.
16. Brown J.P. The Effect of Automation on Human Factors in Aviation, *The Journal of Instrumentation, Automation and Systems*, 2016, Vol. 3, No. 2, pp. 31-46.
17. Cameron E.D. Unmanned aircraft systems: Factors that affect the acceptance of unmanned aircraft usage within the united states national airspace system. University of North Dakota, 2014. Retrieved from <http://ezproxy.libproxy.db.erau.edu/>.
18. Clothier R.A., Greer D.A., Greer D.G., Mehta A.M. Risk perception and the public acceptance of drones, *Risk Analysis Journal*, 2015. Available at: <https://doiorg.ezproxy.libproxy.db.erau.edu/10.1111/risa.12330>.
19. Kharoufah H., Murray J., Baxter G., Wild G. A review of human factors causations in commercial air transport accidents and incidents: From to 2000–2016, *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, Vol. 99, pp. 1-13.
20. Read G., O'Brien A., Stanton N.A., Salmon P.M. What is going on? Contributory factors to automation-related aviation incidents and accidents, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2020, Vol. 64. Issue 1, pp. 1697-1701.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Н.Б. Топоров.

Селезнева Ирина Евгеньевна – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; e-mail: ir.seleznewa2016@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79689183969; к.э.н.; с.н.с.

Selezneva Irina Evgen'evna – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS; e-mail: ir.seleznewa2016@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79689183969; cand. of ec. sc.; senior reseach fellow.

З.В. Нагоев, К.Ч. Бжихатлов, О.З. Загазежева

**НЕЙРОКОГНИТИВНЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ФЕДЕРАТИВНОГО
ОБУЧЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ В РЕАЛЬНОЙ
КОММУНИКАТИВНОЙ СРЕДЕ**

В отличие от существующих методов обучения систем искусственного интеллекта, подходы, основанные на федеративном обучении, не потребуют длительной и дорогостоящей процедуры подготовки обучающей выборки при создании и массовом практическом применении «умных» сельскохозяйственных систем, автономных беспилотных сельскохозяйственных машин и роботов, а полученные системой принятия решений знания будут актуализироваться на постоянной основе. Целью исследования является разработка и внедрение сквозной технологии федеративного обучения для искусственного интеллекта, отсутствие которой сегодня препятствует созданию интегрированных информационно-управляющих систем для растениеводства и животноводства («умные» сельскохозяйственные системы), основанных на групповом применении беспилотных наземных и воздушных сельскохозяйственных машин и роботов. Внедрение подобных интеллектуальных систем необходимо для сохранения и повышения производительности продукции и обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства. В статье описаны нейрокогнитивные методы и алгоритмы федеративного обучения интеллектуальных систем управления сельскохозяйственными процессами в реальной среде. Также предлагается структура обмена данными и знаниями в системе «умного» поля на основе распределенной сети интеллектуальных агентов, управляющих системами «умного» поля на различных сельскохозяйственных участках, на основе федеративного обучения. Каждый интеллектуальный агент представляет собой программную модель нейрокогнитивных процессов рассуждения и принятия решений в рамках решения определенной задачи. Предложенная структура будет способствовать совместному накоплению базы знаний в области сельского хозяйства и сможет стать основой множества различных интеллектуальных агентов, эффективно выполняющих конкретные задачи в рамках распределенной сети систем управления «умными» полями. Также приводится описание интеллектуальных агентов, выполняющих различные задачи в реальной среде. Приведены примеры разрабатываемых на автономных робототехнических и программных комплексов, на основе которых планируется апробация предложенной концепции федеративного обучения систем «умного» поля. Вместе с тем в статье описаны ожидаемые эффекты внедрения технологий, основанных на разрабатываемых методах и алгоритмах федеративного обучения интеллектуальных агентов, управляющих системами умного поля.

Нейрокогнитивные архитектуры; интеллектуальные агенты; федеративное обучение; «умные» сельскохозяйственные системы; автономный робот; защита растений.

Z.V. Nagoev, K.Ch. Bzhikhatlov, O.Z. Zagazheva

**NEUROCOGNITIVE METHODS AND ALGORITHMS OF FEDERATED
LEARNING OF INTELLIGENT INTEGRATED INFORMATION
MANAGEMENT SYSTEMS IN A REAL COMMUNICATIVE ENVIRONMENT**

Unlike existing methods of teaching artificial intelligence systems, approaches based on federated learning will not require a long and expensive procedure for preparing a training sample when creating and mass practical application of "smart" agricultural systems, autonomous unmanned agricultural machines and robots, and the knowledge obtained by the decision-making system will be updated on an ongoing basis. The aim of the research is to develop and implement end-to-end artificial intelligence technology, the lack of which today prevents the creation of integrated information management systems for crop and livestock production ("smart" agricultural systems) based on the group application of unmanned ground and aerial agricultural machines and robots. The introduction of such intelligent systems is necessary to preserve and improve the products produced and ensure the sustainable development of agriculture. The article describes neurocognitive methods and algorithms of federated learning of intelligent agricultural process management systems in a real

environment. The structure of data and knowledge exchange in the smart field system based on a distributed network of intelligent agents managing smart field systems on various agricultural lands, based on federated learning, is also proposed. Each intelligent agent is a software model of the neurocognitive processes of reasoning and decision-making within the framework of solving a specific task. The proposed structure will facilitate the joint accumulation of a knowledge base in the field of agriculture and will be able to become the basis for many different intelligent agents that effectively perform specific tasks within a distributed network of smart field management systems. There is also a description of intelligent agents performing various tasks in a real environment. Examples of autonomous robotic and software complexes being developed are given, on the basis of which it is planned to test the proposed concept of federated training of "smart" field systems. At the same time, the article describes the expected effects of the introduction of technologies based on the developed methods and algorithms of federated training of intelligent agents controlling smart field systems.

Neurocognitive architectures; intelligent Neurocognitive architectures; intelligent agents; federated learning; smart agricultural systems; autonomous robot; plant protection.

Введение. Внедрение «умных» сельскохозяйственных систем предполагает использование современных информационных и коммуникационных технологий (ИКТ), таких как сенсоры, носимая электроника, машинное обучение и искусственный интеллект для улучшения качества и производительности сельского хозяйства. Данные системы позволяют анализировать большое количество данных о почве, растениях, погоде и других факторах, влияющих на урожайность. Они обеспечивают возможность точного дозирования химикатов, воды и удобрений в соответствии с потребностями каждого конкретного участка земли. Такие системы помогают фермам решать экономические задачи, такие как оптимизация производства, снижение затрат и решение проблем устойчивости к изменению климата. В целом, использование «умных» сельскохозяйственных систем позволяет повысить производительность, снизить затраты и улучшить качество выращиваемых продуктов, способствуя устойчивому развитию сельского хозяйства [1–3].

Нейрокогнитивные методы и алгоритмы федеративного обучения интеллектуальных интегрированных информационно-управляющих систем в реальной коммуникативной среде. «Умные» сельскохозяйственные системы выполняют мониторинг процессов на сельскохозяйственных объектах, анализ проблем и возможностей, прогноз развития ситуации, синтез рекомендаций лицам, принимающим решения, и - управляющих воздействий беспилотным машинам и роботам на основе распределенной сети локальных центров управления (интеллектуального программного обеспечения – т.н. «интеллектуальных программных агентов») [4, 5].

Каждый сельскохозяйственный и производственный объект (поле, сад, ферма, водоем, станция материально-технического обслуживания, лаборатория), каждая единица пилотируемой и беспилотной техники (наземные и воздушные дроны, специализированные роботы, сельскохозяйственная техника), действующие совместно (коллаборативно) на данном сельскохозяйственном объекте, оснащается датчиками, каналами связи, вычислительным и сетевым оборудованием, программным обеспечением, реализующим функционал интеллектуального управляющего программного агента, и включается в состав «умной» системы [5–7].

Программные агенты, управляющие отдельными объектами и единицами техники в составе интегрированной информационно-управляющей «умной» сельскохозяйственной системы, оснащаются интеллектуальной системой управления на основе нейрокогнитивной архитектуры.

Нейрокогнитивные архитектуры – это формальный и алгоритмический аппарат моделирования мыслительной деятельности (рассуждения и принятия решений), в течение ряда лет разрабатываемый учеными КБНЦ РАН, отличающийся способностью к самостоятельному обучению на основе наблюдений и при взаимодействии с помощью естественного языка в коммуникативном окружении (операторы, пользователи системы, агрономы и др.) [8].

Работа направлена на создание и исследование системы т.н. федеративного обучения интеллектуальных программных агентов на основе управляющих нейрокогнитивных архитектур.

При федеративном обучении каждый из интеллектуальных агентов, управляющих каким-то отдельным сельскохозяйственным объектом, или единицей беспилотной техники (наземные, воздушные, надводные беспилотники и роботы) в составе «умной» сельскохозяйственной системы использует свою нейрокогнитивную архитектуру для того, чтобы обучиться на основе данных со своих датчиков и информации, вводимой операторами, сформировать новые знания об участке своей функциональной ответственности, а затем передать эти знания всем другим таким же агентам в составе этой «умной» системы.

Таким образом, при федеративном обучении знания, полученные одним интеллектуальным агентом на своем функциональном участке путем затрат собственных вычислительных ресурсов, становятся доступны всем другим заинтересованным агентам, которым уже нет необходимости затрачивать на это новые ресурсы, что резко увеличивает производительность машинного обучения и повышает интеллект «умной» системы. Сегодня создание и массовое практическое применение «умных» сельскохозяйственных систем, автономных беспилотных сельскохозяйственных машин и роботов сдерживается низким уровнем функциональных возможностей, применяемых для управления ими систем искусственного интеллекта.

Создание методов, алгоритмов и программного обеспечения для федеративного обучения интеллектуальных управляющих агентов на основе нейрокогнитивных архитектур позволит преодолеть эту проблему, так как обеспечит резкое увеличение интенсивности производства знаний, необходимых для эффективной работы таких агентов, на основе процессов самостоятельного обучения и свободного обмена знаниями между ними. В отличие от существующих формализмов искусственного интеллекта, основанных на классической модели нейронной сети как взвешивающего сумматора, создание таких систем не потребует длительной и дорогостоящей процедуры подготовки обучающей выборки, а полученные знания будут актуализироваться на постоянной основе [9, 10].

Классический подход к системе автоматизации выращивания посевов предполагает сбор данных со всех сенсоров, доступных в поле (например, с метеостанций, навесного оборудования на сельскохозяйственной технике, дронов и роботов) на единый вычислительный центр, который занимается сбором, хранением и обработкой данных. Результаты обработки данных и команды пользователя высылаются всем активным устройствам в системе автоматизации на поле, которые, в свою очередь, выполняют поставленные команды. Структура подобной системы показана на рис. 1. Синими стрелками на рисунке показаны пути обмена данными между участниками системы.

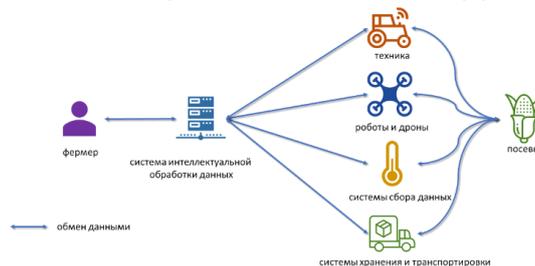


Рис. 1. Структура обмена данными в системе, которую сейчас принято считать «умным» полем

При этом термин «умное» поле предполагает использование интеллектуальной системы принятия решений. Подобные системы, зачастую использующие обработку больших данных и машинное обучение на основе искусственных нейронных

сетей, также активно внедряются в сельскохозяйственное производство. Например, существует ряд работ, посвященных распознаванию вредителей, сорных растений и заболеваний на посевах на основе распознавания образов, полученных за счет обычной и мультиспектральной съемки [11–15]. При этом, для обучения нейросетей приходится использовать достаточно большие обучающие выборки с размеченными на них целевыми объектами (сорняками и вредителями) [16]. Также существует множество различных робототехнических комплексов, применяемых в сельском хозяйстве и автономно выполняющих задачи мониторинга состояния, обработки посевов и сбора урожая [17–19]. При этом стоит учитывать сложности реализации систем принятия решений, использующих классические формализмы искусственного интеллекта, связанные с большой степенью неопределенности, длительностью процесса сбора данных, дороговизной экспериментов и большим объемом необходимых для принятия решения данных. В этом случае, одним из возможных путей перехода к интеллектуальному управлению сельским хозяйством может стать использование подхода, основанного на федеративном обучении, то есть, использования большого количества независимых интеллектуальных систем принятия решений, которые могут обучаться при выполнении определенных задач в рамках обслуживания процесса выращивания посевов. При этом, учитывая значительный объем «сырых» данных, генерируемых системами «умного» земледелия, встает необходимость организации обмена знаниями, сгенерированными отдельными интеллектуальными системами. Это ограничивает применимость классических искусственных нейронных сетей, в которых нет возможности выделить алгоритм принятия определенного решения из общей структуры сети. Для этого могут подойти формализмы искусственного интеллекта, позволяющие выделять и передавать знания, сгенерированные системой, например, мультиагентные нейрокогнитивные модели позволяют создавать функциональные системы, представляющие группу нейронов, отвечающих за выполнение определенной подзадачи (например, онтологическое описание факта, описывающего взаимосвязь между проведенной агротехнической операцией и изменением состояния посевов). В этом случае система принятия решений (интеллектуальный агент) изначально реализована как часть мультиагентной системы и имеет возможность передавать данные и полученные знания в более сжатом виде. Такой подход позволяет использовать небольшие специализированные системы управления в виде отдельных интеллектуальных агентов, управляющих автономными роботами и техникой, подключенной к «умному» полю. При этом каждый участник системы управления обменивается знаниями между собой и между основным центром управления, который занимается стратегическим планированием работ. Структура обмена данными и знаниями в подобной системе показана на рис. 2. Как видно из рисунка, после передачи данных с конечных устройств, система использует только обмен знаниями между интеллектуальными агентами. При этом взаимодействие с пользователем (владельцем посевов, специалистами и его работниками) уже может быть реализовано с использованием естественного языка, что позволит наиболее эффективно включить в систему управления людей.

Следующим этапом обмена знаниями является реализация центрального сервера для хранения знаний (мультиагентных фактов) о сельском хозяйстве. Принцип работы подобной системы также основан на взаимодействии отдельных интеллектуальных агентов, отвечающих за работу различных сельскохозяйственных предприятий. При этом каждая система может работать полностью автономно и обменивается информацией для увеличения скорости обучения всех участников подобного мультиагентного коллектива. Также общая база знаний не требует хранения и передачи значительного объема данных с сенсоров и при этом позволяет выделять нетривиальные закономерности. Схема обмена знаний при федеративном обучении показана на рис. 3.

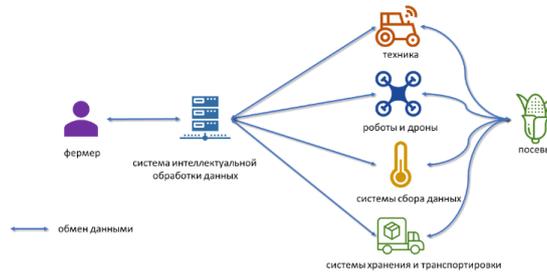


Рис. 2. Структура обмена данными и знаниями в системе «умного» поля на основе интеллектуальных агентов

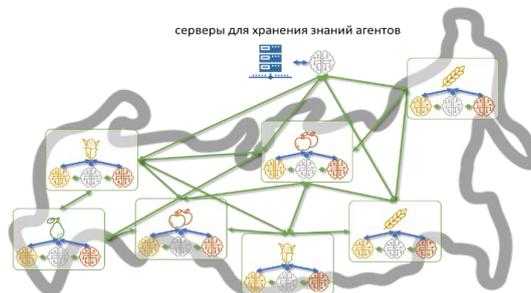


Рис. 3. Совместно накопленная база знаний в области сельского хозяйства сможет стать основой множества различных интеллектуальных агентов, эффективно выполняющих конкретные задачи в рамках распределенной сети систем управления «умными» полями

Федеративный подход к обучению отдельных интеллектуальных агентов, управляющих системами «умного» земледелия, позволит значительно увеличить скорость набора знаний интеллектуальных систем управления в сельском хозяйстве, что на данный момент является одной из значительных преград для перехода к безлюдному сельскому хозяйству. Рост скорости объема знаний интеллектуальных агентов должен привести к точке перехода к автономному сельскому хозяйству, после которой дальнейшее обучение систем управления значительно повысит эффективность сельского хозяйства не только за счет возможности ухода за каждым отдельным растением, но и за счет более точного прогнозирования процесса выращивания растений и подбора оптимальной траектории ухода за ним (рис. 4).

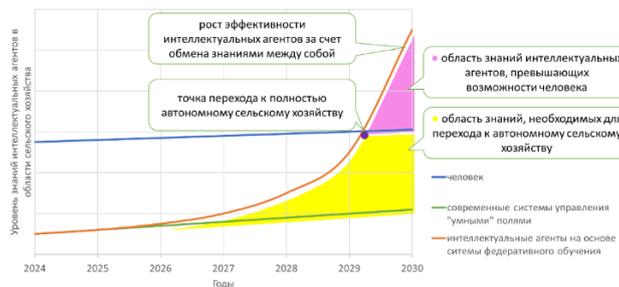


Рис. 4. Влияние внедрения методов и алгоритмов федеративного обучения интеллектуальных агентов на скорость роста продуктивной полноты знаний интеллектуальных агентов, управляющих «умными» сельскохозяйственными системами

Для апробации представленной концепции федеративного обучения для обеспечения работы систем интеллектуального управления ухода за урожаем был разработан ряд программных и аппаратных элементов системы «умное» поле. В частности, создан автономный робот для мониторинга и опрыскивании посевов (рис. 5). Данный робот предназначен для мониторинга и своевременного обнаружения заболевших растений, а также опрыскивания данных участков необходимыми активными веществами. Робот для активной защиты растений представляет собой узкую транспортную платформу (ширина менее 70 см позволяет двигаться по междурядью кукурузы). На этой платформе установлен комплекс сенсоров и устройств для навигации робота, бортовой компьютер, система питания, резервуар с активным раствором и насос для системы опрыскивания. Опрыскивание растений проводится с помощью 6 манипуляторов, установленных на двух П-образных каркасах. Каждый манипулятор состоит из опусков с двумя степенями свободы (движение по горизонтали и изменение высоты опуска), на которых установлен набор форсунок [20, 21]. Такое решение позволяет проводить одновременное опрыскивание до 8 рядов, регулируя высоту и плотность факела опрыскивания для каждого растения отдельно.



Рис. 5. Автономный робот для мониторинга и опрыскивании посевов, который будет применяться для отработки федеративных методов обучения управляющих нейрокогнитивных архитектур

Система управления автономным роботом использует мультиагентные нейрокогнитивные модели работы нейронов головного мозга [22]. Внешний вид программы для визуализации и редактирования отдельных агентов мультиагентной нейрокогнитивной архитектуры показан на рис. 6.

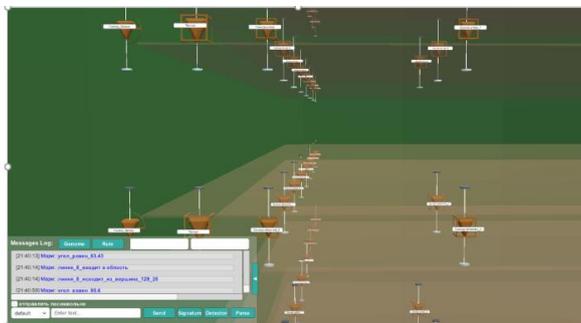


Рис. 6. Программа искусственного интеллекта на основе нейрокогнитивных архитектур

Для управления роботами и обеспечения взаимодействия пользователей и профильных специалистов был разработан сервис управления «умным» полем. Веб-интерфейс для доступа к «умной» сельскохозяйственной системе представляет собой экспертную систему для сбора данных и их передачи пользователю. Данная система является частью онлайн-сервиса актовой защиты растений. Данные собираются роботом и другими сенсорами (например, метеостанцией) непосредственно на поле. Потом информация от сенсоров передается на сервер. На сервере данные хранятся и при необходимости передаются клиентам. Визуализация данных происходит на конечном устройстве пользователя (персональный компьютер или смартфон) в виде веб-интерфейса. Скриншот страницы разработанного сервиса показан на рис. 7.

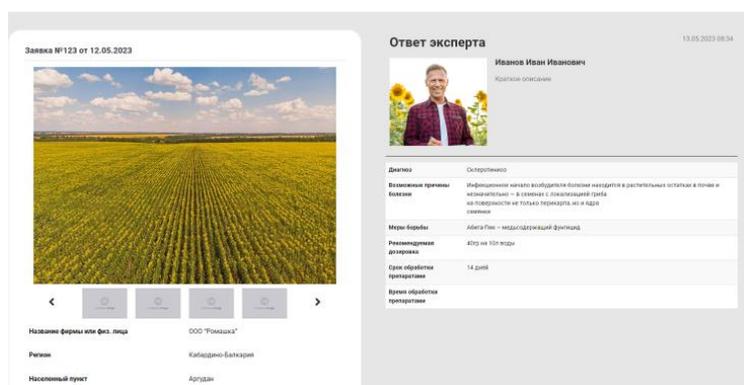


Рис. 7. Проект веб-интерфейса для доступа к «умной» сельскохозяйственной системе на основе федеративного обучения нейрокогнитивных интеллектуальных управляющих программных агентов

На данном этапе ведется отработка алгоритмов управления роботами в полевых условиях. Дальнейшее распространение подобных систем с реализацией федеративного обучения позволит обеспечить ряд преимуществ, способствующих продовольственной безопасности страны (табл. 1). В частности, создание общей базы знаний в области сельского хозяйства и управления агроботами позволит обеспечить переход к полностью автономному сельхозпроизводству и минимизировать потери урожая, связанные с заболеваниями, вредителями и ошибками в планировании агротехнических операций.

Таблица 1

Ожидаемые эффекты внедрения технологий, основанных на разрабатываемых методах и алгоритмах федеративного обучения ИА, управляющих системами умного поля

Ожидаемый эффект	Группа технологий, на основе результатов предложенной НИР
Снижение потерь урожая	Применение интеллектуальных агентов и автономных роботов (в том числе и разрабатываемых в КБНЦ РАН) под их управлением позволит обеспечить реализацию оптимального ухода за посевами с учетом внешних условий, своевременным обнаружением и устранением возможных угроз
Повышение урожайности	Интеллектуальные агенты, обладающие необходимым набором знаний, могут подобрать наиболее эффективный план агротехнических операций с учетом всей совокупности факторов, что позволит обеспечить рост урожайности

Снижение себестоимости продукции	Использование интеллектуальных агентов для управления автономными роботами позволит перейти к полностью автономному сельскому хозяйству и исключить оплату труда из структуры затрат. Прогнозирование угроз и точечная обработка посевов автономными роботами позволят заметно снизить расходы, затраты и издержки
Снижение экологической нагрузки	Перенос фокуса агротехнических операций с поля на отдельное растение с помощью автономных роботов позволит снизить объем вносимых химикатов, что, в свою очередь, заметно уменьшает экологическую нагрузку
Повышение качества продукции	Интеллектуальные агенты позволят рассчитать наиболее эффективный план агротехнических операций для данного поля, что приведет к повышению потребительских свойств выращиваемой продукции
Снижение темпов деградации почвы	Коллективы интеллектуальных агентов программный агент позволит реализовать интеллектуальное управление севооборотом (с учетом внешних условий и истории полей), что позволит снизить темпы деградации почвы

Оценка эффективности внедрения технологий, основанных на разрабатываемых методах и алгоритмах федеративного обучения ИА, имеет стратегический характер, поскольку некоторые программные агенты уже показывают позитивную тенденцию в сохранении планируемого урожая, можно предположить, что в дальнейшем при разработке и внедрении данной системы покажут и другие положительные эффекты.

Заключение. Главный системный результат внедрения федеративного обучения – существенный рост интеллекта «умных» сельскохозяйственных систем, что значительно расширит их применимость в сложных условиях реальной среды, создаст предпосылки для резкого снижения издержек, повышения производительности и эффективности сельхозпроизводства за счет оптимизации процессов, применения беспилотных машин и роботов.

Создание интеллектуальных самообучающихся систем управления для беспилотных сельскохозяйственных машин и автономных роботов, которые позволят эффективно выполнять агротехнические операции без участия человека.

Создание систем прогнозирования для «умного поля», которые по полученным данным смогут предугадывать изменения в характере вегетации, возможные заболевания, необходимые удобрения и прогнозируемый урожай.

Автоматизация управления человеко-машинным коллективом при обработке посевов (все уровни управления от планирования посева до реализации урожая).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орбачев М.И., Моторин О.А., Суворов Г.А. Развитие умного сельского хозяйства России и за рубежом // Управление рисками в АПК. – 2020. – № 2. – С. 62-72. – URL: <http://www.agrorisk.ru>.
2. Белых Д.В., Медведева Л.Н. "Умная техника" и "умные технологии" в обеспечении развития сельского хозяйства // Современное экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты рационального природопользования, С. Соленое Займище, 28 февраля 2018 года. – С. Соленое Займище: Прикаспийский научно-исследовательский институт аридного земледелия, 2018. – С. 1349-1353.
3. Бжухатлов К.Ч., Загазежева О.З. Разработка модели взаимодействия в социо-эколого-экономической системе сельских территорий в условиях внедрения новых технологий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2022. – № 6 (110). – С. 194-202. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-194-202.
4. Черненко А.Б., Черников Н.С., Багинский Н.А., Сысоев М.И. Особенности применения роботизированных платформ в сельском хозяйстве // Проблемы науки. – 2020. – № 8 (153). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-robotizirovannyh-platform-v-selskom-hozyaystve> (дата обращения: 27.02.2024).
5. Пишенокова И.А., Бжухатлов К.Ч., Унагасов А.А., Абазоков М.А. Мультиагентный алгоритм сбора данных с метеостанции для прогнозирования урожайности и состояния посевов // Известия ЮФУ. Технические Науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 91-101.

6. *Hachimi C.E., et al.* Smart Weather data management based on artificial intelligence and big data analytics for precision agriculture // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – P. 95.
7. *Nagoev Z., Pshenokova I., Gurtueva I., Bzhikhatlov K.* A simulation model for the cognitive function of static objects recognition based on machine-learning multi-agent architectures / In: *Samsonovich, A. (ed.) // Biologically inspired cognitive architectures 2019. BICA 2019. Advances in intelligent systems and computing. Vol 948.* – Springer, Cham, 2020. – https://DOI.org/10.1007/978-3-030-25719-4_48.
8. *Коношин Д.И., Измесьев М.М.* Особенности применения интеллектуальных систем опрыскивания в сельском хозяйстве // *Аграрная наука - 2022: Матер. всероссийской конференции молодых исследователей, Москва, 22–24 ноября 2022 года.* – М.: Российский государственный аграрный университет - МСХА Им. К.А. Тимирязева, 2022. – С. 1074-1077.
9. *Nagoev Z., Pshenokova I., Anchekov M.* Model of the reasoning process in a multi-agent cognitive system // *Procedia Computer Science*. – 2020. – 169. – P. 615-619. – <https://DOI.org/10.1016/j.procs.2020.02.202>.
10. *Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., and Kankulov S.* Situational analysis model in an intelligent system based on multi-agent neurocognitive architectures // *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. – 2021. – 2131. – 022103. – DOI:10.1088/1742-6596/2131/2/022103.
11. *Jabir Brahim, Rabhi Loubna, Falih Noureddine.* RNN - and CNN-Based weed detection for crop improvement: An Overview // *Foods And Raw Materials*. – 2021. – No. 2. – DOI: 10.21603/2308-4057-2021-2-387-396.
12. *Murad N.Y., Mahmood T., Forkan A.R.M, Morshed A., Jayaraman P.P., Siddiqui M.S.* Weed Detection Using Deep Learning: A Systematic Literature Review // *Sensors (Basel)*. – 2023 Mar. 31. – 23 (7). – 3670. – DOI: 10.3390/s23073670.
13. *Erunova Marina G., Pisman Tamara I., Shevyrnogov Anatoliy P.* The technology for detecting weeds in agricultural crops based on vegetation index VARI (planetscope) // *Журнал СВУ. Техника и технологии*. – 2021. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/the-technology-for-detecting-weeds-in-agricultural-crops-based-on-vegetation-index-vari-planetscope> (дата обращения: 29.02.2024).
14. *Badhan S., Desai K., Dsilva M., Sonkusare R. and Weakey S.* Real-Time Weed Detection using Machine Learning and Stereo-Vision // *6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Maharashtra, India, 2021. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/I2CT51068.2021.9417989.
15. *Filbert H. Juwono, W.K. Wong, Seema Verma, Neha Shekhawat, Basil Andy Lease, Catur Apriono.* Machine learning for weed-plant discrimination in agriculture 5.0: An in-depth review // *Artificial Intelligence in Agriculture*. – 2023. – Vol. 10. – P. 13-25. – DOI: 10.1016/j.iaia.2023.09.002.
16. *Wang P., Tang Y., Luo F., Wang L., Li C., Niu Q. and Li H.* Weed25: A deep learning dataset for weed identification // *Front. Plant Sci*. – 2022. – Vol. 13.
17. *Cheng C., Fu J., Su, H., Ren, L.* Recent advancements in agriculture robots: Benefits and Challenges // *Machines*. – 2023, – 11. – P. 48. – DOI: 10.3390/machines11010048.
18. *Mitrofanova Olga & Blekanov Ivan & Sevostyanov Danila & Zhang Jia & Mitrofanov Evgenii.* Development of a robot for agricultural field scouting // *In Lecture Notes in Computer Science*. – 2023. – P. 185-196. – DOI: 10.1007/978-3-031-43111-1_17.
19. *Zhang Anzheng & Pan Yuzhen & Zhang Chenyun & Wang Jinhua & Chen Guangrong & Shang Huiliang.* Design and implementation of a novel agricultural robot with multi-modal kinematics // *In Intelligent Robotics and Applications*. – 2023. – P. 395-406. – Springer Nature Singapore. – DOI: 10.1007/978-981-99-6480-2_33.
20. *Бжикхатлов К.Ч., Загазежева О.З., Мамбетов И.А.* Концепция интеллектуальной системы защиты растений и оценка эффективности ее внедрения // *Перспективные системы и задачи управления: Матер. XVIII всероссийской научно-практической конференции и XIV молодежной школы-семинара. Посвящается памяти почетного члена оргкомитета конференции, водителя первого лунохода, генерал-майора В.Г. Довганя, п. Домбай, Карачево-Черкесская Республика, 03–07 апреля 2023 года.* – Таганрог: Общество с ограниченной ответственностью изд-во "Лукоморье", 2023. – С. 404-412.
21. *Alzaghir A.* Flying fog mobile edge computing based on UAV-assisted for iot nodes in smart agriculture // *Proceedings of Telecommunication Universities*. – 2022. – Vol. 8, No. 4. – P. 82-88. – DOI: 10.31854/1813-324x-2022-8-4-82-88.
22. *Нагоев З.В.* Интеллектика, или Мышление в живых и искусственных системах. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2013.

REFERENCES

1. *Orbachev M.I., Motorin O.A., Suvorov G.A.* Razvitie umnogo sel'skogo khozyaystva Rossii i za rubezhom [Development of smart agriculture in Russia and abroad], *Upravlenie riskami r APK* [Risk management in the agro-industrial complex], 2020, No. 2, pp. 62-72. Available at: <http://www.agrorisk.ru>.
2. *Belykh D.V., Medvedeva L.N.* "Umnaya tekhnika" i "umnye tekhnologii" v obespechenii razvitiya sel'skogo khozyaystva ["Smart technology" and "smart technologies" in ensuring the development of agriculture], *Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie prirodnoy sredy i nauchno-prakticheskie aspekty ratsional'nogo prirodopol'zovaniya, S. Solenoe Zaymishche, 28 fevralya 2018 goda* [Current ecological state of the natural environment and scientific and practical aspects of rational environmental management, Solenoye Zaimishche Village, February 28, 2018]. – Solenoye Zaimishche Village: Prikaspiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut aridnogo zemledeliya, 2018, pp. 1349-1353.
3. *Bzhikhatlov K.Ch., Zagazezheva O.Z.* Razrabotka modeli vzaimodeystviya v sotsio-ekologo-ekonomicheskoy sisteme sel'skikh territoriy v usloviyakh vnedreniya novykh tekhnologiy [Development of a model of interaction in the socio-ecological-economic system of rural territories in the context of the introduction of new technologies], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS], 2022, No. 6 (110), pp. 194-202. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-194-202.
4. *Chernenko A.B., Chernikov N.S., Baginskiy N.A., Sysoev M.I.* Osobennosti primeneniya robotizirovannykh platform v sel'skom khozyaystve [Features of the use of robotic platforms in agriculture], *Problemy nauki* [Problems of science], 2020, No. 8 (153). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-priimeneniya-robotizirovannyh-platform-v-sel'skom-hozyaystve> (accessed 27 February 2024).
5. *Pshenokova I.A., Bzhikhatlov K.Ch., Unagasov A.A., Abazokov M.A.* Mul'tiagentnyy algoritm sbora dannykh s meteostantsii dlya prognozirovaniya urozhaynosti i sostoyaniya posevov [Multi-agent algorithm for collecting data from a weather station to predict the yield and condition of crops], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie Nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 91-101.
6. *Hachimi C.E., et al.* Smart Weather data management based on artificial intelligence and big data analytics for precision agriculture, *Agriculture*, 2022, Vol. 13, No. 1, pp. 95.
7. *Nagoev Z., Pshenokova I., Anchekov M.* Model of the reasoning process in a mul-tiagent cognitive system, *Procedia Computer Science*, 2020, 169, pp. 615-619. Available at: <https://DOI.org/10.1016/j.procs.2020.02.202>.
8. *Konoshin D.I., Izmes'ev M.M.* Osobennosti primeneniya intellektual'nykh sistem opryskivaniya v sel'skom khozyaystve [Features of the use of intelligent spraying systems in agriculture], *Agrarnaya nauka - 2022: Mater. vsrossiyskoy konferentsii molodykh issledovateley, Moskva, 22–24 noyabrya 2022 goda* [Agrarian Science - 2022: Proceedings of the All-Russian Conference of Young Researchers, Moscow, November 22–24, 2022]. Moscow: Rossiyskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet - MSKhA Im. K.A. Timiryazeva, 2022, pp. 1074-1077.
9. *Nagoev Z., Pshenokova I., Anchekov M.* Model of the reasoning process in a mul-tiagent cognitive system, *Procedia Computer Science*, 2020, 169, pp. 615-619. Available at: <https://DOI.org/10.1016/j.procs.2020.02.202>.
10. *Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., and Kankulov S.* Situational analysis model in an intelligent system based on multi-agent neurocognitive architectures, *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, 2021, 2131, 022103. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022103.
11. *Jabir Brahim, Rabhi Loubna, Falih Noureddine.* RNN - and CNN-Based weed detection for crop improvement: An Overview, *Foods And Raw Materials*, 2021, No. 2. DOI: 10.21603/2308-4057-2021-2-387-396.
12. *Murad N.Y., Mahmood T., Forkan A.R.M., Morshed A., Jayaraman P.P., Siddiqui M.S.* Weed Detection Using Deep Learning: A Systematic Literature Review, *Sensors (Basel)*, 2023 Mar. 31, 23 (7), 3670. DOI: 10.3390/s23073670.
13. *Erunova Marina G., Pisman Tamara I., Shevyrnogov Anatoliy P.* The technology for detecting weeds in agricultural crops based on vegetation index VARI (planetscope), *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of SFU. Technics and technology], 2021, No. 3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/the-technology-for-detecting-weeds-in-agricultural-crops-based-on-vegetation-index-vari-planetscope> (accessed 29 February 2024).

14. *Badhan S., Desai K., Dsilva M., Sonkusare R. and Weakey S.* Real-Time Weed Detection using Machine Learning and Stereo-Vision, *6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Maharashtra, India, 2021*, pp. 1-5. DOI: 10.1109/I2CT51068.2021.9417989.
15. *Filbert H. Juwono, W.K. Wong, Seema Verma, Neha Shekhawat, Basil Andy Lease, Catur Apriono.* Machine learning for weed–plant discrimination in agriculture 5.0: An in-depth review, *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2023, Vol. 10, pp. 13-25. DOI: 10.1016/j.iaia.2023.09.002.
16. *Wang P., Tang Y., Luo F., Wang L., Li C., Niu Q. and Li H.* Weed25: A deep learning dataset for weed identification, *Front. Plant Sci.*, 2022, Vol. 13.
17. *Cheng C., Fu J., Su, H., Ren, L.* Recent advancements in agriculture robots: Benefits and Challenges, *Machines*, 2023, 11, pp. 48. DOI: 10.3390/machines11010048.
18. *Mitrofanova Olga & Blekanov Ivan & Sevostyanov Danila & Zhang Jia & Mitrofanov Evgenii.* Development of a robot for agricultural field scouting, *In Lecture Notes in Computer Science*, 2023, pp. 185-196. DOI: 10.1007/978-3-031-43111-1_17.
19. *Zhang Anzheng & Pan Yuzhen & Zhang Chenyun & Wang Jinhua & Chen Guangrong & Shang Huiliang.* Design and implementation of a novel agricultural robot with multi-modal kinematics, *In Intelligent Robotics and Applications*, 2023, pp. 395-406. Springer Nature Singapore. DOI: 10.1007/978-981-99-6480-2_33.
20. *Bzhikhatlov K.Ch., Zagazezheva O.Z., Mambetov I.A.* Kontseptsiya intellektual'noy sistemy zashchity rasteniy i otsenka effektivnosti ee vnedreniya [The concept of an intelligent plant protection system and assessment of the effectiveness of its implementation], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XVIII vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XIV molodezhnoy shkoly-seminara. Posvyashchaetsya pamyati pochetnogo chlena orgkomiteta konferentsii, voditelya pervogo lunokhoda, general-mayora V.G. Dovganya, p. Dombay, Karachevo-Cherkesskaya Respublika, 03–07 aprelya 2023 goda* [Perspective systems and management tasks: Materials of the XVIII All-Russian scientific and practical conference and the XIV youth school-seminar. Dedicated to the memory of the honorary member of the conference organizing committee, the driver of the first lunar rover, Major General V.G. Dovganya, Dombay, Karachevo-Cherkess Republic, April 03–07, 2023]. Taganrog: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu izd-vo "Lukomor'e", 2023, pp. 404-412.
21. *Alzaghir A.* Flying fog mobile edge computing based on UAV-assisted for iot nodes in smart agriculture, *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 82-88. DOI: 10.31854/1813-324x-2022-8-4-82-88.
22. *Nagoev Z.V.* Intellektika, ili Myshlenie v zhivykh i iskusstvennykh sistemakh [Intelligence, or Thinking in living and artificial systems]. Nal'chik: Izd-vo KBNTS RAN, 2013.

Статью рекомендовала к опубликованию к.ф.-м.н. Д.А. Крымшюкалова.

Ногоев Залимхан Вячеславович – Федеральный научный центр «Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»; e-mail: zaliman@mail.ru; тел.: +78662426562; г. Нальчик, Россия; к.т.н.; генеральный директор.

Бжихатлов Кантемир Чамалович – e-mail: haosit13@mail.ru; тел.: +79631663448; к.ф.-м.н.; зав. лабораторией «Нейрокогнитивные автономные интеллектуальные системы».

Загазежева Оксана Зауровна – e-mail: oksmil.82@mail.ru; тел.: +79289136674; к.э.н.; зав. «Инжиниринговым центром КБНЦ РАН».

Nagoev Zalikhan Vyacheslavovich – Federal Scientific Center “Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”; e-mail: zaliman@mail.ru; phone: +78662426562; Nalchik, Russia; cand. of eng. sc.; general director.

Bzhikhatlov Kantemir Chamalovich – e-mail: haosit13@mail.ru; phone: +79631663448; cand. of phys. and math. sc.; head of the laboratory «Neurocognitive autonomous intelligent systems».

Zagazezheva Oksana Zauravna – e-mail: oksmil.82@mail.ru; phone: +79289136674; cand. of ec. sc.; head of the "Engineering center of the KBSC RAS".

Раздел II. Системы управления и моделирования

УДК 007.52:629.3.05

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-122-133

А.Р. Гайдук, В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.Г. Гисцов

НЕПРЕРЫВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМИ НЕАФФИННЫМИ ОБЪЕКТАМИ *

Предложен метод построения непрерывного управления неаффинными по управлению объектами с дифференцируемыми нелинейностями и измеряемым вектором переменных состояния. Предложенный метод базируется на использовании квазилинейных моделей нелинейных объектов, которые создаются на основе их уравнений в форме Коши с сохранением точности описания. В работе показано, что управление по состоянию и воздействиям существует, если нелинейный объект является вполне управляемым по состоянию и удовлетворяет критерию управляемости выходом. Для определения управления необходимо по квазилинейной модели объекта найти ряд полиномов и решить полиномиальное и нелинейное алгебраическое уравнение. Метод является аналитическим и позволяет обеспечить некоторые первичные показатели качества. Область притяжения положения равновесия замкнутой системы определяется областью пространства состояний, в которой выполняется условие управляемости квазилинейной модели объекта. В зависимости от свойств нелинейностей объекта, управление определяется либо как функция переменных состояния и отклонения, либо является численным решением, получаемым итерационным методом. Искомое управление найдено в непрерывной форме, однако оно может быть легко записано в дискретном виде для реализации вычислительным устройством. В данной статье приводится обзор и краткий анализ известных результатов в области управления неаффинными объектами, формализуется решаемая задача, формулируются условия ее разрешимости, а также выводятся аналитические выражения для нахождения управляющего воздействия. Приведен численный пример с результатами синтеза и моделирования, который позволяет заключить, что приведенные соотношения приводят к нахождению непрерывного управления неаффинным объектом с дифференцируемыми нелинейностями и измеряемым вектором состояния, при котором обеспечиваются требуемые свойства замкнутой системы управления. При этом найденное управление обеспечивает равенство статической ошибки нулю и длительность переходного процесса, не превышающая заданную величину. Приведенные результаты моделирования замкнутой системы управления нелинейным неаффинным объектом третьего порядка подтверждают выполнение указанных свойств.

Неаффинный по управлению объект; дифференцируемая нелинейность; квазилинейная модель; полиномиальное уравнение; устойчивость; критерий управляемости выходом.

A.R. Gaiduk, V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev, V.G. Giscov

CONTINUOUS CONTROL OF NONLINEAR NON-AFFINE OBJECTS

The paper proposes a method for constructing continuous control of non-affine control objects with differentiable nonlinearities and a measurable state vector. The method is based on the use of quasilinear models of nonlinear objects, which are created on the basis of their equations in Cauchy

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00370 «Разработка вероятностных методов оптимизации траекторий группы подвижных робототехнических комплексов в априори неопределенной среде», <https://rscf.ru/project/22-29-00370/> на базе АО «НКБ Робототехники и систем управления».

form while maintaining the accuracy of the description. It is shown that control by state and influences exists if the nonlinear object is completely controllable by state and satisfies the criterion of output controllability. To determine the control, it is necessary to find a number of polynomials using the object model and solve polynomial and nonlinear algebraic equations. The method is analytical and allows us to provide some primary quality indicators. The region of attraction of the equilibrium position of a closed system is determined by the region of state space in which the controllability condition of the quasi-linear model of the object is satisfied. Depending on the nonlinearity properties of the object, control is defined either as a function of state and deviation variables, or is a numerical solution obtained by an iterative method. The required control is oriented towards implementation by a computing device. The article provides the formulation of the problem, the conditions for its solvability, as well as analytical expressions for finding the control action. A numerical example is given with the results of synthesis and modeling, which allows us to conclude that the above relations lead to finding continuous control of a non-affine object with differentiable nonlinearities and a measurable state vector, which ensures the required properties of a closed-loop control system.

Non-affine control object; differentiable nonlinearity; quasi-linear model; polynomial equation; stability; output controllability criterion.

Введение. Характеристики нелинейных объектов управления отличаются большим разнообразием, что обуславливает существенно разные свойства реальных нелинейных объектов. Это приводит к большому разнообразию методов создания нелинейных систем управления нелинейными объектами. При этом рассматриваемые объекты, чаще всего, считаются непрерывными, дифференцируемыми или интервально-дифференцируемыми нелинейностями. Довольно сложным является решение этой задачи в случаях, когда нелинейные объекты являются неаффинными по управлению и(или) по возмущениям [1–5]. В уравнениях таких объектов управление входит довольно сложным, нелинейным образом, что существенно осложняет его определение с применением известных методов синтеза нелинейных систем управления. В тоже время неаффинные по управлению объекты составляют довольно обширный класс нелинейных объектов; к ним относятся подводные аппараты, надводные суда, летательные аппараты, мобильные роботы и многие другие нелинейные объекты [4, 6–9].

В настоящее время для определения управления неаффинными объектами с дифференцируемыми нелинейностями, используются различные методы. Так в работах [1, 2], используется критерий гиперустойчивости В.М. Попова и условия L -диссипативности. Предложенный подход может применяться для создания нелинейных систем управления различными неаффинными динамическими объектами с запаздыванием. Однако использование критерия гиперустойчивости приводит к большим запасам по устойчивости и некоторым ограничениям на вид нелинейностей.

Весьма эффективным в ряде случаев оказывается адаптивный подход [3–5]. Это управление может дополняться робастным управлением, которое создается либо на основе метода обратного распространения ошибки, либо на основе метода обратной динамики. В работах [6, 7] адаптивное управление используется совместно с нечетким управлением. В данном подходе уравнения неопределенного неаффинного объекта преобразуются в уравнения нестационарного объекта, к которому применяется метод усреднения. При этом, адаптивное управление синтезируется с использованием аппроксимирующих свойств fuzzy-систем. Как правило, замкнутая система с fuzzy-управлением имеет ограниченную по норме ошибку. Из нечетких подходов для синтеза управления неаффинными системами применяются оптимизационная концепция Такаги-Сугено или нечеткая аппроксимация с применением фильтра нижних частот Баттерворта и метода функций Ляпунова.

Дискретное управление применяется в работах [5, 11], при этом параметры регулятора с дискретной обратной связью определяется с применением функции Ляпунова. Для решения задачи синтеза управлений неаффинными объектами на-

ходят применение и нейросети [12]. Однако применение многих распространенных методов синтеза нелинейных управлений в случае неаффинных объектов оказывается достаточно сложным.

В данной работе для определения непрерывного управления неаффинным по управлению объектом с дифференцируемыми нелинейностями предварительно выполняется представление его уравнений квазилинейной моделью [5, 13]. В том случае, когда эта модель удовлетворяет естественным условиям управляемости по состоянию, то достаточно просто находится непрерывное управление неаффинным объектом, которое обеспечивает устойчивость положения равновесия в большом или в целом. Последнее определяется той областью пространства состояний объекта, в которой выполняются условия управляемости по состоянию. Квазилинейная модель нелинейного объекта позволяет также оценить и управляемость его выходной величины и, соответственно, замкнутой системы. При выполнении соответствующих условий предложенный ниже подход позволяет обеспечить требуемое быстродействие и другие показатели качества процесса управления.

I. Постановка задачи. Рассмотрим нелинейный объект, описываемый системой дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\dot{w} = \xi(w, u), \quad v = \zeta(w), \quad (1)$$

где w – n -вектор-столбец переменных состояния; $\zeta(w)$ и $\xi(w, u)$ – дифференцируемые по всем аргументам нелинейные скалярная и n -вектор-функции, u – управление, v – выходная переменная объекта, причем $\xi(0,0)=0$, $\zeta(0)=0$; вектор w предполагается измеряемым.

Необходимо найти закон управления $u=u(w, g(t))$, как функцию задающего воздействия $g = g(t)$ и вектора w . При этом управлении положение равновесия замкнутой системы должно быть асимптотически устойчивым, по крайней мере в большом, статическая ошибка по задающему воздействию – равной нулю, а длительность переходного процесса при нулевых начальных условиях $w_0 = 0$ и $g(t) = g_0 1(t)$ не более заданной величины $t_{\text{пп}}^*$.

II. Решение задачи. Воспользовавшись дифференцируемостью нелинейностей системы (1) и аналитическим методом синтеза КЛМ [11, 12], запишем её квазилинейную модель, которая в данном случае имеет вид

$$\dot{w} = \Xi(w)w + h(w, u)u, \quad v = \zeta^T(w)w, \quad (2)$$

где

$$\Xi(w) = \begin{bmatrix} \chi_{11}(w) & \chi_{12}(w) & \dots & \chi_{1n}(w) \\ \chi_{21}(w) & \chi_{22}(w) & \dots & \chi_{2n}(w) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \chi_{n1}(w) & \chi_{n2}(w) & \dots & \chi_{nn}(w) \end{bmatrix}, \quad h(x, u) = \begin{bmatrix} \eta_1(w, u) \\ \eta_2(w, u) \\ \vdots \\ \eta_n(w, u) \end{bmatrix},$$

$$\zeta^T(w) = [\zeta_1(w) \ \zeta_2(w) \ \dots \ \zeta_n(w)]. \quad (3)$$

Коэффициенты χ_{ij} и η_j , $i=1,2,\dots,n$, $j=1,2,\dots,n$, в выражениях (2) и (3), зависящие от вектора w и управления u , определяются по формулам, приведенным в [13].

Основным свойством КЛМ является то, что эта модель описывает нелинейные объекты с дифференцируемыми нелинейностями с той же точностью, что и заданные дифференциальные уравнения в форме Коши типа (1). Отличительной особенностью КЛМ неаффинных по управлению объектов является зависимость

входного по управлению вектора $h(w, u)$ от управления u . По отношению к переменным состояния этот вектор может как зависеть от них, так и не зависеть [13–15], что не имеет значения.

Как отмечено выше, задача обеспечения устойчивости положения равновесия имеет решение, только в том случае, когда квазилинейная модель (2), (3) является управляемой по состоянию. Для оценки этого свойства КЛМ (2) сначала определяется матрица управляемости

$$U(w, u) = [h(w, u) \quad \Xi(w)h(w, u) \quad \dots \quad \Xi^{n-1}(w)h(w, u)], \quad (4)$$

а затем проверяется критерий управляемости по состоянию:

$$|\det U(w, u)| \geq \iota_1 > 0, \quad w \in \Theta_U, \quad u \in J_U, \quad (5)$$

где $\iota_1 > 0$ – некоторое число; Θ_U и J_U – некоторая окрестность точки $w = 0$ и интервал допустимых значений управления такие, что выполняется условие (5). Если это условие не выполняется, то заданный объект (1) является неуправляемым, и задача синтеза не имеет решения.

При выполнении условия управляемости по состоянию (5) задача обеспечения устойчивости положения равновесия имеет решение, а управление, в соответствии принципом управления по состоянию и воздействиям [15], ищется в следующей форме:

$$u = u(g, w) = l_g g - l^T w = l_g g - [l_1 w_1 + l_2 w_2 + \dots + l_n w_n], \quad (6)$$

где $l_g, l_i, i=1, 2, \dots, n$ – подлежащие определению функциональные коэффициенты, зависящие от переменных системы.

Для вывода расчетных соотношений, определяющих значения коэффициентов $l_g, l_i, i=1, 2, \dots, n$ в (6), запишем уравнение «управление-состояние» КЛМ (2). С этой целью, полагая в первом уравнении модели (2) $p = d/dt$, получим $p w = \Xi(w)w + h(w, u)u$ или

$$[pE - \Xi(w)]w = h(w, u)u. \quad (7)$$

Здесь E – единичная матрица [15]. Так как p – оператор, то матрица $[pE - \Xi(w)]$ при всех $|w| < \infty$ имеет обратную матрицу, поэтому из выражения (7) следует равенство

$$w = [pE - \Xi(w)]^{-1} h(w, u)u = \text{adj}[pE - \Xi(w)]h(w, u)u / \Xi(p, w). \quad (8)$$

Подставим вектор w из (8) в (6), умножим обе части полученного выражения на $\Xi(p, w) = \det[pE - \Xi(w)]$ и перенесём слагаемые с u в левую часть. В результате будем иметь

$$\{\Xi(p, w) + l^T \text{adj}[pE - \Xi(w)]h(w, u)\}u = l_g g. \quad (9)$$

Полученное выражение (9) – это операторное уравнение КЛМ замкнутой системы, записанное относительно управления u . Следовательно, полином в его левой части – это характеристический полином $\Upsilon(p, w, u)$ КЛМ замкнутой системы (1), (6) т.е.

$$\Xi(p, w) + l^T \text{adj}[pE - \Xi(w)]h(w, u) = \Upsilon(p, w, u). \quad (10)$$

Применяемый здесь алгебраический полиномиально-матричный (АПМ) метод синтеза [15] предполагает замену в (9) полинома $\Upsilon(p, w, u)$ гурвицевым полиномом той же степени

$$\Upsilon^*(p) = \prod_{j=1}^n (p - p_j^*) = p^n + \eta_{n-1}^* p^{n-1} + \dots + \eta_1^* p + \eta_0^*, \quad (11)$$

корни которого удовлетворяют условиям

$$p_j^* < -\nu_2 < 0; \quad |p_j^* - p_k^*| > \nu_3, \quad j \neq k, \quad j, k = \overline{1, n} \quad \nu_2 > 0, \quad \nu_3 > 0. \quad (12)$$

Гурвицевый полином (11) определяет требования к желаемому расположению корней характеристического уравнения замкнутой системы.

Произведение $l^T \text{adj}[pE - \Xi(w)]h(w, u)$ из (9) и (10) можно представить следующим образом:

$$l^T \text{adj}[pE - \Xi(w)]h(w, u) = \sum_{i=1}^n l_i \Upsilon_i(p, w, u), \quad (13)$$

где $\Upsilon_i(p, w, u) = e_i^T \text{adj}[pE - \Xi(w)]h(w, u)$. Полиномы $\Xi(p, w)$ и $\Upsilon_i(p, w, u)$ определяются выражениями

$$\Xi(p, w) = \det[pE - \Xi(w)] = p^n + \eta_{n-1}(w)p^{n-1} + \dots + \eta_1(w)p + \eta_0(w), \quad (14)$$

$$\Upsilon_i(p, w, u) = e_i^T \text{adj}[pE - \Xi(w)]h(w, u) = \gamma_{i,n-1}(w, u)p^{n-1} + \dots + \gamma_{i,1}(w, u)p + \gamma_{i,0}(w, u). \quad (15)$$

Здесь e_i – i -й столбец единичной $n \times n$ -матрицы E . С учётом выражений (11), (13) – (15) из (10) получаем следующее равенство:

$$\sum_{i=1}^n l_i \Upsilon_i(p, w, u) = \phi_{n-1}(w)p^{n-1} + \dots + \phi_1(w)p + \phi_0(w), \quad (16)$$

где $\phi_j(w) = \eta_j^* - \eta_j(w)$.

Полученное выражение (16) является полиномиальным уравнением относительно коэффициентов l_i n -вектора l из управления (6). Существование его решения гарантируется условием (5). Эти коэффициенты могут быть найдены путем приравнивания коэффициентов полинома при одинаковых степенях p в левой части (16) соответствующим коэффициентам в его правой части. Если же получаемые при этом уравнения записать в векторно-матричной форме, то получится система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), решение которой даёт вектор $l = l(w, u)$, зависящий от вектора w и управления u . Конкретнее процесс решения уравнения (16) будет показан ниже на численном примере.

Уравнение КЛМ замкнутой системы, с учетом найденного вектора $l = l(w, u)$ в управлении (6), имеет следующий вид:

$$\dot{w} = \Upsilon(w, u)w + h(w, u)l_g g, \quad (17)$$

где $\Upsilon(w, u) = \Xi(w) + h(w, u)l^T(w, u)$ – $n \times n$ -системная матрица КЛМ замкнутой системы (2), (6). В соответствии с выражениями (11), (14) – (16) характеристический полином $\Upsilon(p, w, u)$ этой матрицы при всех $w \in \Theta_U$ и $u \in J_U$ имеет вещественные, различные и отрицательные корни. Поэтому согласно [3] эта нелинейная система является гурвицевой, а её положение равновесия $w = 0$ – асимптотически устойчивым.

Следовательно, при $g = g_0 \mathbf{1}(t)$ и достаточно малом g_0 в замкнутой системе (17) возникает установившийся режим, т.е. при $t \rightarrow \infty$ производная $\dot{w} = 0$. Обозначим: $\lim w(t) = \bar{w}$, $\lim v(t) = \bar{v}$, $\lim u(t) = \bar{u}$ при $t \rightarrow \infty$. При этом условии уравнение (17) принимает вид

$$0 = \Upsilon(\bar{w}, \bar{u})\bar{w} + h(\bar{w}, \bar{u})\bar{l}_g g_0. \quad (18)$$

Так как полином $\Upsilon(p, w, u) = \det[pE - \Upsilon(w, u)]$ (10) по определению вектора $l = l(w, u)$, равен желаемому характеристическому полиному $\Upsilon^*(p)$ (14), то $\det[-\Upsilon(w, u)] = \det[pE - \Upsilon(w, u)]_{p=0} = \eta_0^* \neq 0$, т.е. матрица $\Upsilon(w, u)$ имеет обратную при всех $w \in \Theta_U$, в том числе и при \bar{w} . Это позволяет найти вектор \bar{w} из (18) и подставить его во второе уравнение (2), что приводит к выражениям:

$$\bar{w} = -\Upsilon^{-1}(\bar{w}, \bar{u})h(\bar{w}, \bar{u})\bar{l}_g g_0, \quad \bar{v} = -\zeta^T(\bar{w})\Upsilon^{-1}(\bar{w}, \bar{u})h(\bar{w}, \bar{u})\bar{l}_g g_0. \quad (19)$$

Статическая ошибка системы управления по задающему воздействию $g = g_0 l(t)$ определяется выражением $\varepsilon_{ст} = g_0 - \bar{v}$. Поэтому на основе выражения (19) заключаем, что она будет равна нулю если только $1 = -\zeta^T(\bar{w})\Upsilon^{-1}(\bar{w}, \bar{u})h(\bar{w}, \bar{u})\bar{l}_g$. Так как установившееся значение \bar{w} заранее неизвестно, то заменим его на w и, учитывая известное выражение $\Upsilon^{-1}(w) = \text{adj} \Upsilon(w) / \det \Upsilon(w)$, представим выражение $1 = -\zeta^T(\bar{w})\Upsilon^{-1}(\bar{w}, \bar{u})h(\bar{w}, \bar{u})\bar{l}_g$ следующим образом:

$$\det \Upsilon(w, u) = -\zeta^T(w) \text{adj} \Upsilon(w, u) h(w, u) l_g. \quad (20)$$

Так как матрица $\Upsilon(w, u)$ определяется выражением $\Upsilon(w, u) = \Xi(w) - h(w, u)l^T(w, u)$, то имеет место [19, с. 237] равенство

$$\text{adj} \Upsilon(w, u) h(w, u) = \text{adj}[\Xi(w) - h(w, u)l^T(w, u)]h(w, u) = \text{adj} \Xi(w) h(w, u). \quad (21)$$

Из выражений (20) – (21) следует, что нулевое значение статической ошибки неаффинной системы управления (1), (2) может быть обеспечено, если только выполняется условие

$$\gamma_{\text{наф}}(w, u) = -\zeta^T(w) \text{adj} \Xi(w) h(w, u) \neq 0, \quad w \in \Theta_U, \quad u \in J_U, \quad (22)$$

Неравенство (22) можно рассматривать, как условие или критерий управляемости выходом неаффинного объекта (1). Действительно, если это условие не выполняется, то путем изменения задающего воздействия $g = g_0 l(t)$ нельзя придать выходной величине $v = -\zeta(w)w$ не нулевое значение, так как согласно (19)–(21) в этом случае канал $g \rightarrow v$ имеет нулевой коэффициент передачи. Величину $\gamma_{\text{наф}}(w, u)$ можно рассматривать как признак управляемости выходом (ПУВ) неаффинных по управлению объектов.

Если по отношению к КЛМ (2) заданного неаффинного объекта (1) условие управляемости выходом выполняется, то из (20) следует выражение $l_g = l_g(w, u) = \det \Upsilon(w, u) / \gamma_{\text{наф}}(w, u)$. Это условие можно упростить, так как из приведенного выше равенства $\det[-\Upsilon(w, u)] = \eta_0^*$ и свойств определителей следует $\det \Upsilon(w, u) = (-1)^n \eta_0^*$. Итак, статическая ошибка $\varepsilon_{ст} = g_0 - \bar{v}$ синтезируемой системы будет равна нулю, если выполняется условие (22), а в выражении (6)

$$l_g = l_g(w, u) = (-1)^n \eta_0^* / \gamma_{\text{наф}}(w, u). \quad (23)$$

Подставляя полученный коэффициент (23) и вектор $l = l(w, u)$ в выражение (6), найдём, что искомое управление u определяется решением следующего нелинейного уравнения:

$$u - \frac{(-1)^n \eta_0^* g_0}{\gamma_{\text{наф}}(w, u)} + l^T(w, u)w = 0, \quad w \in \Theta_U, \quad u \in J_U, \quad (24)$$

где вектор $l(w, u)$ определяется решением полиномиального уравнения (16).

Таким образом, управление неаффинным объектом с дифференцируемыми нелинейностями существует, если КЛМ этого нелинейного объекта является управляемой по состоянию, и имеет управляемый выход, т. е. выполняются условия (4) и (22) при $w \subset \Omega_U; u \in J_u$.

Метод решения уравнения (24) зависит от вида нелинейностей уравнения объекта (1). Это решение может быть найдено аналитически в виде нелинейной функции $u = u(g, w)$ или же итерационным методом, с применением компьютерных программ решения нелинейных уравнений. В последнем случае решение уравнения (24) будет дискретным, с некоторым достаточно малым шагом. При этом на каждом шаге необходимо выбирать начальное приближение u_n . При $t = 0$ целесообразно принимать $u_n = 0$, а при $t > 0$ на каждом i -м шаге в качестве $u_{n,i}$ – принимать значение управления u_{i-1} , полученное на предыдущем шаге.

Покажем эффективность предложенного подхода на численном примере.

III. Пример. Синтезировать систему управления нелинейным объектом, нестационарный вариант которого рассматривался в [16]. Уравнения стационарного объекта имеют вид:

$$\dot{w}_1 = 0, 2w_1 + [1 + \exp(-w_1)]w_2 + 0, 3 \sin w_1, \quad (25)$$

$$\dot{w}_2 = \frac{1 - \exp(w_1 w_2)}{1 + \exp(w_1 w_2)} + (1 + 0, 2 \sin w_1)w_3, \quad (26)$$

$$\dot{w}_3 = 0, 5 \sin(w_1 w_2 w_3) + 0, 1 \sin(0, 5u) + 0, 42u, \quad v = w_1. \quad (27)$$

Обозначения – те же, что и выше. При этом, если $g = g_0 1(t)$ и $w_0 = 0$, то должно выполняться условие $\varepsilon = g_0 - \bar{v} = 0$, а длительность переходных процессов не должна превышать 5 с при $|u| \leq 100$.

Решение. Данный объект является неаффинным, так как управление u входит в его уравнения нелинейным образом. Для решения задачи воспользуемся предложенным подходом. Применяя аналитический метод синтеза КЛМ [15], получим квазилинейную модель (2) объекта (25)–(27):

$$\dot{w} = \begin{bmatrix} 0, 2 + 0, 3\varpi_1 & 1 + e^{-w_1} & 0 \\ 0, 2\varpi_1 w_3 & \varpi_2 & 1 \\ 0 & 0 & 0, 5\varpi_3 \end{bmatrix} w + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3(u) \end{bmatrix} u, \quad v = [1 \ 0 \ 0]w. \quad (28)$$

где $b_3(u) = 0, 42 + 0, 1\varpi_4(u)$,

$$\varpi_1 = \begin{cases} 0, & \text{if } w_1 = 0, \text{ otherwise,} \\ [\sin(w_1)] / w_1, & \end{cases}, \quad \varpi_2 = \begin{cases} 0, & \text{if } w_2 = 0, \text{ otherwise,} \\ \frac{1 - \exp(w_1 w_2)}{w_2 [1 + \exp(w_1 w_2)]}, & \end{cases},$$

$$\varpi_3 = \begin{cases} 0, & \text{if } w_3 = 0, \text{ otherwise,} \\ [\sin(w_1 w_2 w_3)] / w_3, & \end{cases}, \quad \varpi_4 = \begin{cases} 0, & \text{if } u = 0, \text{ otherwise,} \\ [\sin(0, 5u)] / u. & \end{cases} \quad (29)$$

Прежде всего, проверяется управляемость КЛМ (28) по состоянию и выходом. По (4) и (5) с учетом (28) находится $\det U(w, u) = -(1 + e^{-w_1})b_3^3(u) \neq 0$, а кри-

терий управляемости выходом (22) имеет вид $\gamma_{\text{наф}} = (1 + e^{-w_1})b_3(u) \neq 0$. Как видно, в данном случае задача синтеза имеет решение, поскольку оба критерия выполняются при всех допустимых значениях и вектора w , и управления u .

Переходя к её решению, находятся по (14), (15) с учетом матрицы $\Xi(w)$, вектора $h(w, u)$ из уравнений (28) и обозначений (29) полиномы:

$$\begin{aligned}\Xi(p, w) &= p^3 + \eta_2(w)p^2 + \eta_1(w)p + \eta_0(w), \\ \Upsilon_2(p, w, u) &= [p - 0, 2 - 0, 3\varpi_1]b_3(u), \\ \Upsilon_1(p, w, u) &= (1 + e^{-w_1})b_3(u),\end{aligned}\quad (30)$$

$$\Upsilon_3(p, w, u) = [p^2 - (\psi_1 + \varpi_2)p + \psi_2]b_3(u), \quad (31)$$

где

$$\begin{aligned}\eta_2(w) &= -0,5\varpi_3 - \varpi_2 - 0,3\varpi_1 - 0,2; \\ \eta_1(w) &= (0,5\varpi_2 + 0,15\varpi_1 + 0,1)\varpi_3 + [0,3\varpi_2 - 0,2w_3(1 + e^{-w_1})]\varpi_1 + 0,2\varpi_2; \\ \eta_0(w) &= [(0,1w_3(1 + e^{-w_1}) - 0,15\varpi_2)\varpi_1 - 0,1\varpi_2]\varpi_3; \quad \psi_1 = 0,2 + 0,3\varpi_1; \\ \psi_2 &= -\psi_1\varpi_2 + 0,2\varpi_1w_3(1 + e^{-w_1}),\end{aligned}\quad (32)$$

В данном случае порядок заданного объекта $n = 3$, поэтому по (11) формируется полином $\Upsilon^*(p) = p^3 + \eta_2^*p^2 + \eta_1^*p + \eta_0^*$, численные значения коэффициентов которого удобно выбрать в процессе моделирования. По коэффициентам полиномов $\Upsilon^*(p)$ и $\Xi(p, w)$ (30)–(32) находятся коэффициенты: $\phi_i(w) = \eta_i^* - \eta_i(w)$, $i = 0, 1, 2$. Используя коэффициенты полиномов $\Upsilon_i(p, w, u)$ (30), (31), а также коэффициенты $\phi_i(w)$, $i = 0, 1, 2$, записывается полиномиальное уравнение (16), решением которого определяются коэффициенты l_i искомого управления (6):

$$\begin{aligned}l_3 &= \frac{\eta_2^* - \eta_2(w)}{b_3(u)}; \quad l_2 = \frac{\eta_1^* - \eta_1(w) + (\psi_1 + \varpi_2)[\eta_2^* - \eta_2(w)]}{b_3(u)}; \\ l_1 &= \frac{\eta_0^* - \eta_0(w) + (\psi_1 l_2 + \psi_2 l_3)b_3(u)}{(1 + e^{-w_1})b_3(u)}.\end{aligned}\quad (33)$$

По выражению (23) с учетом найденного выше признака управляемости выходом КЛМ (28) $\gamma_{\text{наф}}(w, u) = (1 + e^{-w_1})b_3(u)$ получаем

$$l_g = l_g(w, u) = -\eta_0^* / (1 + e^{-w_1})b_3(u). \quad (34)$$

Полученные выражения (29)–(34) позволяют по (24) записать нелинейное уравнение, решение которого определяет значение искомого управления:

$$\begin{aligned}u - \frac{(-1)^n \eta_0^* g_0}{\gamma_{\text{наф}}(w, u)} + l_1(w, u)w_1 + l_2(w, u)w_2 + l_3(w, u)w_3 &= 0, \\ |w| \leq N < \infty; \quad u \in J_u.\end{aligned}\quad (35)$$

Так как приведённые выше выражения содержат много промежуточных функций, то уравнение (35) можно существенно упростить с тем, чтобы для его решения требовалось меньше машинного времени. В данном случае уравнение (35) приводится к виду:

$$[0, 42u + 0, 1 \sin(0, 5u)] + M(w, \varepsilon) = 0, \quad (36)$$

где

$$M(w, \varepsilon) = -\frac{\eta_0^* \varepsilon + \{\eta_0 - \psi_1 [(\eta_1^* - \eta_1) + \psi_1 (\eta_2^* - \eta_2)]\} w_1 + (\eta_1^* - \eta_1) w_2 + \{(\psi_1 + \varpi_2) w_2 + [1 + 0, 2 \sin(w_1)] w_3\} (\eta_2^* - \eta_2)}{1 + e^{-w_1}} + \quad (37)$$

Моделирование. Система является нелинейной, поэтому аналитически найти корни p_j^* полинома $\Upsilon^*(p)$ невозможно. Для выбора их начальных значений при моделировании можно воспользоваться выражением $\min |p_j^*| \geq (4 \div 6) / t_{\text{ин}}^*$, которое применяется в случае линейных систем. Здесь $t_{\text{ин}}^*$ желаемая длительность переходных процессов. При заданном $t_{\text{ин}}^* = 5 \text{ с}$ имеем $\min |p_j^*| \geq 0, 8 \div 1, 2$. Примем $p_1^* = -1$, $p_2^* = -2$, $p_3^* = -3$, тогда $\eta_2^* = 6$, $\eta_1^* = 11$, $\eta_0^* = 6$.

Моделирование проводилось в Matlab при различных начальных условиях w_0 и $g(t) = g_0 1(t)$ при $g_0 = 0$ и $g_0 = 1$. Некоторые результаты моделирования представлены на рис. 1–2. При этом $w_0 = [1 \ -0, 8 \ 0, 2]$ и $w_0 = 0$.

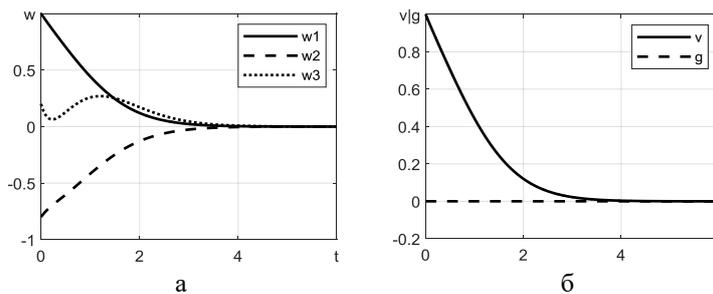


Рис. 1. Переходные процессы при $w_0 = [1 \ -0, 8 \ 0, 2]$

На рис. 1,а приведены графики изменения переменных состояния при ненулевых начальных условиях, а на рис. 1,б графики изменения выходной переменной v и воздействия $g_0 = 0$. Как видно, переменные состояния являются затухающими, т.е. положение равновесия синтезированной системы является асимптотически устойчивым.

На рис. 2 приведены переходные процессы той же системы, но при нулевых начальных условиях и единичном ступенчатом воздействии. На основе приведенных графиков можно заключить, что длительность переходных процессов синтезированной системы около 5 с, что соответствует условиям примера.

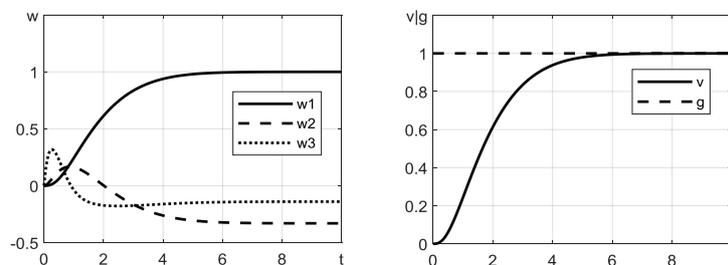


Рис. 2. Переходные процессы при ступенчатом воздействии

На основании полученных результатов моделирования можно заключить, что приведённые выше соотношения позволяют найти непрерывное управление неаффинным объектом с дифференцируемыми нелинейностями и измеряемым вектором состояния, при котором обеспечиваются требуемые свойства замкнутой системы управления.

Заключение. Предложенный в работе метод определения непрерывных управлений для неаффинных объектов является довольно простым и аналитическим. Он состоит в построении квазилинейной модели объекта, которая сохраняет все свойства неаффинного объекта. Строится она по нелинейным уравнениям объекта в форме Коши. Задача синтеза имеет решение, если только выполняются критерий управляемости по состоянию и критерий управляемости выходом. В этом случае полученные в работе соотношения приводят к нелинейному уравнению, решение которого определяет искомое управление неаффинным объектом. Область притяжения положения равновесия замкнутой системы определяется областью пространства состояний, в которой выполняется условие управляемости квазилинейной модели объекта. В зависимости от свойств нелинейностей объекта, управление определяется либо как функция переменных состояния и отклонения, либо является численным решением, получаемым итерационным методом. Искомое управление ориентировано на реализацию вычислительным устройством.

Предложенный подход может применяться для синтеза систем управления неаффинными объектами различного назначения, включая подводные аппараты [8, 9] и воздухоплавательные комплексы [10, 20]. В дальнейшем предполагается расширить полученные результаты на случай неаффинных и по возмущениям объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eremin E.L., Nikiforova L.V., Shelenok E.A. Nonlinear control system for non-affine undefined plants with output delays // Journal of Physics Conference Series. – November 2021. – 2096 (1). – 012063.
2. Eremin E.L., Nikiforova L.V., Shelenok E.A. Combined system for indeterminate non-affine plant with control delay on the set of functioning states // Journal of Physics Conference Series. – May 2021. – 1864 (1). – 012032. – DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012032.
3. Lavretsky E., Hovakimyan N. Adaptive dynamic inversion for nonaffine-in-control systems via time-scale separation: part II // Proceedings of the 2005 American Control Conference June 8-10, Portland, OR, USA. – Vol. 5. – P. 3548-3553.
4. Longsheng C., Qi W. Adaptive Robust Control for a Class of Uncertain MIMO Non-Affine Nonlinear Systems // IEEE/CAA Journal of Automatica SINICA. – 2016. – Vol. 3, No. 1. – P. 105-116. – DOI: 10.1109/JAS.2016.7373768.
5. Gaiduk A., Pshikhopov V., Medvedev M., Gissov V., Kabalan A., Kosenko E. Design of Hybrid Control System for Nonaffine Plants. In: Ronzhin, A., Sadigov, A., Meshcheryakov, R. (eds) // Interactive Collaborative Robotics. ICR 2023. Lecture Notes in Computer Science (). – Vol 14214. – Springer, Cham. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1_19.
6. Wen J, Jiang C. Adaptive fuzzy controller for a class of strict-feedback nonaffine nonlinear systems // Journal of Systems Engineering and Electronics. – 2011. – Vol. 22, No. 6. – P. 967-974.
7. Liu Y.-J., Wang W. “Adaptive fuzzy control for a class of uncertain nonaffine nonlinear systems // Information Sciences. – September 2007. – Vol. 177, No. 18. – P. 3901-3917.
8. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Синтез систем управления подводными аппаратами с нелинейными характеристиками исполнительных органов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3. – С. 147-154.
9. Пшихопов В.Х., Суконкин С.Я., Нагучев Д.Ш., Стракович В.В., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В., Костоков В.А., Волощенко Ю.П. Автономный подводный аппарат «Скат» для решения задач поиска и обнаружения заиленных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 153-162.
10. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Fedorenko R.V., Krukhmalev V.A., Gurenko B.V. Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2014. – P. 8953-8958.
11. Lin W, Sun J. New results and examples in semiglobal asymptotic stabilization of nonaffine systems by sampled-data output feedback // Systems & Control Letters. – 2021. – Vol. 148, Issue 11.

12. Li Y., Zhu Q., Zhang J., Deng Z. Adaptive fixed-time neural networks control for pure-feedback non-affine nonlinear systems with state constraints // *Entropy*. – 2022. – Vol. 24, Issue 5. – P. 737.
13. Гайдук А.Р. Численный метод синтеза квазилинейных моделей нелинейных объектов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2021. – Т. 22, № 6. – С. 283-290.
14. Гайдук А.Р. Алгебраический синтез нелинейных стабилизирующих управлений // *Синтез алгоритмов сложных систем*. – Таганрог: ТРТИ, 1989. – Вып. 7. – С. 15-19.
15. Gaiduk A.R., Prokopenko N.N., Bugakova A.V., Almashaal M.J. On the Global Stability of Nonlinear Hurwitz Control Systems // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. – 2022, December 26. – P. 1-10. – DOI: 10.1109/TASE.2022.3225763.
16. Zhou J., Li X. Finite-Time Mode Control Design for Unknown Nonaffine Pure-Feedback Systems // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2015. – Vol. 2015. – Article ID 653739. – 9 p.
17. Гайдук А.Р., Плаксиенко В.С., Кабалан А.Э.А. Алгебраический полиномиально-матричный метод синтеза нелинейных астатических систем // *Математические методы в технологиях и технике*. – 2022. – № 1. – С. 41-45. – DOI: 10.52348/2712-8873_ММТТ_2022_1_41.
18. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1988. – 552 с.
19. Гайдук А.Р. Непрерывные и дискретные динамические системы. – М.: УМ и ИЦ «Учебная литература», 2004. – 252 с.
20. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., Нейдорф Р.А., Беляев В.Е., Федоренко Р.В., Костюков В.А., Крухмалев В.А. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: математическая модель // *Мехатроника, автоматизация и управление*. – 2013. – № 6. – С. 14-21.

REFERENCES

1. Eremin E.L., Nikiforova L.V., Shelenok E.A. Nonlinear control system for non-affine undefined plants with output delays, *Journal of Physics Conference Series*, November 2021, 2096 (1), pp. 12063.
2. Eremin E.L., Nikiforova L.V., Shelenok E.A. Combined system for indeterminate non-affine plant with control delay on the set of functioning states, *Journal of Physics Conference Series*, May 2021, 1864 (1), 012032. DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012032.
3. Lavretsky E., Hovakimyan N. Adaptive dynamic inversion for nonaffine-in-control systems via time-scale separation: part II, *Proceedings of the 2005 American Control Conference June 8-10, Portland, OR, USA*, Vol. 5, pp. 3548-3553.
4. Longsheng C., Qi W. Adaptive Robust Control for a Class of Uncertain MIMO Non-Affine Nonlinear Systems, *IEEE/CAA Journal of Automatica SINICA*, 2016, Vol. 3, No. 1, pp. 105-116. – DOI: 10.1109/JAS.2016.7373768.
5. Gaiduk A., Pshikhopov V., Medvedev M., Gissov V., Kabalan A., Kosenko E. Design of Hybrid Control System for Nonaffine Plants. In: Ronzhin, A., Sadigov, A., Meshcheryakov, R. (eds), *Interactive Collaborative Robotics. ICR 2023. Lecture Notes in Computer Science* (), Vol 14214. Springer, Cham. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43111-1_19.
6. Wen J, Jiang C. Adaptive fuzzy controller for a class of strict-feedback nonaffine nonlinear systems, *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, Vol. 22, No. 6, pp. 967-974.
7. Liu Y.-J., Wang W. Adaptive fuzzy control for a class of uncertain nonaffine nonlinear systems, *Information Sciences*, September 2007, Vol. 177, No. 18, pp. 3901-3917.
8. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sintez sistem upravleniya podvodnymi apparatami s nelineynymi kharakteristikami ispolnitel'nykh organov [Synthesis of control systems for underwater vehicles with nonlinear characteristics of the executive bodies], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 3, pp. 147-154.
9. Pshikhopov V.Kh., Sukonkin S.Ya., Naguchev D.Sh., Strakovich V.V., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V., Kostyukov V.A., Voloshchenko Yu.P. Avtonomnyy podvodnyy apparat «Skat» dlya resheniya zadach poiska i obnaruzheniya zailennykh ob"ektov [Autonomous underwater vehicle "Scat" for solving problems of searching and detecting silted objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 3 (104), pp. 153-162.
10. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Fedorenko R.V., Krukhmaliev V.A., Gurenko B.V. Position-Trajectory Control System for Unmanned Robotic Airship, *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2014, pp. 8953-8958.
11. Lin W, Sun J. New results and examples in semiglobal asymptotic stabilization of nonaffine systems by sampled-data output feedback, *Systems & Control Letters*, 2021, Vol. 148, Issue 11.

12. Li Y., Zhu Q., Zhang J., Deng Z. Adaptive fixed-time neural networks control for pure-feedback non-affine nonlinear systems with state constraints, *Entropy*, 2022, Vol. 24, Issue 5, pp. 737.
13. Gayduk A.R. Chislennyy metod sinteza kvazilineynykh modeley nelineynykh ob'ektov [Numerical method for the synthesis of quasilinear models of nonlinear objects], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2021, Vol. 22, No. 6, pp. 283-290.
14. Gayduk A.R. Algebraicheskiy sintez nelineynykh stabiliziruyushchikh upravleniy [Algebraic synthesis of nonlinear stabilizing controls], *Sintez algoritmov slozhnykh sistem* [Synthesis of algorithms for complex systems]. Taganrog: TRTI, 1989, Issue 7, pp. 15-19.
15. Gaiduk A.R., Prokopenko N.N., Bugakova A.V., Almashaal M.J. On the Global Stability of Nonlinear Hurwitz Control Systems, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, December 26, pp. 1-10. DOI: 10.1109/TASE.2022.3225763.
16. Zhou J., Li X. Finite-Time Mode Control Design for Unknown Nonaffine Pure-Feedback Systems, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, Vol. 2015, Article ID 653739, 9 p.
17. Gayduk A.R., Plaksienko V.S., Kabalan A.E.A. Algebraicheskiy polinomial'no-matrichnyy metod sinteza nelineynykh astaticheskikh sistem [Algebraic polynomial-matrix method for the synthesis of nonlinear astatic systems], *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technologies and engineering], 2022, No. 1, pp. 41-45. – DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_1_41.
18. Gantmakher F.R. Teoriya matrits [Matrix theory]. Moscow: Nauka, 1988, 552 p.
19. Gayduk A.R. Nepreryvnye i diskretnye dinamicheskie sistemy [Continuous and discrete dynamic systems]. Moscow: UM i ITS «Uchebnaya literatura», 2004, 252 p.
20. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gayduk A.R., Neydorf R.A., Belyaev V.E., Fedorenko R.V., Kostyukov V.A., Krukhmalev V.A. Sistema pozitsionno-traektor'nogo upravleniya robotizirovannoy vozdukhoplavatel'noy platformoy: matematicheskaya model' [Position-trajectory control system for a robotic aeronautical platform: a mathematical model], *Mekhatronika, avtomatizatsiya i upravlenie* [Mechatronics, automation and control], 2013, No. 6, pp. 14-21.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.Г. Капустян.

Гайдук Анатолий Романович – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; д.т.н.; профессор, в.н.с.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – e-mail: pshichop@rambler.ru; д.т.н.; профессор; директор.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; д.т.н.; в.н.с.

Гисцов Владислав Геннадьевич – e-mail: giscov@sfedu.ru; инженер-исследователь.

Gaiduk Anatoly Romanovich – R&D Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; dr. of eng. sc.; professor; leading researcher.

Pshikhopov Viacheslav Khasanovich – e-mail: pshichop@rambler.ru; dr. of eng. sc.; professor; director.

Medvedev Mikhail Yurjevich – e-mail: medvmihal@sfedu.ru; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Giscov Vladislav Gennadjevich – e-mail: giscov@sfedu.ru; research engineer.

Р.Ф. Файзуллин, Е.А. Магид

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ
ЗАДАЧИ ПОКРЫТИЯ ТЕРРИТОРИИ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ НАЗЕМНОЙ
МОБИЛЬНОЙ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ: ФОРМИРОВАНИЕ ХРОМОСОМЫ**

Статья посвящена решению актуальной проблемы покрытия территории при помощи беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с использованием мобильных зарядных станций. Современные практические задачи покрытия территории требуют одновременного участия нескольких БЛА с целью оптимизации временных затрат в ходе миссии. Другим ограничивающим фактором в контексте охвата территории с использованием БЛА является длительность автономной работы этих систем. Из-за ограниченной дальности полета на одном заряде батареи может возникнуть необходимость в использовании зарядных станций для завершения миссии охвата. Статические зарядные станции позволяют зарядить аккумуляторы БЛА, однако это приводит к прерыванию миссии и увеличивает время, необходимое для завершения охвата. При использовании статических зарядных станций важно так же правильно выбрать их местоположение, учитывая доступные места для установки. При этом сам процесс установки зарядных станций требует времени, что делает их использование нецелесообразным в миссиях, где покрытие территории нужно осуществить в кратчайшие сроки, например, при спасательных или поисковых операциях. Мобильные зарядные станции, которые способны перемещаться по территории для оптимизации процесса зарядки или замены аккумуляторов БЛА лишены этих недостатков. Возникает задача планирования траекторий движения не только для БЛА, но и мобильной зарядной станции. При совместном планировании движения повышается эффективность охвата, но одновременно возрастает и вычислительная сложность при поиске траекторий. В настоящей статье решается задача эффективного покрытия территории с использованием нескольких БЛА и мобильной зарядной станции при помощи генетического алгоритма. Для адаптации задачи к использованию генетического алгоритма предлагается и обосновывается способ формирования хромосомы, которая корректно отражает решение задачи и позволяет закодировать траектории движения БЛА, мобильной зарядной станции, а также учитывает время и место проведения подзарядки или замены аккумулятора БЛА. Для исследования предложенного алгоритма разработано программное обеспечение на языке программирования Python. Адекватность предложенного подхода подтверждена результатами моделирования.

Генетический алгоритм; мобильный робот; беспилотный летательный аппарат (БЛА); групповое взаимодействие роботов; планирование маршрута; задача покрытия; формирование хромосомы.

R.F. Faizullin, E.A. Magid

**APPLICATION OF A GENETIC ALGORITHM TO THE AREA COVERAGE
PROBLEM WITH A GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES
SUPPORTED BY A GROUND MOBILE CHARGING STATION:
A CHROMOSOME FORMATION**

The paper considers a problem of area coverage by unmanned aerial vehicles (UAV) using mobile charging stations. Practical area coverage tasks require a simultaneous use of several UAVs in order to optimize time consumption during a mission. Another limiting factor in UAV-based coverage is a duration of a UAVs' single-battery autonomous operation. To complete a large territory coverage mission static or mobile charging stations could be employed in order to recharge or replace an onboard battery. Static charging stations cause a mission interruption and increase time required to complete the coverage mission. It is also important to choose proper locations in the case of static charging stations. However, a process of installing the charging stations is time-consuming, which makes them impractical for missions where coverage must be

achieved within a short period of time, e.g., such as rescue or emergency search operations. Mobile charging stations can move around the area to optimize a UAV battery recharging or replacing process. A challenge of the latter case is to plan motion trajectories not only for UAVs but also for a mobile charging station. Joint motion planning improves coverage efficiency but increases computational complexity of a trajectory planning. This paper considers a problem of efficient area coverage with multiple UAVs and a mobile charging station using a genetic algorithm. To adapt a genetic algorithm for the coverage problem, a chromosome formation method is proposed in the paper. The method allows encoding trajectories of the UAVs and the mobile charging station, and takes into account time and a place of charging (replacing) the UAV batteries. To evaluate the proposed approach, a software was developed in Python programming language. The obtained results of the simulation demonstrated feasibility of the proposed approach.

Genetic algorithm; mobile robot; unmanned aerial vehicle (UAV); group robot interaction; path planning; coverage problem; chromosome formation.

Введение. Задача покрытия территории [1] подразумевает посещение или обследование мобильным роботом всех точек карты в выделенных границах и естественным образом возникает из практических задач, таких как поисково-спасательные операции [2] или картография [3]. Решение задачи покрытия часто осуществляется с применением БЛА [4], поскольку данный тип мобильных роботов способен быстро охватывать обширные территории, преодолевая ограничения, связанные с рельефом местности и препятствиями на земле [5].

При постановке задачи покрытия нередко вводятся дополнительные ограничительные критерии. Например, ограничение по времени на проведение покрытия территории при выполнении поисково-спасательной операции [6]. При использовании единственного БЛА на больших по размеру территориях в условиях ограниченного времени задача становится неразрешимой. Это приводит к необходимости привлечения группы БЛА, где несколько аппаратов одновременно [7] охватывают территорию, избегая столкновений между собой [8]. Использование нескольких мобильных роботов повышает надежность системы и увеличивает скорость завершения миссии, но при этом задача поиска пути покрытия для группы БЛА становится более вычислительно сложной [9]. Другим ограничивающим фактором является время автономной работы БЛА на одном заряде батареи, за которое он способен преодолеть ограниченное расстояние. Расход энергии зависит от веса и габаритов самого БЛА, траектории полета, погодных условий и ряда других факторов [10].

В научной литературе рассматриваются несколько способов решения проблемы недостаточности единственного заряда батареи робота для исследования большой территории; самыми популярными являются подзарядка или замена батареи. Замена батареи БЛА [11] представляет собой более быстрый способ решения, но технологически он более сложен по сравнению с подзарядкой. Подзарядка может производиться на стационарных [12] или мобильных пунктах зарядки [13]. Стационарные пункты обладают преимуществом в обслуживании, так как они могут быть подключены к источникам энергии или использовать возобновляемые источники энергии, такие как солнечные батареи. Недостатком стационарных зарядных станций является необходимость для БЛА затрачивать энергию на перемещение до зарядной станции и обратно к точке продолжения прерванного маршрута после подзарядки [14]. Альтернативным решением служат мобильные зарядные станции [13], которые чаще всего реализуются с помощью наземных мобильных роботов, и способны перевозить достаточное количество съёмных аккумуляторов или аккумуляторы большой емкости для подзарядки батарей БЛА.

В данной работе рассматривается задача покрытия территории с помощью группы БЛА при поддержке наземной мобильной зарядной станции, которая производит замену батарей питания БЛА. Ячейки, в которых производится замена батарей, обозначаются как «точки подзарядки». Совместное планирование одно-

временного движения группы БЛА и мобильной зарядной станции повышает эффективность траектории покрытия. Сложность вычислений в задаче поиска оптимальных траекторий движения мобильного робота при охвате территории экспоненциально возрастает с увеличением сложности территории и количества мобильных роботов. На практике такие задачи решают с помощью эвристических алгоритмов [15]. В данной статье рассматривается применимость генетического алгоритма к сформулированной задаче покрытия территории; основной акцент сделан на формировании хромосом генетического алгоритма.

Формулировка проблемы. Исследуемая в рамках задачи покрытия территория задается в виде двумерного многоугольника M , с наложенной на нее сеткой. Сетка делит многоугольник M на множество ячеек одинакового размера $l \times l$. Предполагается связанность ячейки сетки с четырьмя ближайшими соседями по прямолинейным траекториям. Каждая ячейка m сетки пронумерована и имеет свой идентификационный номер k_m . Ячейка m относится к классу свободных ячеек или к классу ячеек бесполётной зоны Obs, в которых расположены высотные препятствия, не позволяющие БЛА находиться в данной ячейке. Соответственно, предполагается, что БЛА не могут совершать полеты над ячейками бесполётной зоны Obs [16]. Алгоритм работает в дискретном времени $T = 0, 1, 2, \dots, T_{max}$.

Задача покрытия выполняется группой из s БЛА, обозначим их $U = \{U_1, U_2, \dots, U_s\}$. БЛА в каждый дискретный момент времени находится только в одной ячейке сетки, и перемещается прямолинейно на соседнюю ячейку на каждом шаге. Траектория полета БЛА U_i обозначается как $L_i = [k_1^i, k_2^i, \dots, k_q^i]$, при этом длина полета считается как количество пройденных ячеек $|L_i| = q^i$. В начальный момент времени $T=0$ БЛА U_1, U_2, \dots, U_s находятся в разных стартовых ячейках: $ST = \{k_1^0, k_2^0, \dots, k_s^0\}$.

Емкость аккумулятора каждого БЛА предполагается одинаковой. На расход энергии БЛА при движении оказывает влияние множество факторов, включая погодные условия (например, наличие встречного ветра) и форму траектории БЛА (например, количество поворотов при движении). Однако главным фактором остается длина маршрута и, соответственно, время полета БЛА. Предполагая, что каждая БЛА движется с одинаковой скоростью, введем допущение, что потребление энергии прямо пропорционально пройденному пути БЛА, и при полном заряде аккумулятора БЛА способно пройти Z ячеек сетки. Заряд батареи БЛА U_i в момент времени t обозначим как $P_i(t)$; он численно равен количеству ячеек сетки, которое БЛА способно пройти на остатке заряда батареи ($P_i(t) \leq Z$).

Одновременно с БЛА в задаче покрытия участвует мобильная зарядная станция S ; это мобильный наземный робот, который в каждый дискретный момент времени находится только в одной свободной ячейке сетки, и способен перемещаться прямолинейно на соседнюю ячейку на каждом шаге, если данная ячейка не входит в класс Obs. Траекторию зарядной станции обозначим как $G = [k_1, k_2, \dots, k_r]$, где $k_i \notin \text{Obs}$. Когда БЛА U_i и зарядная станция оказываются в одной ячейке, БЛА U_i может произвести замену батареи аккумулятора. Зарядная станция в каждый момент времени может обслужить только один БЛА.

Требуется найти траектории полета для каждого БЛА (L_1, L_2, \dots, L_s) и траекторию движения для мобильной зарядной станции G [17], такие что траектории всех БЛА образуют полный охват всей территории $\cup_{i=1}^s L_i = M$, и при этом заряд батареи каждый БЛА $P_i(t)$ никогда не опускается ниже некоторого критического уровня ε : $P_i(t) > \varepsilon$ для $\forall t = 0, 1, \dots, T_{max}$.

Генетический алгоритм. Генетические алгоритмы [18], основанные на принципах естественного отбора, широко используются для оптимизации маршрутов мобильных роботов. Они моделируют эволюционные процессы, одновременно работая со множеством потенциальных решений задачи. Каждое рассматриваемое

решение в рамках генетического алгоритма называется индивидуумом, а множество всех решений на данном этапе называется популяцией. Процесс работы алгоритма разделен на этапы, на каждом из которых формируется новая популяция решений. На каждом этапе алгоритма выбираются индивидуумы для создания нового поколения с использованием фиксированного правила отбора. Индивидуумы с лучшими характеристиками имеют преимущество при передаче своих свойств следующей популяции. Далее с помощью операции кроссинговера [19] создается новая популяция. Кроссинговер представляет собой процесс, при котором индивидуумы текущей популяции с помощью установленных правил порождают новых индивидуумов, унаследовавших какие-то характеристики от родительских. Этот процесс обеспечивает передачу лучших свойств от родителей к будущим поколениям. С каждым этапом решения становятся более адаптированными к поставленной задаче. При этом генетический алгоритм стремится на каждом этапе поддерживать максимально разнообразную популяцию [20], чтобы вся популяция не составляла копию какого-то одного удачного (с точки зрения оценки целевой функции) решения. Мутация [21] представляет собой случайное изменение в характеристиках индивидуума, призванное поддерживать генетическое разнообразие и иногда способствующее нахождению новых эффективных решений.

Для применения генетического алгоритма к задаче покрытия территории с помощью группы БЛА вначале необходимо формализовать решение этой задачи в виде специального закодированного вектора [22]; в терминах генетического алгоритма данный вектор называется хромосомой, а каждый элемент вектора называется геном. Хромосома должна однозначно представлять решение задачи.

В нашей задаче для однозначного задания решения необходимо определить траектории полетов для всех БЛА U_1, U_2, \dots, U_s , траекторию движения для мобильной зарядной станции С и все точки подзарядки. Так как БЛА на каждом шаге перемещает прямолинейно на соседнюю ячейку, то ячейки каждой траектории U_i должны быть соседними. Траектория движения кодируется последовательностью номеров ячеек сетки, эта последовательность принимается за хромосому движения одного БЛА. Так как решение задачи представляет собой объединение всех траекторий движения БЛА, то хромосома решения задачи должна представлять собой объединение хромосом каждой БЛА, при этом длины траекторий движения БЛА могут быть произвольными. Хромосома, отражающая траекторию движения всех БЛА представлена на рис. 1.

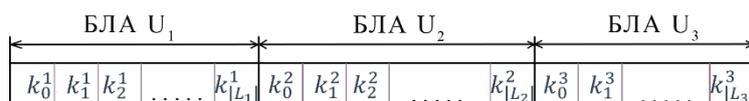


Рис. 1. Представление хромосомы группы БЛА

Использование аналогичного подхода для определения хромосомы для мобильной зарядной станции невозможно. Поскольку при задании только траектории движения теряется критически важная информация о ячейках, в которых происходит замена аккумулятора. Для однозначного определения точки подзарядки необходимо задать: номер ячейки, в которой происходит замена аккумулятора; время, когда происходит замена аккумулятора, так как мобильная зарядная станция может посещать эту ячейку несколько раз; номер БЛА, для которого происходит замена аккумулятора.

По условиям задачи важна не столько конкретная траектория мобильной зарядной станции, сколько расположение точек подзарядки, их последовательность и тот факт, что мобильная зарядная станция успевает посетить каждую точку во-

время и в заданной последовательности, обходя препятствия на земле. Таким образом, геном в хромосоме мобильной зарядной станции можно определить тройку чисел, обозначающих время подзарядки t_j ($t_j \in T$), номер ячейки k_j ($k_j \in M$) и номер БЛА n_j ($n_j \in \{0, 1, \dots, s\}$), для которого производится замена батареи. В результате формируется последовательность, кодирующая информацию о замене батарей $W = [(t_1, k_1, n_1), (t_2, k_2, n_2), \dots, (t_h, k_h, n_h)]$. Эту последовательность W примем за хромосому мобильной зарядной станции.

Из информации о последовательности W можно получить траекторию движения мобильной зарядной станции, рассчитывая кратчайший маршрут движения между последовательными промежуточными точками (ячейками k_1, k_2, \dots, k_h), который обходит препятствия, с помощью любого известного алгоритма, например, A^* [23] или его модификаций [24].

Следует учитывать, что не для каждой k_1, k_2, \dots, k_h , на заданной карте с препятствиями возможно создание маршрута. В этом случае хромосома для мобильной зарядной станции будет отражать «невозможное решение». Ген хромосомы мобильной зарядной станции (t_i, k_i, n_i) отражает время t_i , не позднее которого зарядная станция должна прибыть в ячейку k_i для подзарядки БЛА U_{n_i} . Если существует участок хромосомы $[\dots, (t_i, k_i, n_i), (t_{i+1}, k_{i+1}, n_{i+1}), \dots]$, в котором мобильная зарядная станция не успевает переместиться между соседними точками зарядки k_i и k_{i+1} за время $t_{i+1} - t_i$, тогда хромосома так же будет отражать «невозможное решение».

Итоговый вариант хромосомы для задачи покрытия, включающий в себя траектории движения всех БЛА, отражающий траекторию для мобильной зарядной станции и точек зарядки, представлен на рис. 2.

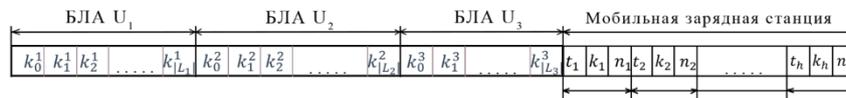


Рис. 2. Итоговое представление хромосомы для задачи

Перед запуском генетического алгоритма происходит разбиение территории на регионы $Y_1, Y_2, Y_3 \dots Y_s$, такое что $\cup_{i=1}^s Y_i = M$ и для $\forall i, j: i \neq j \Rightarrow Y_i \cap Y_j = \emptyset$. Для каждого региона назначается БЛА U_i для охвата; каждый БЛА охватывает свой регион, что исключает столкновение БЛА при выполнении миссии охвата.

Начальная популяция формируется случайным образом. Это предполагает формирование случайных путей охвата для каждого региона. Точки подзарядки для каждой хромосомы начальной популяции выбираются после формирования путей для всех БЛА так же случайным образом. Однако между точками зарядки для фиксированной БЛА расстояние должно быть меньше чем Z ячеек. Если между двумя точками подзарядки k_j^i и k_g^i ($j < g$) для БЛА $U_i: (g-j) > Z$, то случайным образом добавляется новая точка подзарядки k_c^i , такая что $j < c < g$. Поддержание заряда для каждого БЛА $U_i P_i(t) > \epsilon$ при формировании начальной популяции позволяет сократить количество вычисляемых популяций, снижая время вычисления, но не является обязательным.

Для всех хромосом популяции необходимо рассчитать траекторию движения мобильной зарядной станции в обход препятствий в соответствии с последовательностью точек подзарядки W . Рассчитывается время достижения каждой точки подзарядки и факт прибытия мобильной станции с опозданием к месту подзарядки. Целевая функция при расчете приспособленности каждого индивидуума учитывает этот фактор, и накладывает штраф, если мобильная станция не успевает вовремя. Мутация применяется к хромосомам из популяции с вероятностью α , и

заключается в изменении пути покрытия в отдельном регионе, без изменения точек подзарядки для мобильной зарядной станции. Работа алгоритма заканчивается после фиксированного числа популяций V .

Валидация алгоритма. Алгоритм был реализован на языке Python, с возможностью визуализации траекторий движения БЛА (рис. 3) и мобильной зарядной станции. В качестве входных данных программа принимает параметры территории, размер ячейки сетки, расположение препятствий на территории (последовательность номеров ячеек, которые относятся к классу препятствий Obs), начальные точки расположения каждой БЛА на карте $ST = \{k_1^0, k_2^0, \dots, k_q^0\}$. Результатом работы программы является хромосома с наибольшим значением оценки целевой функции после V популяций. Хромосома отображает траектории движения всех БЛА и точек подзарядки для мобильной станции, по которым происходит расчет траектории мобильной зарядной станции.

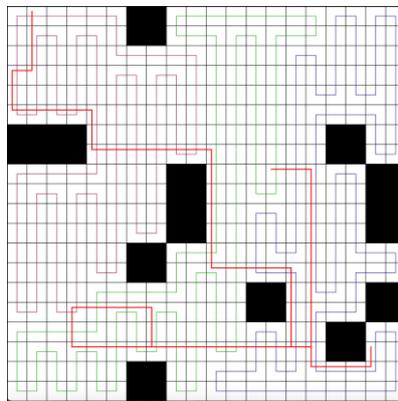


Рис. 3. Результат работы программы по охвату территории размера 20x20 ячеек с помощью трех БЛА. Траектории БЛА показаны зеленым, фиолетовым и бордовым цветом. Траектория мобильной зарядной станции обозначена красным цветом

Заключение. В данной работе рассмотрен метод решения задачи охвата территории группой БЛА с ограничениями по затрачиваемой энергии, при использовании мобильной зарядной станции. Предложенное решение базируется на применении генетического алгоритма для совместного планирования траекторий БЛА и зарядной станции, что повышает эффективность алгоритма. Основной акцент в статье сделан на формировании хромосомы генетического алгоритма, которая корректно отражает траектории движения БЛА и мобильной зарядной станции, а также учитывает точки замены аккумулятора. Представлена структура генетического алгоритма с пошаговым объяснением ее работы. Алгоритм реализован на языке Python, с возможностью визуализации траекторий движения БЛА и мобильной зарядной станции. Адекватность предложенного подхода подтверждена результатами моделирования.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Galceran E., Carreras M. A survey on coverage path planning for robotics // Robotics and Autonomous Systems. – 2013. – No. 12 (61). – P. 1258-1276.
2. Semenas R., Bausys R. Adaptive Strategy for Environment Exploration in Search and Rescue Missions by Autonomous Robot Lecture Notes in Networks and Systems / под ред. Н. Sharma [и др.]. – Singapore: Springer Singapore, 2021. – P. 335-353.

3. *Almadhoun R., Taha T., Seneviratne L., Zweiri Y.* A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping // *SN Applied Sciences*. – 2019. – No. 8 (1). – P. 847.
4. *Cabreira T., Brisolaro L., Ferreira Jr. P.R.* Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles // *Drones*. – 2019. – No. 1 (3). – P. 4.
5. *Bai Y., Wang Y., Svinin M., Magid E., Sun R.* Adaptive Multi-Agent Coverage Control With Obstacle Avoidance // *IEEE Control Systems Letters*. – 2022. – 6. – P. 944-949.
6. *Hayat S., Yanmaz E., Brown T. X., Bettstetter C.* Multi-objective UAV path planning for search and rescue. – Singapore, Singapore: IEEE, 2017. – P. 5569-5574.
7. *Калыев И.А., Капустян С.Г.* Групповое управление роботами: проблемы, решения // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2011. – 13. – P. 7-12.
8. *Karapetyan N., Benson K., McKinney C., Taslakian P., Rekleitis I.* Efficient Multi-Robot Coverage of a Known Environment. – 2017. – P. 1846-1852.
9. *Васильев И.А., Половко С.А., Смирнова Е.Ю.* Организация группового управления мобильными роботами для задач специальной робототехники // *Информатика, телекоммуникации и управление*. – 2013. – С. 119-123.
10. *Di Franco C., Buttazzo G.* Energy-Aware Coverage Path Planning of UAVs. – Vila Real: IEEE, 2015. – P. 111-117.
11. *Suzuki K.A.O., Kemper Filho P., Morrison J.R.* Automatic Battery Replacement System for UAVs: Analysis and Design // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2012. – No. 1-4 (65). – P. 563-586.
12. *Li B., Patankar S., Moridian B., Mahmoudian, N.* Planning Large-Scale Search and Rescue using Team of UAVs and Charging Stations Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2018. – P. 1-8.
13. *Li B., Page B. R., Hoffman J., Moridian B., Mahmoudian N.* Rendezvous Planning for Multiple AUVs With Mobile Charging Stations in Dynamic Currents // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2019. – No. 2 (4). – P. 1653-1660.
14. *Wei M., Isler V.* Coverage Path Planning Under the Energy Constraint Brisbane, QLD: IEEE, 2018. – P. 368-373.
15. *Tan C.S., Mohd-Mokhtar R., Arshad M.R.* A Comprehensive Review of Coverage Path Planning in Robotics Using Classical and Heuristic Algorithms // *IEEE Access*. – 2021. – 9. – P. 119310-119342.
16. *Denisov E., Sagitov A., Yakovlev K.S., Su K.L., Svinin M.M., Magid E.* Towards Total Coverage in Autonomous Exploration for UGV in 2.5D Dense Clutter Environment: Prague, Czech Republic: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2019. – P. 409-416.
17. *Пилюхов В.Х., Медведев Ю.М., Костюков В.А., Хуссейн Ф., Кадим А.* Trajectory planning algorithms in two-dimensional environment with obstacles // *Информатика и автоматизация*. – 2022. – 21 (3). – P. 459-492.
18. *Гладков Л., Курейчик В., Курейчик В.* Генетические алгоритмы. – Физматлит, 2010. – 368 с.
19. *Umbarkar A.J., Sheth P.D.* Crossover operators in genetic algorithms: a review // *ICTACT Journal on Soft Computing*. – 2015. – No. 01 (06). – P. 1083-1092.
20. *Lozano M., Herrera F., Cano J.* Replacement strategies to preserve useful diversity in steady-state genetic algorithms // *Information Sciences*. – 2008. – No. 23 (178). – P. 4421-4433.
21. *Deb K., Deb A.* Analysing mutation schemes for real-parameter genetic algorithms // *International Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing*. – 2014. – No. 1 (4). – С. 1.
22. *Tuncer A., Yildirim M.* Chromosome Coding Methods in Genetic Algorithm for Path Planning of Mobile Robots / под ред. E. Gelenbe, R. Lent, G. Sakellari. – London: Springer London, 2011. – P. 377-383.
23. *Guruji A. K., Agarwal H., Parsediya D. K.* Time-efficient A* Algorithm for Robot Path Planning // *Procedia Technology*. – 2016. – 23. – P. 144-149.
24. *Koenig S., Likhachev M.* D* lite // *In Eighteenth national conference on Artificial intelligence*. – 2002. – P. 476-483.

REFERENCES

1. *Galceran E., Carreras M.* A survey on coverage path planning for robotics, *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, No. 12 (61), pp. 1258-1276.
2. *Semenas R., Bausys R.* Adaptive Strategy for Environment Exploration in Search and Rescue Missions by Autonomous Robot Lecture Notes in Networks and Systems, ed. by H. Sharma [et al.]. Singapore: Springer Singapore, 2021 33. 335-353.
3. *Almadhoun R., Taha T., Seneviratne L., Zweiri Y.* A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping, *SN Applied Sciences*, 2019, No. 8 (1), pp. 847.

4. *Cabreira T., Brisolara L., Ferreira Jr. P.R.* Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles, *Drones*, 2019, No. 1 (3), pp. 4.
5. *Bai Y., Wang Y., Svinin M., Magid E., Sun R.* Adaptive Multi-Agent Coverage Control With Obstacle Avoidance, *IEEE Control Systems Letters*, 2022, 6, pp. 944-949.
6. *Hayat S., Yanmaz E., Brown T.X., Bettstetter C.* Multi-objective UAV path planning for search and rescue. Singapore, Singapore: IEEE, 2017, pp. 5569-5574.
7. *Kalyaev I.A., Kapustyan S.G.* Gruppovoe upravlenie robotami: problemy, resheniya [Group control of robots: problems, solutions], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], 2011, 13, pp. 7-12.
8. *Karapetyan N., Benson K., McKinney C., Taslakian P., Rekleitis I.* Efficient Multi-Robot Coverage of a Known Environment, 2017, pp. 1846-1852.
9. *Vasil'ev I.A., Polovko S.A., Smirnova E.Yu.* Organizatsiya gruppovogo upravleniya mobil'nymi robotami dlya zadach spetsial'noy robototekhniki [Organization of group control of mobile robots for special robotics tasks], *Informatika, telekommunikatsii i upravlenie* [Informatics, telecommunications and control], 2013, pp. 119-123.
10. *Di Franco C., Buttazzo G.* Energy-Aware Coverage Path Planning of UAVs. – Vila Real: IEEE, 2015. – P. 111-117.
11. *Suzuki K.A.O., Kemper Filho P., Morrison J.R.* Automatic Battery Replacement System for UAVs: Analysis and Design, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, No. 1–4 (65), pp. 563-586.
12. *Li B., Patankar S., Moridian B., Mahmoudian, N.* Planning Large-Scale Search and Rescue using Team of UAVs and Charging Stations Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2018, pp. 1-8.
13. *Li B., Page B. R., Hoffman J., Moridian B., Mahmoudian N.* Rendezvous Planning for Multiple AUVs With Mobile Charging Stations in Dynamic Currents, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, No. 2 (4), pp. 1653-1660.
14. *Wei M., Isler V.* Coverage Path Planning Under the Energy Constraint Brisbane, QLD: IEEE, 2018, pp. 368-373.
15. *Tan C.S., Mohd-Mokhtar R., Arshad M.R.* A Comprehensive Review of Coverage Path Planning in Robotics Using Classical and Heuristic Algorithms, *IEEE Access*, 2021, 9, pp. 119310-119342.
16. *Denisov E., Sagitov A., Yakovlev K.S., Su K.L., Svinin M.M., Magid E.* Towards Total Coverage in Autonomous Exploration for UGV in 2.5D Dense Clutter Environment: Prague, Czech Republic: SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2019, pp. 409-416.
17. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev Yu.M., Kostyukov V.A., Khusseyn F., Kadim A.* Trajectory planning algorithms in two-dimensional environment with obstacles, *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer science and automation], 2022, 21 (3), pp. 459-492.
18. *Gladkov L., Kureychik V., Kureychik V.* Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 368 p.
19. *Umbarkar A.J., Sheth P.D.* Crossover operators in genetic algorithms: a review, *ICTACT Journal on Soft Computing*, 2015, No. 01 (06), pp. 1083-1092.
20. *Lozano M., Herrera F., Cano J.* Replacement strategies to preserve useful diversity in steady-state genetic algorithms, *Information Sciences*, 2008, No. 23 (178), pp. 4421-4433.
21. *Deb K., Deb A.* Analysing mutation schemes for real-parameter genetic algorithms, *International Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing*, 2014, No. 1 (4), pp. 1.
22. *Tuncer A., Yildirim M.* Chromosome Coding Methods in Genetic Algorithm for Path Planning of Mobile Robots, ed. by E. Gelenbe, R. Lent, G. Sakellari. London: Springer London, 2011, pp. 377-383.
23. *Guruji A. K., Agarwal H., Parsediya D. K.* Time-efficient A* Algorithm for Robot Path Planning, *Procedia Technology*, 2016, 23, pp. 144-149.
24. *Koenig S., Likhachev M.* D* lite, *In Eighteenth national conference on Artificial intelligence*, 2002, pp. 476-483.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.В. Мещеряков.

Файзуллин Рамиль Фирдусович – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: fzllnrml@gmail.com; г. Казань, Россия; тел.: +78432065233; аспирант.

Магид Евгений Аркадьевич – e-mail: magid@it.kfu.ru; тел.: +78432065233; PhD; зав. кафедрой интеллектуальной робототехники.

Faizullin Ramil Firdusovich – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: fzllnrml@gmail.com; Kazan, Russia; phone: +78432065233; graduate student.

Magid Evgeni Arkad'evich – e-mail: magid@it.kfu.ru; phone: +78432065233; PhD; head of intelligent robotics department.

А.П. Зыков, П.Н. Миронов

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ РТК

В настоящее время в навигационных системах робото-технических комплексов (РТК) используют разнородные датчики первичной информации, которые могут обеспечивать избыточность навигационных данных. Это позволяет повысить точность вычисления параметров движения, а так же позволяет определять их с большей надёжностью при условии выхода из строя одного или нескольких датчиков. В работе дан обзор и приводится классификация низкоуровневых математических методов обработки переопределённых параметров состояния систем навигации РТК. Отмечается, что задача комплексирования является подобластью задачи идентификации систем и поэтому имеет общие с ней подходы к построению решения. В подавляющем большинстве методов, построенных на оптимизационном подходе, в качестве критерия оптимальности используется квадратичная функция ошибок. Все математические методы объединения (комплексной обработки или комплексирования) каких-либо данных разделяют на низко-, средне- и высокоуровневые. В системах навигации наибольшее применение имеют низкоуровневые методы, такие как рекурсивные, нерекурсивные и методы на основе ковариаций. Нерекурсивные методы редко используются напрямую. Рекурсивные, как правило, построены по схеме фильтра Калмана. Не все методы устойчивы к негауссовости и корреляционной зависимости исходных данных, что часто встречается в системах навигации с переопределёнными данными. Кроме того, не все методы могут использоваться для решения проблемы релевантности данных, поступающих от навигационных приборов. Отмечается, что для методов комплексирования ключевым является подход объединения данных в информационном пространстве, понимаемом, как обратное к ковариационному, поскольку подавляющая часть методов, включая байесовские, сводятся к нему. В связи с этим, наибольший интерес представляют методы на основе ковариаций. Однако, для решения проблемы релевантности данных в системах навигации, являющихся системами реального времени, существующие методы плохо приспособлены, поскольку требуют при каждом такте объединения данных решения трудоёмкой в вычислительном плане оптимизационной задачи. Таким образом, существует проблема разработки новых подходов к решению этой задачи.

Навигационные системы; комплексирование данных; фильтр Калмана; обработка данных; информационное пространство; идентификация систем; системы реального времени.

A.P. Zykov, P.N. Mironov

MATHEMATICAL METHODS OF COMPLEX PROCESSING OF RTC NAVIGATION DATA

Nowadays, the navigation systems of robot-technical complexes (RTC) use heterogeneous sensors of primary information, which can provide redundancy of navigation data. This allows to increase the accuracy of calculation of motion parameters, as well as allows to determine them with greater reliability in case of failure of one or more sensors. The paper gives a review and classification of low-level mathematical methods of processing overridden state parameters of RTC navigation systems. It is noted that the problem of combining is a subfield of the problem of system identification and therefore has common approaches to the construction of the solution. In the vast majority of methods based on the optimization approach, the quadratic error function is used as the optimality criterion. All mathematical methods of combining (complex processing or fusion) any data are divided into low-, medium- and high-level methods. In navigation systems, low-level methods such as recursive, nonrecursive, and covariance-based methods are the most used. Non-recursive methods are rarely used directly. Recursive ones are usually constructed using a Kalman filter scheme. Recursive ones, as a rule, are constructed according to the Kalman filter scheme. Not all methods are robust to non-Gaussianity and correlation dependence of the original data, which is often encountered in navigation systems with overdetermined data. In addition, not all methods can be used to address the relevance of data from navigation instruments. It is noted that the key for combining methods is the approach of fusion data in an information space, understood as the inverse of covariance, since the vast majority of methods, including Bayesian methods, are reducible to it. In this regard, covariance-based methods are of most interest. However, for

solving the problem of data relevance in navigation, the existing methods are poorly suited to the problem of data relevance because they require computationally intensive optimization problem solving at each step, and navigation systems are real-time systems. Thus, there is a problem of developing new approaches to solve this problem.

Navigation systems; data fusion; Kalman filter; data processing; information space; system identification; real-time systems.

1. Введение. Развитие технологий в области навигации приводит к появлению новых методов и улучшение характеристик известных навигационных приборов. Благодаря различной физической природе и различным принципам формирования данных совместное использование нескольких приборов, определяющих одну и ту же величину, позволяет ограничить рост погрешностей, снизить шумовую составляющую измерений, повысить темп выдачи навигационной информации, заметно повысить защищенность от помех различной природы. В современных условиях вопрос дублирования навигационной информации приобретает особую актуальность в связи с развитием средств радиоэлектронной борьбы. В таких условиях требуется решать задачи объединения данных и определения степени их достоверности. Это требует совершенствования математических алгоритмов обработки данных. Задачи совместного использования различных приборов навигации, обеспечивающих избыточность (переопределённость) навигационной информации, решаются методами комплексирования, т.е. комплексной (совместной) обработки данных. В работе [1] отмечалось, что задача комплексирования сводится к задаче оценивания состояния динамической системы по зашумленным данным, которая в свою очередь является одной из задач идентификации систем.

2. Принципы построения математических моделей систем. Идентификация систем базируется на теории случайных процессов, поскольку все экспериментальные данные содержат как полезную, так и случайную информацию, уровень их содержания в данных характеризуется отношением сигнал / шум. При идентификации той или иной системы разделяют этапы построения её модели (синтез) и определения оптимальных параметров этой модели. Последнюю операцию называют подгонкой параметров по тестовым данным [2], она тесно связана с анализом точности [1]. Оценка параметров модели производится по обучающей выборке либо при построении модели, либо в процессе её эксплуатации.

В общем случае при построении моделей динамических систем считается, что, с одной стороны, модель системы должна быть максимально простой, а с другой – наилучшим способом описывать обучающую выборку. Исходя из этого, процесс выбора наилучшей модели из некоторого их набора \mathbf{M} заключается в решении задачи оптимизации [2, 3]:

$$\hat{\mathbf{m}} = \arg \min_{\mathbf{m} \in \mathbf{M}} \{F(\mathbf{m}, Z_e^n) + h(C(\mathbf{m}), p)\}, \quad (1)$$

где $F(\bullet, \bullet)$ – выбранная мера соответствия между моделью \mathbf{m} и Z_e – выборкой p векторов обучающих данных; $C(\bullet)$ – сложность модели \mathbf{m} ; $h(\bullet, \bullet)$ – штраф за сложность модели, снижающийся с ростом p количества векторов обучающей выборки. Необходимость следующего шага – подгонки параметров модели по тестовым данным Z_v – заключается в том, что обучающая выборка практически никогда не может охватить весь спектр возможных значений параметров системы z . Обзор процесса подгонки описан, например, в [2]. Наилучшую модель принято характеризовать двумя параметрами: смещением от истинного описания системы и её точностью, характеризующейся дисперсией (или СКО). Такая оценка качества модели основана на очевидном соотношении (2): если предположить, что существует истинное описание системы \mathbf{S} , то среднеквадратическую ошибку её описания моделью можно представить в виде:

$$W = M[(\mathbf{S} - \hat{\mathbf{m}})^2] = (\mathbf{S} - \mathbf{m}^*)^2 + M[(\hat{\mathbf{m}} - \mathbf{m}^*)^2] = B + V, \quad \mathbf{m}^* = M[\hat{\mathbf{m}}], \quad (2)$$

где $M[\bullet]$ – операция вычисления математического ожидания, в данном случае – по множеству \mathbf{M} с вероятностями, характеризующими степень соответствия моделируемой системе. В работе [2] отмечалось, что наилучшая модель как правило принадлежит такому набору \mathbf{M} , для которого $B \neq 0$, даже если существует набор моделей без смещения. Поэтому был сделан вывод, что следует стремиться к разумным приближениям, минимизирующим W , а не к полному соответствию между моделью и системой.

Поиск минимума в (1) – это предмет исследования такого раздела математики, как глобальная оптимизация. В зависимости от характера функционалов F и h методы поиска глобального минимума могут сильно отличаться. В самом простом случае, когда $(F + h)$ – выпуклый функционал с единственным минимумом задача решается его дифференцированием по параметрам модели. В более сложных случаях применяются различные модификации метода градиентного спуска и другие методы поиска глобального минимума. Вопрос о выпуклости минимизируемого функционала является существенным, поскольку поиск минимума невыпуклого функционала может привести к локальному, а не к глобальному минимуму. Методы оптимизации, в том числе и в условиях невыпуклости и плохой обусловленности минимизируемых функционалов, описаны во многих курсах оптимизации, например, в работе [4].

3. Классификация математических методов комплексирования. В обзорной работе [5] приводится подробная классификация методов комплексирования с учётом уровня их объединения. В частности, авторы разделили математические методы объединения данных на низко-, средне- и высокоуровневые, которые соответственно были названы методами *оценки, классификации и прогнозирования*. В задачах комплексирования навигационных данных РТК, чаще всего используют низкоуровневые методы оценки, такие как рекурсивные методы, нерекурсивные и методы на основе ковариаций, которые и будут рассмотрены ниже. Таким образом, здесь не рассматриваются методы с использованием, например, нечёткой логики или нейронных сетей.

3.1. Общий подход к обработке переопределённых данных.

3.1.1. Постановка задачи комплексирования данных. Задача оценки параметров при комплексной обработке данных может быть как линейной, так и нелинейной [1, 6]. Как правило, данные, поступающие в комплексирующий блок, объединяют в единый переопределённый вектор наблюдения. Размерность суммарного вектора может зависеть не только от количества навигационных приборов, но и от способа формирования исходных данных, поскольку количество первичных данных того или иного прибора может не совпадать с количеством формируемых им параметров. У каждого параметра векторов данных существует своя точность. Поэтому принято, что на вход комплексирующего блока поступает вектор наблюдений z размерности m , который содержит в себе аддитивную стационарную случайную составляющую с ковариационной функцией Q , а на выходе получают вектор состояния x размерности n с случайной составляющей ошибок w и ковариацией Q :

$$z_i = \langle z_i \rangle + \tilde{v}_i, \quad \tilde{R} = M[\tilde{v}\tilde{v}^T], \quad x = \langle x \rangle + w, \quad Q = M[ww^T]. \quad (3)$$

Треугольные скобки обозначают математическое ожидание вектора. Связь между векторами посредством комплексирующего блока описывается функционалом:

$$z = H(x). \quad (4)$$

Подстановка в (4) выражений (3) даёт

$$\langle z \rangle + \tilde{v} = H(\langle x \rangle + w) = H(\langle x \rangle) + \tilde{v}. \quad (5)$$

То есть для математических ожиданий векторов наблюдения и состояния выражение (4) выполняется с некоторой точностью, более того, случайный процесс не обязан быть стационарным и гауссовским. Ниже символы математического ожидания векторов опущены, вместо (5) будет рассматриваться выражение

$$z = H(x) + v, \quad R = M[vv^T], \quad (6)$$

Поскольку речь идёт о моделях динамических систем, то они устанавливают связь между последовательностями векторов наблюдения и состояния: $\{z^t\}_{t=1:p} \rightarrow \{x^t\}_{t=1:l}$. Как известно [1, 7], в случае, $p > l$ задача определения $\{x^t\}$ по последовательности $\{z^t\}_{t=1:p}$ является задачей *сглаживания*, в случае, $p = l$ – задачей *фильтрации*, в случае, $p < l$ – задачей *экстраполяции*.

Будем считать, что в каждый момент времени t функционал H и вектор z в (6) состоят из r блоков, каждый из которых даёт некоторую оценку вектора состояния, а точность вектора наблюдений определяется блочной ковариационной матрицей $R_{i,j}$:

$$z = [\bar{z}_1 \ \dots \ \bar{z}_r]^T = [H_1 \ \dots \ H_r]^T x + [\bar{v}_1 \ \dots \ \bar{v}_r]^T, R_{i,j} = M[\bar{v}_i \bar{v}_j^T]. \quad (7)$$

Это означает, что максимальная степень переопределённости вектора состояния равна r . Таким образом, (7) связывает вектор состояния (x, Q) и r случайных векторов наблюдения $\{(1, R_{1,1}), \dots, (r, R_{r,r})\}$ с кросс-ковариациями $R_{i,j}$ (при $i \neq j$) через операторы H_j . Суть комплексирования сводится к определению последовательности векторов состояния $\{x^t\}$ фильтрацией последовательности векторов наблюдения $\{z^t\}$ решением оптимизационной задачи выбора модели (1) со связью между векторами наблюдения и состояния через выражение (7).

Задача комплексирования тесно связана с задачей сглаживания данных. Существуют различные схемы комплексирования, которые отличаются относительным расположением фильтров данных и комплексизирующего блока: объединение данных может быть либо до фильтрации данных, и тогда методы называют *децентрализованными* [1], либо после, тогда методы называют *централизованными*.

3.1.2. Мера соответствия модели в системах навигации. Результат, который возвращает модель системы (1), – это вектор её состояния $\hat{x} \rightarrow x$. При решении задачи построения модели (синтеза алгоритма) в качестве меры соответствия $F(\bullet, \bullet)$ (критерия оптимальности) в задачах обработки навигационной информации наибольшее распространение получил квадратичный функционал потерь [1], который минимизирует дисперсию случайного процесса \hat{x} в (6):

$$L(z - H(x)) = \sum_i (z_i - H_i(x))^2 = Sp\{[z - H(x)][z - H(x)]^T\}. \quad (8)$$

Построенный на его основе критерий оптимальности оценки имеет вид:

$$F(x, z) = M[L(z - H(x))] = Sp\{R\}. \quad (9)$$

Что касается регуляризирующего слагаемого $h(C, p)$ в (1), то зачастую при построении моделей комплексирования в системах навигации его опускают.

В то же время, как отмечено в [7], следует учитывать, что фильтры, использующие квадратичную функцию меры соответствия модели на приращениях состояния (9), не способны отслеживать быстрые скачки в динамике состояния.

3.1.3. Инвариантные и неинвариантные алгоритмы. В линейных или нелинейных задачах оценивания различают инвариантные и неинвариантные алгоритмы [1, 6, 8].

3.1.3.1. В инвариантных алгоритмах используется только информация о стохастических свойствах ошибок измерения. Как правило, один из блоков вектора наблюдений принимается основным, а для остальных показаний вычисляются ошибки измерения по сравнению с выбранным. Полученные разностные измерения подвергаются процедуре оптимальной фильтрации, в результате чего получают оценки погрешностей навигационных параметров. В этом случае ошибки оценок не зависят от оцениваемого вектора, т.е. они инвариантны по отношению к нему [1]. Оценки значений этих параметров получают путем их коррекции на величину оптимальных оценок погрешностей. Преимуществом инвариантных алгоритмов является их независимость от динамики конкретного объекта, что уменьшает риск расходимости комплексизирующего блока из-за неточной исходной информации. Первичной задачей в таких алгоритмах является формирование системы уравнений для вычисления погрешностей [8–11].

3.1.3.2. В неинвариантных алгоритмах кроме априорной информации о стохастических свойствах ошибок измерения используется еще информация о самом векторе оцениваемых параметров. В этом случае ошибка оценки параметров зависит не только от ошибок измерения, но и от самого оцениваемого параметра, поэтому такие алгоритмы называют неинвариантным. Задача комплексирования решается для навигационных параметров, свойства которых, как случайных процессов, описываются с учетом уравнений динамики объекта. Инвариантный подход позволяет получить более высокую точность вычислений, однако он значительно более затратный с вычислительной точки зрения [1, 8].

3.2. Нерекурсивные методы оценивания. К нерекурсивным методам оценивания, согласно классификации [5], относятся метод средневзвешенных значений и метод наименьших квадратов. В работе [1] эти методы названы *детерминированными* или *нестохастическими*.

3.2.1. Метод наименьших квадратов (МНК). В работе [1] приводится три разновидности МНК: 1) простой МНК; 2) ОМНК – обобщённый МНК; 3) ММНК – модифицированный МНК. С точки зрения идентификации систем, метод наименьших квадратов заключается в использовании в качестве критерия оптимальности в (1) функционала вида:

$$F(x, z) = (z - H(x))S(z - H(x))^T. \quad (10)$$

Здесь S – весовая матрица, предназначенная для того, чтобы обеспечить возможность по-разному учитывать вклад отличий невязок, соответствующих различным компонентам вектора состояния. Для простого метода МНК весовая матрица равна единичной. В модифицированном МНК кроме того используется регуляризирующее слагаемое в виде

$$h(x) = (x - x_0)D(x - x_0)^T, \quad (11)$$

где D – симметричная неотрицательно определённая матрица.

3.2.2. Метод средневзвешенных значений. Данный метод напоминает вычисление математического ожидания параметров вектора состояния x по данным вектора наблюдений z , состоящего из блоков по n параметров, и каждый блок является оценкой вектора x (7). В этих условиях определён функционал W , обратный к H :

$$W = H^{-1}: \quad x = \sum_{j=1}^r W_j \bar{z}_j. \quad (12)$$

Размерности векторов x и $z - n$ и m связаны друг с другом равенством $n r = m$, где r – максимальная степень переопределённости параметров вектора состояния. В этом методе $W_{i,j}$ – весовые коэффициенты, определяющие вклад i -х параметров j -того блока вектора z в i -ые параметры вектора x . Причём коэффициенты W_i нормированы. Таким образом, функционал W задаётся блочной $(n \times n \cdot r)$ матрицей:

$$W = [W_1 \quad \dots \quad W_r], \quad W_i = W_{i,j} \delta_k^i \quad \sum_{j=1}^r W_{i,j} = 1 \quad \forall i, k = 1 \div n. \quad (13)$$

$W_{i,j}$ представляют собой числа от 0 до 1, нормированные по каждой компоненте вектора состояния. Заметим, что они не могут быть интерпретированы, как вероятности реализации компонент x_i , поскольку значения $z_{i+(j-1)n}$ ($j = 1 \div r$) являются результатами измерений от различных приборов. Поэтому метод называется методом средневзвешенных значений. Выбор коэффициентов W должен минимизировать функцию (9).

К недостаткам нерекурсивных методов относится то обстоятельство, что такие методы не учитывают точность и адекватность используемых оценок вектора состояния и не оценивают точность даваемой ими оценки. Однако, они с успехом применяются, как составные части других методов комплексирования.

3.3. Объединение данных на основе ковариаций. Строго говоря, методы на основе ковариаций так же можно рассматривать, как разновидность нерекурсивных методов. Однако, их отделяют от последних, поскольку они построены на ис-

пользовании точности данных комплексирования, и объединение данных каждого параметра происходит в информационном пространстве, являющимся обратным к ковариационному. Происходит объединение информации о каждом параметре, что позволяет получить синхронизированные оценки вектора состояния. Связь между параметрами информационного состояния и традиционными параметрами состояния и наблюдения определяется равенствами:

$$Y = H^T R^{-1} H, \quad y = Yx, \quad (14)$$

где y – вектор информационного состояния с информационной матрицей Y . Ещё описанные в этом разделе методы называют *небайесовскими* [1], отличая их от байесовских, в основу принципа действия которых заложена теорема Байеса.

Рассматриваемые здесь методы в большинстве своём аналогичны методу (12, 13). Предполагается, что для каждого измерения известна ковариация. В формулировке некоторых методов каждый блок из (7) H_i представляет из себя единичные матрицы размерности n , вектор наблюдения z представляет из себя r блоков прямой оценки вектора состояния x . Однако, ничто не мешает заменить любую оценку z_i на результат действия функционала $H_i^{-1}(z_i)$ и оценку ковариации, например, на $R_i = M[H_i^{-1}(H_i^{-1})^T]$ или полученную каким-либо другим способом. Таким образом, ниже представлены шаблоны методов, основанные на использовании ковариаций. Все эти методы нечувствительны к коррелированности и гауссовости оценок (z_i, R_{ii}).

3.3.1. Ковариационное пересечение (CI). В работе [12] был предложен метод ковариационного пересечения, который даёт оценку объединения данных от двух источников и не использует предположений о независимости и гауссовости исходных оценок. Формируемая оценка (c, Q_{cc}) на основе данных двух входных переменных (a, R_{aa}) и (b, R_{bb}) является согласованной для любой степени корреляции между двумя входными переменными. Под согласованностью понимается неотрицательная определённость разницы матриц Q ковариации получаемой оценки и фактической ковариации $Q^{эксн}$:

$$Q - Q^{эксн} \geq 0 \quad (15)$$

при условии согласованности самих оценок (a, R_{aa}) и (b, R_{bb}). Метод даёт верхнюю границу ковариации. Его формулировка включает параметр $W \in [0, 1]$, который позволяет оптимизировать получаемую оценку по отношению к различным функциям меры соответствия модели (1). Метод сводится к уравнениям:

$$\begin{aligned} Q_{cc}^{-1} &= W \cdot R_{aa}^{-1} + (1-W) \cdot R_{bb}^{-1} \\ Q_{cc}^{-1} \bar{c} &= W \cdot R_{aa}^{-1} \bar{a} + (1-W) \cdot R_{bb}^{-1} \bar{b} \end{aligned} \quad (16)$$

В работе [12] также было показано, что получаемая этим методом комплексированная оценка (c, Q_{cc}) имеет меньший разброс, чем у исходных данных, т.е. дополнительная информация об оцениваемом параметре позволяет улучшить прогноз. Суть алгоритма сводится к такому объединению данных, в котором берется выпуклая комбинация средних и ковариаций в информационном пространстве. Сравнивая его с методом средневзвешенных оценок, можно видеть, что в качестве исходных оценок выступают комбинации $R_i^{-1} z_i$, а оценка результирующей ковариации осуществляется в информационном пространстве и определяется только точностями исходных данных, поэтому этот метод является инвариантным. Обобщение алгоритма (16) для r оценок вектора состояния x приводит к выражениям [13]:

$$x = Q \sum_{j=1}^r W_j R_j^{-1} \bar{z}_j, \quad Q = \left[\sum_{j=1}^r W_j R_j^{-1} \right]^{-1}, \quad (17)$$

где W_j – блочные матрицы, определённые в (13). Обычно W выбирается путем минимизации определителя или следа объединенной ковариации состояния Q , но есть и работы, например [14], в которых весовые коэффициенты несут смысл ре-

гулирования вклада каждого измерения в зависимости от их релевантности. Один из методов определения весовых коэффициентов описан в [13]. Метод СИ позволяет объединить отдельные преимущества датчиков и получить результирующий вектор состояния с меньшей погрешностью. Однако, следует заметить, что при некоторых условиях даже при согласованности всех исходных оценок (z_j, R_j) обобщённый метод (17) может давать несогласованную оценку [5].

Можно заметить, что если оценки параметров от различных источников имеют одинаковую ковариацию ошибок, т.е. если $R_{i,j} = R_{i,k}$ для любых $i = 1 \div n$ и $j, k = 1 \div r$, то метод переходит в метод средневзвешенных значений (12).

3.3.2. Простая выпуклая комбинация. Этот метод является одним из самых простых алгоритмов комплексирования данных и является упрощённой версией предыдущего метода. Если все весовые коэффициенты в методе ковариационного пересечения, соответствующие i -му параметру вектора состояния, равны, т.е. $W_{i,j} = W_{i,k}$ для любых $i = 1 \div n$ и $j, k = 1 \div r$, то метод СИ переходит в метод простой выпуклой комбинации. Так же, как и предыдущий, он подходит для неизвестной корреляции между параметрами. Комплексированное значение вектора состояния x и его ковариация Q определяются выражениями [1]:

$$x = Q \sum_{j=1}^r R_j^{-1} \bar{z}_j, \quad Q = \left[\sum_{j=1}^r R_j^{-1} \right]^{-1}. \quad (18)$$

Метод не требует оптимизации каких-либо параметров, и если определены все оценки (z_j, R_j) , то оценка комплексирования получается прямым вычислением. Для успешного применения этого метода следует быть уверенным в том, что векторы z_j дают достаточно близкие оценки. В частности, такой метод оценки можно успешно применять в системах, когда речь идёт об объединении отфильтрованных решений с известными матрицами ковариаций R_j , и можно установить, что расхождение оценок невелико. Очевидно, что данный метод так же является инвариантным.

В более общем виде такой алгоритм может быть сформулирован следующим образом. Из (7) можно сделать вывод, что общее уравнение (4) может быть заменено системой уравнений:

$$z_j = H_j x, \quad R_j = H_j Q_j H_j^T, \quad (19)$$

где Q_j – вклад j -й составляющей вектора наблюдения в общую ошибку оценки вектора состояния. Согласно построению метода (17) общая ошибка определяется в информационном пространстве, обратном к ковариационному, т.е.

$$Q^{-1} = \sum_{j=1}^r Q_j^{-1} = \sum_{j=1}^r H_j^T R_j^{-1} H_j. \quad (20)$$

Пусть наилучшую оценку вектора состояния обеспечивает r -я составляющая вектора наблюдения. Построение инвариантного алгоритма по работе [1] предполагает вычисление отклонений остальных $(r-1)$ оценок вектора состояния от r -ой по формулам:

$$\Delta x_j = H_j^{-1} \bar{z}_j - H_r^{-1} \bar{z}_r, \quad j = 1 \div (r-1). \quad (21)$$

После определения оптимального значения Δx , наилучшим образом удовлетворяющее всем уравнениям (21), окончательная оценка вектора состояния определяется как сумма

$$x = x_r + \Delta x. \quad (22)$$

Если же для всех j выполнено $H_j = I$. Тогда z_j являются прямыми оценками вектора x , и оценку (18) можно преобразовать следующим образом

$$x = Q \left[R_r^{-1} x_r + \sum_{j=1}^{r-1} R_j^{-1} (x_j - x_r) + \sum_{j=1}^{r-1} R_j^{-1} x_r \right] = x_r + Q \sum_{j=1}^{r-1} R_j^{-1} \Delta x_j. \quad (23)$$

Видно, что в данном случае не требуется решать оптимизационную задачу для (21) и поправка Δx к основному состоянию x_r вычисляется напрямую.

3.3.3. Объединение измерений. Идея метода заключается в том, чтобы оценку вектора состояния проводить посредством фильтра на основе вектора объединённого наблюдения. Таким образом, объединение данных проводится на уровне вектора наблюдения, при этом формируется комплексированное измерение [15]. Такая схема эквивалентна схеме ковариационного пересечения или простой выпуклой комбинации по принципу децентрализованного алгоритма. Комплексированное измерение z_c и его ковариация R_c определяются выражениями, аналогичными (18):

$$z_c = R_c \sum_{j=1}^r R_j^{-1} \bar{z}_j, \quad R_c = \left[\sum_{j=1}^r R_j^{-1} \right]^{-1}, \quad (24)$$

Уравнение связи случайного вектора комплексированного измерения и случайного вектора состояния определяется функционалом наблюдения:

$$z_c = H_c x, \quad H_c = R_c \sum_{j=1}^r R_j^{-1} H_j. \quad (25)$$

В дальнейшем оценка вектора состояния производится решением задачи фильтрации с вектором наблюдения (24) и функционалом наблюдения (25).

3.3.4. Ковариационное объединение (CU). Метод [16] является модернизацией метода ковариационного пересечения. Важное место отводится понятию статистической согласованности (15) комплексной оценки состояния (16) с объединяемыми данными. Если j – точность параметра z_j , а R_j – его ковариационная функция, то из (15) следует, что согласованной является оценка (z_j, R_j) , такая, что выполнено неравенство

$$R_j - M[v_j v_j^T] \geq 0. \quad (26)$$

Комплексная оценка параметра, полученная, например, методом ковариационного пересечения, может оказаться несогласованной. Различия между средними оценок могут быть гораздо больше, чем ожидается на основе соответствующих оценок их ошибок. В частности, такое может быть, если одна из оценок параметра является ложной. Метод ковариационного объединения сохраняет целостность информации. Суть метода заключается в том, что ищется такая оценка (x, Q) , что Q удовлетворяет условию минимума по некоторому критерию, например, минимизируется её детерминант, с условием выполнения системы неравенств:

$$Q - R_i - (x - z_i)(x - z_i)^T \geq 0 \quad \forall i = 1 \div r. \quad (27)$$

Некоторые из вычислительных методов решения задачи определения x и минимизации Q описаны в [16, 4]. В работе [16] отмечено, что описываемый метод не совсем подходит для систем реального времени из-за больших вычислительных затрат на решение задачи оптимизации при определении x и Q . В то же время, методы ковариационного пересечения и простой выпуклой комбинации вполне подходят для таких систем, но не гарантируют согласованность оценки.

3.4. Рекурсивные методы. Прежде всего, это методы на основе фильтра Калмана, однако, существуют и другие *байесовские* алгоритмы. Методы на основе фильтра Калмана пользуются большим успехом, а литература, описывающая их свойства и применение, богата и обширна. Даже если нарушаются лежащие в его теоретической основе предположения о гауссовости распределений $\{z^i\}$ и $\{x^i\}$, но шумы w и v остаются белыми, решение фильтра дает наилучшую линейную оцен-

ку, т.е. остаток сглаживателя Калмана имеет наименьшую дисперсию в классе оценок задач типа (1, 9). Однако в этих условиях оценка Калмана не гарантирует адекватность модели.

3.4.1. Комплексование на основе линейного фильтра Калмана.

3.4.1.1. Инвариантный алгоритм с фильтрацией Калмана. Фильтр Калмана даёт наилучшее решение оптимизационной задачи (1, 9). Это обстоятельство делает его привлекательным средством для решения различных задач, требующих поиска оптимальных решений. Применяется он и в задачах комплексования, в частности, для построения наиболее перспективных алгоритмов с точки зрения вычислительной трудоёмкости, что является актуальным для РТК. Наиболее простой случай комплексования, когда степень переопределённости невелика. С точки зрения инвариантности, наиболее быстрый подход – построение инвариантной схемы вычисления, например, по схеме простой выпуклой комбинации (19 – 23). Суть подхода заключается в том, что в методе простой выпуклой комбинации оптимальный вектор поправок (21) определяется с помощью фильтра Калмана. Исходя из конкретного вида уравнений моделируемой системы определяют функционалы задачи Калмана для поправок вектора состояния Δx , и результат фильтрации определяет оптимальную поправку. Тогда вектор состояния будет определяться выражением (22). Пример реализации приведён в работе [8], в работе [17] такая схема исследовалась для реализации комплексной системы навигации реального времени для БПЛА, а в работе [18] построен и исследован алгоритм быстрой компенсации погрешностей инерциально-спутниковой навигационной системы. Вообще, этот метод очень часто используется при построении комплексных систем навигации.

3.4.1.2. Комбинация векторов состояния Бар-Шалом / Кампо. В реальных условиях отдельные данные от различных датчиков не обязательно являются полностью независимыми. Алгоритм объединения векторов состояния Бар-Шалом / Кампо был разработан с учётом возможной корреляции данных, входящих в вектор наблюдения, для которых проведено предварительное сглаживание фильтрами Калмана. Подразумевается, что шум процесса Q_{ii} одинаков для всех предварительных оценок вектора состояния [13, 19, 20]. Комплексованное значение вектора состояния определяется выражениями:

$$x_c = P_{BC} E^T P^{-1} z, \quad E = [I_n \quad \dots \quad I_n]^T, \quad P_{BC} = [E^T P^{-1} E]^{-1}, \quad P = P_{i,j}, \quad (28)$$

где z – вектор наблюдений, состоящий из блоков-векторов *состояний* z_j предварительно отфильтрованных по Калману оценок вектора состояния x ; E – блочно-единичная матрица; P_{BC} – ковариационная матрица из общей информационной матрицы P^{-1} ; P – общая ковариационная матрица вектора наблюдения; кросс-ковариации на новом временном слое $P_{i,j}$ между i -м и j -м измерениями рассчитывается через коэффициенты усиления Калмана K_j фильтрации этих результатов измерения и старом значении кросс-ковариации:

$$P'_{i,j} = [I_n - K_i H_i^t] [F^{t-1} P'_{i,j} (F^{t-1})^T + Q'_{i,j}] [I_n - K_j H_j^t]^T, \quad x^t = F^{t-1} x^{t-1} + b^t. \quad (29)$$

Таким образом, данный алгоритм не использует напрямую фильтр Калмана, но для его реализации требуются результаты калмановской фильтрации для всех объединяемых данных. В линейных моделях с небольшими размерностями векторов состояния и наблюдения данный метод применим и для реализации в системах с незначительной вычислительной мощностью, но если размерности векторов велики, или моделируемая система не может быть описана линейными уравнениями, то данный алгоритм может оказаться избыточно трудоёмким.

3.4.2. Нелинейные модификации фильтра Калмана. В последнее время всё большее применение находят фильтры для нелинейных систем. Первым таким фильтром, нашедшим массовое применение, стал *расширенный фильтр Калмана*. Принцип его работы основан на линеаризации нелинейных уравнений моделируемой системы. Такая схема опубликована, например, в работе [21]. Однако, в этом алгоритме необхо-

димо уделять внимание его устойчивости, кроме того, необходимость вычисления якобиана делает его громоздким. Поиск новых решений привёл к появлению таких алгоритмов, как *фильтр частиц* [22, 23] и децентрализованный или, как его назвали авторы, *фильтр «без запаха»* [24]. Оба эти фильтра используют байесовский подход к оценке состояния, т.е. являются рекурсивными, и используют структуру фильтра Калмана. Однако, при определении параметров фильтра вместо решения линейных матричных уравнений используют нелинейное моделирование решений уравнений системы по принципу статистического метода Монте-Карло.

3.4.3. Другие рекурсивные методы.

3.4.3.1. Рекуррентный метод комплексирования. Понятия рекурсивный и рекуррентный являются синонимами, но здесь первый термин использован для именования класса методов, а последний – для именования конкретного метода. Основная идея метода заключается в том, что искомая оценка получается не в результате обработки сразу всего набора измерений, а формируется последовательно от каждого имеющегося наблюдения y_j . Итоговая оценка вычисляется рекуррентно от некоторой начальной [1]. Суть метода сводится к вычислению среднего арифметического накопленной информации об интересующей оценке. Тогда алгоритм комплексирования с учётом выражений для информационных параметров (14) может быть выражен формулами:

$$\hat{x}_1 = H_1^{-1} \bar{z}_1, \quad \hat{y}_j = \frac{1}{j} (y_j + (j-1)y_{j-1}) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j y_i \quad \forall j = 2 \div r. \quad (30)$$

$$Y_1 = H_1^T R_1^{-1} H_1, \quad Y_j = \frac{1}{j} (H_j^T R_j^{-1} H_j + (j-1)Y_{j-1}) = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j H_i^T R_i^{-1} H_i \quad \forall j = 2 \div r. \quad (31)$$

$$\hat{x} = Y_r^{-1} y_r, \quad Q = Y_r^{-1}. \quad (32)$$

По сути, этот алгоритм является небольшой модификацией простой выпуклой комбинации, просто результат комплексирования вычисляется по рекуррентным формулам в информационном пространстве.

3.4.3.2. Слияние информации. Основные операции этого метода также происходят в информационном пространстве (14). Он разработан на основе информационного фильтра для вектора информационного состояния y с информационной матрицей Y [25]. Основные выражения алгоритма так же основаны на теореме Байеса: вычисления проводятся в два этапа – априорной и апостериорной оценки. Априорная оценка ковариации ошибки оценивания вектора наблюдения и коэффициента распространения определяются:

$$\hat{P}^t = F^{t-1} P^{t-1} (F^{t-1})^T + Q^{t-1}, \quad \hat{L}^t = (\hat{P}^t)^{-1} F^t P^t. \quad (33)$$

Априорная оценка информационных параметров:

$$\hat{Y}^t = [F^{t-1} (Y^{t-1})^{-1} (F^{t-1})^T + Q^{t-1}]^{-1}; \quad \hat{y}^t = \hat{L}^t y^{t-1}. \quad (34)$$

Здесь F – матрица перехода (29). Новое значение информационного состояния и информационной матрицы:

$$y^t = \hat{y}^t + \sum_{j=1}^r y_j^t; \quad Y^t = \hat{Y}^t + \sum_{j=1}^r Y_j^t, \quad (35)$$

где вклады информационных состояний и связанные с ними информационные матрицы:

$$y_j^t = (H_j^t)^T (R_j^t)^{-1} z_j^t; \quad Y_j^t = (H_j^t)^T (R_j^t)^{-1} H_j^t. \quad (36)$$

Вектор состояния и ковариационная матрица на новом временном слое определяются выражениями

$$x^t = (Y^t)^{-1} y^t; \quad Q = (Y^t)^{-1}. \quad (37)$$

Можно заметить, что если количество объединяемых данных r велико, то алгоритм достаточно трудоёмкий, требующий вычисления большого числа обратных матриц.

Заключение. Анализируя приведённые методы комплексирования данных, можно заметить, что во многих алгоритмах явно или неявно заложен алгоритм слияния данных на основе ковариаций, который, в свою очередь, является модернизацией алгоритма средневзвешенных значений. Это относится, в том числе, и к алгоритму фильтрации Калмана, в котором матрицу весовых коэффициентов можно определить через коэффициент усиления Калмана, а средневзвешенная оценка вектора состояния вычисляется из его априорной оценки и оценки по вектору наблюдения. Таким образом, ключевой идеей в комплексной оценке данных является объединение информации о параметрах вектора состояния в информационном пространстве. Говоря о частностях применения тех или иных алгоритмов, как отмечалось в литературе [5, 13], следует заметить, что серьезной проблемой, связанной с применением фильтра Калмана, является его излишнее или неуместное использование в задачах комплексирования, в которых данные различных датчиков могут быть непоследовательными, зависимыми, коррелированными или с негауссовскими шумами, что нарушает строгое предположение фильтра Калмана. Для решения этих проблем более адекватным является использование алгоритмов слияния на основе ковариаций.

При комплексировании данных в системах навигации РТК актуальной задачей является выявление нерелевантной информации, поступающей от датчиков. Для решения этой проблемы из всех упомянутых выше алгоритмов наибольший интерес представляют методы ковариационного пересечения и объединения. В то же время, как было отмечено, последний весьма ресурсоёмкий и в существующем варианте мало пригоден для систем реального времени. Однако предложенный в нём подход даёт перспективное направление для решения обозначенной проблемы. Так или иначе, для решения этой проблемы требуется модернизация существующих решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1. Введение в теорию оценивания. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. – 509 с.
2. Ljung L. Perspectives on system identification // Annual Reviews in Control. – April, 2010. – Vol. 34, Issue 1. – P. 1-12.
3. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. / под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, Физматлит, 1991. – 432 с. – ISBN 5-02-014511-4.
4. Черноуцкий И.Г. Методы оптимизации. Компьютерные технологии. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 384 с.
5. Luo R.C., Chang C.C., Lai C.C. Multisensor fusion and integration: theories, applications, and its perspectives // IEEE Sensors Journal. – 2011. – Vol. 11, No. 12. – P. 3122-3138.
6. Дмитриев С.П., Степанов О.А. Нелинейные алгоритмы комплексной обработки избыточных измерений // Известия академии наук. Теория и системы управления. – 2000. – № 4. – С 52-61.
7. Aravkin A., Burke J.V., Ljung L., Lozano A., Pillonetto G. Generalized Kalman smoothing: Modeling and algorithms // Automatica. – 2017. – Vol. 86. – P. 63-86.
8. Богданов М.Б., Прохорцов А.В., Савельев В.В., Смирнов В.А., Соловьев А.Э. Обзор методов комплексирования в интегрированных навигационных системах // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – Вып. 5. – С. 118-126.
9. Дмитриев С.П., Степанов О.А., Кошаев Д.А. Исследование способов комплексирования данных при построении инерциально-спутниковых систем // Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации: Сб. статей и докладов. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – С 43-59.
10. Дмитриев С.П., Степанов О.А. Неинвариантные алгоритмы обработки информации инерциальных навигационных систем // Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации: Сб. статей и докладов. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – С. 67-82.
11. Salychev O.S. Applied inertial navigation: problems and solutions. – Moscow, Russia, BMSTU press, 2004. – 302 p.
12. Julier S., Uhlmann J. A non-divergent estimation algorithm in the presence of unknown correlations // Proc. Amer. Control Conf. – 1997. – Vol. 4. – P. 2369-2373.

13. Ng G.W., Yang R. Comparison of decentralized tracking algorithms // Proc. 6th Int. Conf. Inform. Fusion. – 2003. – Vol. 1. – P. 107-113.
14. Гэн К., Чулин Н.А. Интегрированная навигационная система для беспилотных летательных аппаратов с возможностью обнаружения и изоляции неисправностей // Наука и образование. – 2016. – № 12. – С. 182-206. – DOI: 10.7463/1216.0852517.
15. Gan Q., Harris C.J. Comparison of two measurement fusion methods for Kalman-filter-based multisensor data fusion // IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems. – Jan, 2001. – Vol. 37, No. 1. – P. 273-279.
16. Bocharde O., Calhoun R., Uhlmann J.K., Julier S.J. Generalized information representation and compression using covariance union // Proc. 9th Int. Conf. Inform. Fusion. – Jul 2006. – P. 1-7.
17. Мишин А.Ю., Фролова О.А., Исаев Ю.К., Егоров А.В. Комплексная навигационная система летательного аппарата // Тр. МАИ. – 2010. – Вып. № 38. – Свободный режим доступа: URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=14161>.
18. Фомичев А.В., Тянь Л. Разработка алгоритма быстрой компенсации погрешностей комплексированной инерциально-спутниковой системы навигации малогабаритных беспилотных летательных аппаратов в условиях сложной среды // Наука и образование. – 2015. – № 10. – С. 252-270. – DOI: 10.7463/1015.0821641.
19. Bar-Shalom Y., Campo L. The effect of the common process noise on the two-sensor fused track covariance // IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems. – Nov. 1986. – Vol. AES-22. – P. 803-805.
20. Chen H., Kirubarajan T., Bar-Shalom Y. Performance limits of track-to track fusion vs. centralized estimation: theory and application // Fusion. – Aug. 2001. – Vol. 1. – P. TuB1-25-33.
21. Аль Битар Н., Гаврилов А.И. Интеграция бесплатформенной инерциальной и спутниковой навигационных систем на основе слабосвязанной схемы комплексирования с использованием расширенного фильтра Калмана // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2019. – № 4 (88). – DOI: 10.18698/2308-6033-2019-4-1870.
22. Gning A., Abdallah F., Bonnifait P. A new estimation method for multisensor fusion by using interval analysis and particle filtering // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. – Apr. 2007. – P. 3844-3849.
23. Liu Y., Wang B., He W., Zhao J., Ding Z. Fundamental principles and applications of particle filters // Proc. 6th World Congr. Intell. Control Autom. – Jun. 2006. – P. 5327-5331.
24. Julier S., Uhlmann J., Durrant-Whyte H. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators // IEEE Transactions on automatic control. – 2000. – Vol. 45, No. 3. – P. 477-482.
25. Arthur G.O., Mutambara A. Information based estimation for both linear and nonlinear systems // Proceedings of the American Control Conference. – Jun. 1999. – P. 1329-1333.

REFERENCES

1. Stepanov O.A. Osnovy teorii otsenivaniya s prilozheniyami k zadacham obrabotki navigatsionnoy informatsii. Ch. 1. Vvedenie v teoriyu otsenivaniya [Fundamentals of estimation theory with applications to navigation information processing problems. Part 1. Introduction to assessment theory]. 3rd ed. St. Petersburg: GNTS RF AO «Kontsem «TsNII «Elektropribor», 2017, 509 p.
2. Ljung L. Perspectives on system identification, *Annual Reviews in Control*, April, 2010, Vol. 34, Issue 1, pp. 1-12.
3. Ljung L. Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya [System identification. Theory for the user]; trans. from engl., ed. by Ya.Z. Tsyapkina. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 1991, 432 p. ISBN 5-02-014511-4.
4. Chernorutskiy I.G. Metody optimizatsii. Komp'yuternye tekhnologii [Optimization methods. Computer technologies]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011, 384 p.
5. Luo R.C., Chang C.C., Lai C.C. Multisensor fusion and integration: theories, applications, and its perspectives, *IEEE Sensors Journal*, 2011, Vol. 11, No. 12, pp. 3122-3138.
6. Dmitriev S.P., Stepanov O.A. Nelineynye algoritmy kompleksnoy obrabotki izbytochnykh izmereniy [Nonlinear algorithms for complex processing of redundant measurements], *Izvestiya akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Academy of Sciences. Theory and control systems], 2000, No. 4, pp. 52-61.
7. Aravkin A., Burke J.V., Ljung L., Lozano A., Pillonetto G. Generalized Kalman smoothing: Modeling and algorithms, *Automatica*, 2017, Vol. 86, pp. 63-86.
8. Bogdanov M.B., Prokhorov A.V., Savel'ev V.V., Smirnov V.A., Solov'ev A.E. Obzor metodov kompleksirovaniya v integrirovannykh navigatsionnykh sistemakh [Review of integration methods in integrated navigation systems], *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical science], 2020, Issue 5, pp. 118-126.

9. Dmitriev S.P., Stepanov O.A., Koshaev D.A. Issledovanie sposobov kompleksirovaniya dannykh pri postroenii inertzial'no-sputnikovyykh sistem [Study of methods for integrating data when constructing inertial-satellite systems], *Integriruyemye inertzial'no-sputnikovyye sistemy navigatsii: Sb. statey i dokladov* [Integrated inertial-satellite navigation systems: Collection of articles and reports]. St. Petersburg: GNTS RF TSNII «Elektropribor», 2001, pp 43-59.
10. Dmitriev S.P., Stepanov O.A. Neinvariantnyye algoritmy obrabotki informatsii inertzial'nykh navigatsionnykh sistem [Non-invariant algorithms for processing information of inertial navigation systems], *Integriruyemye inertzial'no-sputnikovyye sistemy navigatsii: Sb. statey i dokladov* [Integrated inertial-satellite navigation systems: Collection of articles and reports]. St. Petersburg: GNTS RF TSNII «Elektropribor», 2001, pp. 67-82.
11. Salychev O.S. Applied inertial navigation: problems and solutions. Moscow, Russia, BMSTU press, 2004, 302 p.
12. Julier S., Uhlmann J. A non-divergent estimation algorithm in the presence of unknown correlations, *Proc. Amer. Control Conf.*, 1997, Vol. 4, pp. 2369-2373.
13. Ng G.W., Yang R. Comparison of decentralized tracking algorithms, *Proc. 6th Int. Conf. Inform. Fusion*, 2003, Vol. 1, pp. 107-113.
14. Gen K., Chulin N.A. Integriruyemaya navigatsionnaya sistema dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov s vozmozhnost'yu obnaruzheniya i izolyatsii neispravnostey [Integrated navigation system for unmanned aerial vehicles with the ability to detect and isolate faults], *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2016, No. 12, pp. 182-206. DOI: 10.7463/1216.0852517.
15. Gan Q., Harris C.J. Comparison of two measurement fusion methods for Kalman-filter-based multisensor data fusion, *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, Jan, 2001, Vol. 37, No. 1, pp. 273-279.
16. Bocharov O., Calhoun R., Uhlmann J.K., Julier S.J. Generalized information representation and compression using covariance union, *Proc. 9th Int. Conf. Inform. Fusion*, Jul 2006, pp. 1-7.
17. Mishin A.Yu., Frolova O.A., Isaev Yu.K., Egorov A.V. Kompleksnaya navigatsionnaya sistema letatel'nogo apparata [Integrated navigation system of an aircraft], *Tr. MAI* [Proceedings of MAI], 2010, Issue No. 38. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=14161>.
18. Fomichev A.V., Tan' L. Razrabotka algoritma bystroy kompensatsii pogreshnostey kompleksirovannoy inertzial'no-sputnikovoy sistemy navigatsii malogabaritnykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov v usloviyakh slozhnoy sredy [Development of an algorithm for fast error compensation of an integrated inertial-satellite navigation system for small unmanned aerial vehicles in a complex environment], *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2015, No. 10, pp. 252-270. DOI: 10.7463/1015.0821641.
19. Bar-Shalom Y., Campo L. The effect of the common process noise on the two-sensor fused track covariance, *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, Nov. 1986. Vol. AES-22. pp. 803-805.
20. Chen H., Kirubarajan T., Bar-Shalom Y. Performance limits of track-to track fusion vs. centralized estimation: theory and application, *Fusion*, Aug. 2001, Vol. 1, pp. TuB1-25-33.
21. Al' Bitar N., Gavrilov A.I. Integratsiya besplatformennoy inertzial'noy i sputnikovoy navigatsionnykh sistem na osnove slabosvyazannoy skhemy kompleksirovaniya s ispol'zovaniem rasshirennogo fil'tra Kalmana [Integration of strapdown inertial and satellite navigation systems based on a loosely coupled integration scheme using an extended Kalman filter], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2019, No. 4 (88). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-4-1870.
22. Gning A., Abdallah F., Bonnifait P. A new estimation method for multisensor fusion by using interval analysis and particle filtering, *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Apr. 2007, pp. 3844-3849.
23. Liu Y., Wang B., He W., Zhao J., Ding Z. Fundamental principles and applications of particle filters, *Proc. 6th World Congr. Intell. Control Autom.*, Jun. 2006, pp. 5327-5331.
24. Julier S., Uhlmann J., Durrant-Whyte H. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators, *IEEE Transactions on automatic control*, 2000, Vol. 45, No. 3, pp. 477-482.
25. Arthur G.O., Mutambara A. Information based estimation for both linear and nonlinear systems, *Proceedings of the American Control Conference*, Jun. 1999, pp. 1329-1333.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.В. Гаврилов.

Зыков Александр Павлович – АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения»; e-mail: zvukof@rambler.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74959815630, доб. 1609; аспирант; ведущий инженер-математик.

Мионов Павел Никитич – Московский авиационный институт; e-mail: apr@gosniip.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74959815630, доб.1851; к.т.н.; доцент.

Zykov Aleksandr Pavlovich – JSC «GosNIIP»; e-mail: zvukof@rambler.ru; Moscow, Russia; +74959815630, add 1609; graduate student; leading mathematical engineer.

Mironov Pavel Nikitich – Moscow Aviation Institute; e-mail: apr@gosniip.ru; Moscow, Russia; phone: +74959815630, add 1851; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-155-167

Д.В. Котов, О.Б. Лебедев

**УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕДВИЖЕНИЕМ ГРУППЫ БПЛА С СОБЛЮДЕНИЕМ
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СТРОЯ НА ОСНОВЕ
АЛЬТЕРНАТИВНОЙ КОЛЛЕКТИВНОЙ АДАПТАЦИИ**

Основным способом решения задач планирования и управления движением является использование интеллектуальных технологий. При этом интеллектуальные технологии применяются для решения задач постановки и корректировки целей управления и программы действий по реализации этих целей, а также для формирования алгоритма управления в условиях неопределенности, обусловленной различными факторами, в исполнительных элементах, подсистеме управления движением, подсистеме планирования и поведения. Данная работа посвящена актуальной проблеме математического моделирования и теории управления: задаче децентрализованного управления мультиагентной системой, состоящей из агентов, моделирующих поведение автономных роботов, с целью обеспечения движения группы роботов, развернутых в линию и в строю типа «конвой». В работе рассматриваются результаты исследований в сфере управления группой беспилотных летательных аппаратов, определены типы задач, которые могут выполняться группой воздушных роботов, выделены основные стратегии управления и их особенности. Сформированы общие позиции, необходимые для разработки детализированного алгоритма группового управления. Каждый робот должен ориентироваться в пространстве автономно без GPS по сигналам с собственной камеры или лидара (активного дальномера) определять помехи, выстраивать оптимальные пути движения и принимать решения, направленные на достижения цели и выполнения задачи. Управление осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации. Для реализации механизма адаптации параметрам вектора сопоставляются автоматы адаптации, моделирующие поведение объектов адаптации в среде. Разработана структура процесса альтернативной коллективной адаптации, под управлением которой осуществляется передвижение группы роботов в строю.

Рой роботов; система управления; беспилотные летательные аппараты; геометрическая структура строя; конечный автомат; децентрализованное взаимодействие; коллективная альтернативная адаптация; мультиагентная система.

D.V. Kotov, O.B. Lebedev

**CONTROLLING THE MOVEMENT OF A GROUP OF UAVS
IN COMPLIANCE WITH THE GEOMETRIC STRUCTURE OF THE
FORMATION BASED ON ALTERNATIVE COLLECTIVE ADAPTATION**

The main way to solve problems of planning and traffic control is the use of intelligent technologies. At the same time, intelligent technologies are used to solve the problems of setting and adjusting control goals and action programs to implement these goals, as well as to form a control algorithm under conditions of uncertainty caused by various factors in actuators, the motion control subsystem, and the planning and behavior subsystem. This work is devoted to the actual problem of mathematical modeling and control theory: the problem of decentralized control of a multi-agent system consisting of agents modeling the behavior of autonomous robots in order to ensure the

movement of a group of robots deployed in a line and in a «convoy» type formation. The paper examines the results of research in the field of controlling a group of unmanned aerial vehicles, identifies the types of tasks that can be performed by a group of aerial robots, and highlights the main control strategies and their features. The general positions necessary for the development of a detailed group control algorithm have been formed. Each robot must navigate in space autonomously without GPS using signals from its own camera or lidar (active rangefinder), identify obstacles, build optimal paths of movement and make decisions aimed at achieving the goal and completing the task. Management is carried out using an alternative collective adaptation algorithm, based on the ideas of collective behavior of adaptation objects. To implement the adaptation mechanism, the vector parameters are matched with adaptation automata that model the behavior of adaptation objects in the environment. A structure for the process of alternative collective adaptation has been developed, under the control of which a group of robots moves in formation.

Swarm of robots; control system; unmanned aerial vehicles; geometric structure of the formation; finite state machine; decentralized interaction; collective alternative adaptation; multi-agent system.

Введение. Перспективное направление в области использования беспилотных летательных аппаратов – это их объединение в группы или в рой. Принцип организации роя моделирует поведение различных насекомых, обладающих «коллективным интеллектом», например, рой пчел, муравьиная колония и т.д. [1, 2]. В случае с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), после их объединения в рой, каждый БПЛА управляется собственной автоматикой, а поведением роя может управлять программа с элементами искусственного интеллекта или оператор [3, 4].

В связи с этим, основной целью при объединении БПЛА в рой, является повышение эффективности управления формированием и поддержанием строя автономных беспилотных летательных аппаратов. Достижение поставленной цели возможно за счет разработки методов и алгоритмов децентрализованного управления, учитывающих нелинейный характер структуры систем «автопилот-аппарат» [1, 5, 6].

В работах [7–9] представлено децентрализованное правило управления группой агентов, моделирующих мобильных роботов, которое обеспечивает движение группы агентов с соблюдением определённой геометрической структуры строя (определённых взаимных расстояний относительно друг друга), при условиях полной автономности агента и возможности получения информации только от своих ближайших соседей. Децентрализованное управление это способ, при котором основной объём вычислений производится не в наземном центре управления и планирования операций, а на борту беспилотных машин [3, 5]. Данный способ включает в себя три варианта управления группой воздушных роботов:

- ◆ коллективная;
- ◆ стайная;
- ◆ роевая стратегии управления.

Строем будем называть требуемое расположение роботов на плоскости или в пространстве. В зависимости от того, каким образом задан целевой строй, строевая задача может иметь различную постановку [5, 6–11].

Для равномерного распределения агентов в зоне выполнения миссии, поддержания устойчивой связи внутри группы и исключения столкновений роботы должны при движении соблюдать некоторую геометрическую структуру (определённое расположение относительно друг друга внутри строя или относительно центра масс группы, образующее определённую геометрическую фигуру) [7–9].

Управление может осуществляться с помощью искусственной нейронной сети (ИНС) и алгоритма коллективной альтернативной адаптации (КАА), основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации. Для реализации механизма адаптации параметрам вектора сопоставляются автоматы адаптации, моделирующие поведение объектов адаптации в среде [12]. В данной работе представлена разработанная структура процесса КАА, под управлением которого осуществляется передвижение группы роботов в строю (движение коллектива роботов в колонне и развернутых в линию).

Управление движением группы роботов в строю типа «конвой». В данном разделе рассмотрено управление движением группы роботов в строю типа «конвой». Решается задача локализации роботов с использованием относительного положения. Особое внимание уделено получению закона управления движением роботов в колонне [7–15].

В первой постановке рассматривается колонна – строй, в котором роботы расположены последовательно друг за другом на заданной дистанции. Роботы пронумерованы от R_0 - ведущего робота до R_n - замыкающего колонну. Этот тип движения требует, чтобы каждый робот R_i ($i=1,2,\dots,n$), кроме первого ведущего, двигался по траектории, вдоль которой движется робот R_{i-1} , с некоторым временным запаздыванием T . Ведущий робот R_0 может быть оснащен сенсорной системой, позволяющей ему планировать траекторию в непредсказуемой обстановке, в то время как остальные роботы должны просто повторять траекторию своего ближайшего соседа. На рис. 1. представлена схема движения коллектива мобильных роботов в колонне [8].

В работе рассматриваются системы, в которых агенты перемещаются в обычном евклидовом пространстве с дискретным временем.

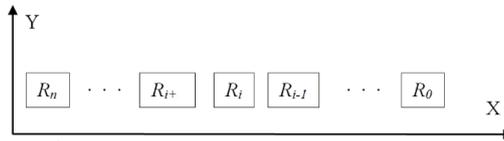


Рис. 1. Схема движения роя мобильных роботов в колонне

Приведём теперь кинематическую модель мобильного робота, а также разработанный метод управления его движением вдоль произвольной траектории [9, 10].

На рис. 2 представлено расположения мобильного робота R_i в абсолютной системе координат OXY и связанная с R_i система координат $0_i X_i Y_i$.

Задаются исходные параметра строя. Известен вектор $V_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ состояния каждого из роботов R_i в абсолютной системе координат. В скобках – $(x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейная скорость робота соответственно.

S_0 – фиксированная дистанция (расстояние) между любой парой соседних в колонне роботов R_i и R_{i+1} в абсолютной систем координат.

Пусть $S_i(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_{i-1}(t))^2 + (y_i(t) - y_{i-1}(t))^2}$ – расстояние между двумя соседними роботами R_i и R_{i-1} в колонне.

$\omega_{i, i-1} = \varphi_i - \varphi_{i-1}$ – угол между осями $0_i X_i$ и $0_{i-1} X_{i-1}$ связанных систем координат соседних роботов R_i и R_{i-1} .

$V_i(t)$ – линейная скорость передвижения робота R_i в момент времени t .

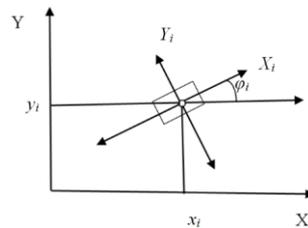


Рис. 2. Координаты мобильного робота

Закон управления, ограничивается рассмотрением кинематической модели. Здесь не учитываются инерционные и конструктивные параметры роботов [11].

Если известен вектор $\mathbf{V}_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ состояния каждого из роботов в абсолютной системе координат, то для вычисления скорости робота R_i достаточно знать длину проекции вектора робота R_i в абсолютной системе координат на ось связанной системы координат X_i . Это обстоятельство существенно упрощает реализацию закона управления [9–11].

Рассмотрим теперь задачу управления ведомыми роботами. Главная идея состоит в том, что целью управления ведомыми роботами является выполнение (достижение равенств) равенств:

$$\begin{aligned}\omega_{i,i-1}(t+1) &= 0; \\ V_i(t+1)\cos\omega_{i,i-1}(t+1) &= V_{i-1}(t); \\ S_i &= S_0.\end{aligned}$$

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени t производилось перепланирование параметров движения роботов, следующих за роботом R_{i+1} . Ошибкой робота R_i является: $\delta S_i = S_i(t) - S_0$, $\omega_{i,i-1}(t) > 0$, δx_i , δy_i .

Задача состоит в том, чтобы робот R_i точно следовал за роботом R_{i-1} .

Стратегия 1 для каждого робота R_i ($i > 0$) заключается в коррекции движения по текущему отклонению от заданной траектории следования псевдоцели (робота R_{i-1}). При этом должны быть пройдены все точки с минимальным отклонением.

Стратегия 2 (сближение с псевдоцелью) осуществляет «параллельное сближение» робота R_i с траекторией следования псевдоцели с соблюдением заданного расстояния между парой соседних в колонне роботов R_{i+1} и R_i и предполагает вычисление углов «рыскания» для прогнозирования их места встречи. Точное прохождение робота через опорные точки не требуется. На рис. 3 представлено, каким образом формируется программная траектория каждого ведомого робота [8, 9].

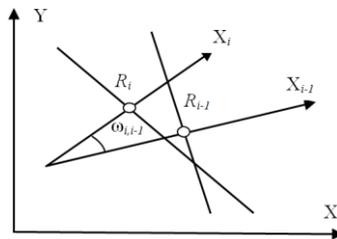


Рис. 3. Схема расположения двух соседних роботов в абсолютной системе координат OXY

Рассмотрим теперь соответствующие модели. Кинематическая модель каждого из роботов имеет вид:

$$\omega_{i,i-1}(t+1) = \omega_{i,i-1}(t) + \delta_\omega \omega_{i,i-1}(t); \quad (1)$$

$$V_i(t+1)\cos\omega_{i,i-1}(t+1) = V_{i-1}(t+1) + \delta_V V_{i-1}(t+1); \quad (2)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \delta_x x_i(t); \quad (3)$$

$$y_i(t+1) = y_i(t) + \delta_y y_i(t); \quad (4)$$

Программная траектория каждого ведомого робота формируется следующим образом. Закон управления, ограничивается рассмотрением кинематической модели. Здесь не учитываются инерционные и конструктивные параметры робота [11].

Максимальные значения скорости $V_i(t+1)$ и угла рыскания $\omega_{i,i-1}(t+1)$ устанавливаются системой управления в допустимых пределах.

Рассмотрим теперь соответствующие модели. Приведем применяемые продукционные правила в порядке приоритета их исполнения.

Правило 1 (устранение расхождения курса робота R_{i+1}). Если $\omega_{i,i-1}(t) > 0$, то выполняется коррекция угла между осями координат $\theta_i X_i$ и $\theta_{i-1} X_{i-1}$ с целью его уменьшения, в соответствии с выражением (1).

Правило 2. Если отклонение и время отработки отклонения не превышает наперед заданных пороговых значений, то выполняется коррекция скорости $V_i(t+1)$ движения по текущему отклонению от заданной траектории следования псевдоцели, в соответствии с выражениями (2,3,4).

Первое правило предназначено для решения задачи управления при условии оказания управляющего воздействия на направление перемещения агента, а второе правило – при условии оказания управляющего воздействия на скорость агента. Для каждого правила управления представлен его дискретный аналог.

Линейная скорость $V_{i-1}(t)$, угол $\omega_{i,i-1}(t)$ и координаты x_i, y_i место расположения преследуемого робота R_{i-1} являются возмущениями неопределенного характера, а для догоняющего робота R_i – в качестве параметров управления передвиганием робота.

Для управления движением группы роботов в строю типа «конвой» используется разработанный адаптивный алгоритм с обратной связью, базирующийся на методе компенсации и классическом представлении об астатизме систем управления [8, 12]. Подход к решению этой задачи состоит в формализации понятия отклонения текущего положения робота от требуемого на основе визуальной информации и поиске такого управления с обратной связью, которое обеспечивает сведение к нулю нормы этого отклонения. Для управления движением роботов вдоль фрагмента траектории предыдущего робота, использованы кинематические уравнения в переменных состояния, характеризующих выполнение цели управления. Также решена задача локализации роботов с использованием относительного положения.

Управление движением группы роботов в строю типа «конвой» осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации [10].

Объектами адаптации догоняющего робота R_i являются рассматриваемые в качестве управлений параметры вектора $\mathbf{V}_i = (x_i, y_i, \phi_i, V_i)$ – положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейная скорость робота соответственно.

Коллектив объектов адаптации (их совокупность) группы роботов в строю типа «конвой» соответствует объекту оптимизации (ОО).

Для реализации механизма адаптации параметрам вектора $\mathbf{V}_i = (x_i, y_i, \phi_i, V_i)$ сопоставляются автоматы адаптации АА – a_i^x, a_i^y, a_i^V , моделирующие поведение объектов адаптации в среде. Автомат адаптации имеет две группы состояний: $C_1 = \{c_{1i} | i=1, 2, \dots, g\}$ и $C_2 = \{c_{2i} | i=1, 2, \dots, g\}$, соответствующие двум альтернативам A_1 и A_2 поведения объекта адаптации в среде: A_1 – изменить размер параметра, A_2 – оставить без изменения. Таким образом выходной алфавит автомата адаптации $A = \{A_1, A_2\}$. Число состояний в группе задается параметром g , называемым глубиной памяти. Входной алфавит $Q = \{+, -\}$ включает возможные отклики среды: «поощрение» (+) и «наказание» (-). Граф-схема переходов АА, представлена на рис. 4.

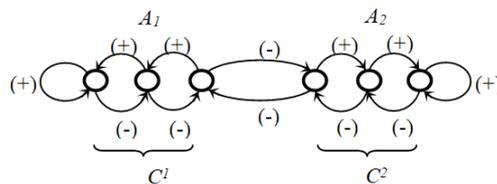


Рис. 4. Структура автомата адаптации

На вход автомата адаптации подается сигнал «поощрение» или «наказание» в зависимости от состояния объекта адаптации (параметра вектора \mathbf{V}_i) в среде. Знаком (+) помечены переходы в АА под действием сигнала «поощрение», знаком (-) помечены

переходы под действием сигнала «наказание». Не нарушая общности, рассмотрим принципы функционирования одного АА. Первоначально АА находится в одном из начальных состояний (на рисунке эти состояния выделены жирным шрифтом).

Введем обозначение оценок (значений) параметров робота R_i :

$$\rho^a_i(t) \text{ для } \omega_{i,i-1}(t), \rho^V_i(t) \text{ для } V_{i-1}(t), \rho^x_i(t) \text{ для } x_i(t), \rho^y_i(t) \text{ для } y_i(t).$$

Локальная цель объекта адаптации – достижение такого состояния, при котором его оценка $\rho_i^- = 0$. Глобальная цель коллектива объектов адаптации заключается в достижении такого состояния S (т.е. такого распределения вершин по узлам), при котором $F(S) \rightarrow \min$.

Процесс альтернативной коллективной адаптации, под управлением которого осуществляется передвижение группы роботов в строю типа «конвой», на каждом шаге t осуществляется за четыре такта.

На первом такте коллективной адаптации для каждого R_i рассчитываются значения параметров вектора V_i .

На втором такте для каждого автомата адаптации a_i^- вырабатывается отклик среды: «поощрение» или «наказание»:

1. Для каждого АА, управляющего изменением угла $\omega_{i,i-1}(t)$:

Если $\text{sgn}(\omega_{i,i-1}(t))=0$, то для АА $a^o_i(t+1)$, вырабатывается сигнал «поощрение» (+).

Если $\text{sgn}(\omega_{i,i-1}(t)) \neq 0$, то для АА $a^o_i(t+1)$ вырабатывается сигнал «наказание» (-).

2. Для каждого АА, управляющего изменениями x_i, y_i .

Если $\text{sgn}(S_i(t+1)-S_0)=0$, то для АА $a^{xy}_i(t+1)$, вырабатывается сигнал «поощрение» (+).

Если $\text{sgn}(S_i(t+1)-S_0) \neq 0$, то для АА $a^{xy}_i(t+1)$ вырабатывается сигнал «наказание» (-).

3. Для каждого АА, управляющего изменениями V_i .

Если $\text{sgn}(V_i(t)-V_{i-1}(t))=0$, то для АА $a^V_i(t+1)$, вырабатывается сигнал «поощрение» (+).

Если $\text{sgn}(V_i(t)-V_{i-1}(t)) \neq 0$, то для АА $a^V_i(t+1)$ вырабатывается сигнал «наказание» (-).

На третьем такте в каждом автомате адаптации a_i под действием подаваемого на его вход отклика q_i осуществляется переход в новое состояние.

На четвертом такте для каждого объекта адаптации реализуется альтернатива в соответствии с выходами АА:

1. Если АА $a^o_i(t+1)$ находится в одном из состояний группы $C^l ij$, то $\omega_{i,i-1}(t)$ не изменяется.

Если АА $a^o_i(t+1)$ находится в одном из состояний группы $C^2 ij$, то $|\omega_{i,i-1}(t+1)| = |\omega_{i,i-1}(t) - \delta_\omega| \omega_{i,i-1}(t)|$.

2. Если АА $a^{xy}_i(t+1)$ находится в одном из состояний группы $C^l ij$, то $x_i(t+1) = x_i(t)$, $y_i(t+1) = y_i(t)$.

Если АА $a^{xy}_i(t+1)$ находится в одном из состояний группы $C^2 ij$, то:

если $S_i(t) > S_0$, то $x_i(t+1) = x_i(t) - \delta_x \cdot \cos \varphi_i(t+1)$, $y_i(t+1) = y_i(t) - \delta_y \cdot \sin \varphi_i(t+1)$,

если $S_i(t) < S_0$, то $x_i(t+1) = x_i(t) + \delta_x \cdot \cos \varphi_i(t+1)$, $y_i(t+1) = y_i(t) + \delta_y \cdot \sin \varphi_i(t+1)$.

3. Если АА $a^V_i(t+1)$ находится в одном из состояний группы $C^l ij$, то $V_i(t+1) = V_i(t)$.

Если $V_i(t) > V_{i-1}(t)$, то $V_i(t+1) = V_i(t) - \delta_V \cdot \cos \varphi_i(t+1)$, $y_i(t+1) = y_i(t) - \delta_x \cdot \sin \varphi_i(t+1)$,

Если $V_i(t) < S_0$, то $x_i(t+1) = x_i(t) + \delta_x \cdot \cos \varphi_i(t+1)$, $y_i(t+1) = y_i(t) + \delta_x \cdot \sin \varphi_i(t+1)$.

Управление движением группы роботов, развернутых в линию. При совместном движении двух и более робототехнических комплексов (РТК) важно знать их взаимное расположение с высокой точностью [7,8]. Каждому из роботов необходим набор датчиков, позволяющих ему получать информацию об окружающей среде. Поэтому, для полноценной работы мобильного РТК роботы оснащены радиочастотными датчиками определения взаимного местоположения. В состав каждого интеллектуального агента (мобильного робота) входит решающее устройство, получающее данные от других устройств по беспроводным каналам. Производя их обработку, устройство формирует команды автопилоту. Обработывая считанную сенсорами информацию, система управления движением решает задачу построения пути перемещения [15–23].

Роботы, развернутые в линию, пронумерованы от R_0 – ведущего робота до R_n – замыкающего линейку роботов. Этот тип движения требует, чтобы каждый робот R_i ($i=1,2,\dots,n$), кроме первого (ведущего), двигался по траектории, параллельно той по которой движется робот R_{i-1} , с одинаковой скоростью $V_i=V_0$ с соблюдением постоянного расстояния D между каждой парой соседних роботов R_i и R_{i-1} , при этом робот R_i выравнивает траекторию по траектории робота R_{i-1} .

Ведущий робот R_0 может быть оснащен сенсорной системой, позволяющей ему планировать траекторию в непредсказуемой обстановке, в то время как остальные роботы должны просто повторять траекторию своего ближайшего соседа. На рис. 5 представлена схема движения коллектива мобильных роботов, выстроенных в шеренгу, относительно базовой линии [9–10].

В работе рассматриваются системы, в которых агенты перемещаются в обычном евклидовом пространстве с дискретным временем.

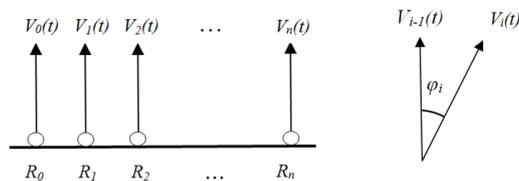


Рис. 5. Схема движения роя мобильных роботов развернутых в линию

Известен вектор $W_i=(x_i, y_i, \alpha_i, h_i, V_i)$ состояния каждого из роботов в абсолютной системе координат, где (x_i, y_i) – координаты место расположения робота, V_i – скорость передвижения робота, α_i – угол между вектором V_i и базовой линией Line, h_i – модуль вектора V_i . Заданы α_0 – для ведущего робота и D – расстояние в линии между соседними роботами R_i и R_{i-1} .

Рассмотрим теперь задачу управления ведомыми роботами. Главная идея состоит в том, что целью управления ведомыми роботами является выполнение (достижение R_i с курсом робота R_{i-1}) равенств:

1. $V_{i-1}(t)=V_i(t)$.
 2. $h_{i-1}(t)=h_i(t)$.
 3. $x_i(t)-x_{i-1}(t)=D$.
 4. $y_i(t)=y_{i-1}(t)$.
 5. $\alpha_i(t)=\alpha_{i-1}(t)=\alpha_0$.
- $\varphi_i(t)=\alpha_i(t)-\alpha_{i-1}(t)$ – угол между $V_{i-1}(t)$ и $V_i(t)$.

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени t производится перепланирование параметров движения каждого робота R_i , движущегося параллельно с соседним роботом R_{i-1} . Ошибкой робота R_i является:

$$\delta_i=k_1(|D-(x_i(t)-x_{i-1}(t))|+k_2|(y_i(t)-y_{i-1}(t))|+k_3|(h_i(t)-h_{i-1}(t))|+k_4|(\alpha_i(t)-\alpha_0)|).$$

Ошибка перемещения роботов: $\Delta=\sum_i \delta_i$.

Программная траектория каждого ведомого робота формируется следующим образом. Закон управления, ограничивается рассмотрением кинематической модели. Здесь не учитываются инерционные и конструктивные параметры робота.

Максимальные значения отклонения скорости $\delta V=(V_i(t+1)-V_i(t))$ – и угла «рыскания» $\varphi_{i,i-1}(t+1)$ $\varphi_i(t)=\alpha_i(t)-\alpha_{i-1}(t)$ устанавливаются системой управления в допустимых пределах.

Правило 1. (Устранение расхождения курса робота R_i с курсом робота R_{i-1}). Если $\varphi_i(t)>0$, то выполняется коррекция угла $\alpha_i(t)$ между V_i и базовой линией Line с целью уменьшения $\varphi_i(t)$, в соответствии с выражением (5). Цель коррекции – минимизация величины $\varphi_i(t)$.

Правило 2. Если существует отклонение $\varepsilon_h = h_i(t) - h_{i-1}(t)$ и время отработки отклонения не превышает наперед заданных пороговых значений, то выполняется коррекция скорости $h_i(t)$ движения по текущему отклонению от заданной траектории следования псевдоцели, в соответствии с выражениями $h_i(t+1) = h_i(t) + \zeta_v$. Цель коррекции – минимизация величины ζ_v .

Правило 3. Если $y_i(t) - y_{i-1}(t) = \varepsilon_y$ и $|\varepsilon_y| > 0$, то выполняется коррекция $y_i(t) = y_i(t) + \zeta_y$. Цель коррекции – минимизация значения $|\varepsilon_y|$.

Правило 4. Если $x_i(t) - x_{i-1}(t) = \varepsilon_x$ и $|\varepsilon_x| > D$, то выполняется коррекция $x_i(t+1) = x_i(t) + \zeta_x$. Цель коррекции – минимизация разности $(|\varepsilon_x| - D)$.

Предложена структура маневра, выполняемого роботом для коррекции отклонений параметров, заключающаяся в следующем. Сначала робот R_i изменяет значение параметра $\alpha_i(t)$ на величину δ_i , затем в течение времени δ_i робот передвигается с новым значением параметра $\alpha_i(t) = \alpha_i(t) + \delta_i$. По истечении времени δ_i возвращается исходное значение параметра, с которым робот продолжает движение. Маневр, выполняемый роботом R_i , представлен на рис. 6.

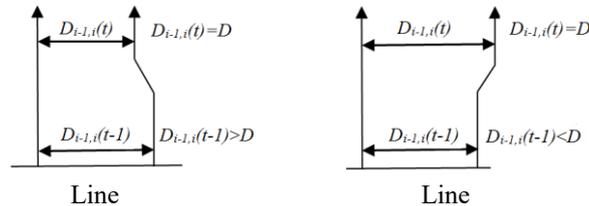


Рис. 6. Схема маневра, выполняемого роботом для коррекции параметра $x_i(t)$

Первое правило предназначено для решения задачи управления при условии оказания управляющего воздействия на направление перемещения робота, а второе правило – при условии оказания управляющего воздействия на скорость агента.

При рассмотрении пары роботов R_{i-1} и R_i параметры: линейные скорости $V_{i-1}(t)$, $V_i(t)$, углы $\alpha_{i-1}(t)$, $\alpha_i(t)$, $\varphi_i(t)$, координаты (x_{i-1}, y_{i-1}) и (x_i, y_i) , модули $h_{i-1}(t)$, $h_i(t)$ являются входными. При этом $V_{i-1}(t)$, $\alpha_{i-1}(t)$, (x_{i-1}, y_{i-1}) , $h_{i-1}(t)$ являются возмущениями неопределенного характера, а параметры робота R_i : $V_i(t)$, $\alpha_i(t)$, $(x_i, y_i)(t)$, $h_i(t)$ используются в качестве параметров управления передвиганием робота. На следующем шаге параметры робота R_i приобретают новые значения $V_i(t+1)$, $\alpha_i(t+1)$, $\alpha_i(t)$, $(x_i, y_i)(t+1)$, $h_i(t+1)$.

Для управления движением группы роботов, развернутых в линию разработан адаптивный алгоритм с обратной связью, базирующийся на методе самообучения и самоорганизации.

Подход к решению этой задачи состоит в формализации понятия отклонения текущего положения ведомого робота R_i от требуемого положения. Это достигается на основе визуальной информации и поиске такого управления с обратной связью, которое обеспечивает сведение к нулю нормы этого отклонения. Для управления движением робота параллельно траектории ведущего (предыдущего) робота R_{i-1} использованы кинематические уравнения в переменных состояния, характеризующих выполнение цели управления. Решена задача локализации роботов с использованием относительного положения.

Управление движением группы роботов, развернутых в линию, осуществляется с помощью алгоритма альтернативной коллективной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации [10, 12].

Объектами адаптации ведомого робота R_i являются рассматриваемые в качестве управлений параметры вектора W_i – положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейная скорость робота соответственно.

Коллектив объектов адаптации (их совокупность) группы роботов, развернутых в линию, соответствует объекту оптимизации (ОО).

Для реализации механизма адаптации каждому объекту (параметру p_{ij} вектора $W_i=(x_i, y_i, a_i, h_i, V_i)$) сопоставляется автомат адаптации АА, моделирующий поведение объекта адаптации в среде. Автомат адаптации имеет две группы состояний: $C_1=\{c_{1l}|l=1,2,\dots,g\}$ и $C_2=\{c_{2l}|l=1,2,\dots,g\}$, соответствующие двум альтернативам A_1 и A_2 поведения объекта адаптации в среде: A_1 – изменить размер параметра, A_2 – оставить без изменения. Таким образом, выходной алфавит автомата адаптации: $A=\{A_1, A_2\}$. Число состояний в группе задается параметром g , называемым глубиной памяти. Входной алфавит $Q=\{+,-\}$ включает возможные отклики среды: «поощрение» (+) и «наказание» (-). Граф-схема переходов АА представлена на рисунке 4. На вход автомата адаптации подается сигнал «поощрение» или «наказание» в зависимости от состояния объекта адаптации (соответствующего параметра вектора W_i) в среде. Знаком (+) помечены переходы в АА под действием сигнала «поощрение», знаком (-) помечены переходы под действием сигнала «наказание».

Не нарушая общности, рассмотрим принципы функционирования одного АА. Первоначально АА находится в одном из начальных состояний (на рисунке эти состояния выделены жирным шрифтом).

Локальная цель объекта адаптации – достижение такого состояния, при котором его оценка равна 0.

Глобальная цель коллектива объектов адаптации заключается в достижении такого состояния S (т.е. таких значений параметров роботов) при которых «Ошибка перемещения» роботов $A=\sum_i \delta_i \rightarrow \min$.

Процесс альтернативной коллективной адаптации, под управлением которого осуществляется передвижение группы роботов, развернутых в линию, осуществляется за четыре такта для каждого робота на каждом шаге t (рис. 7).

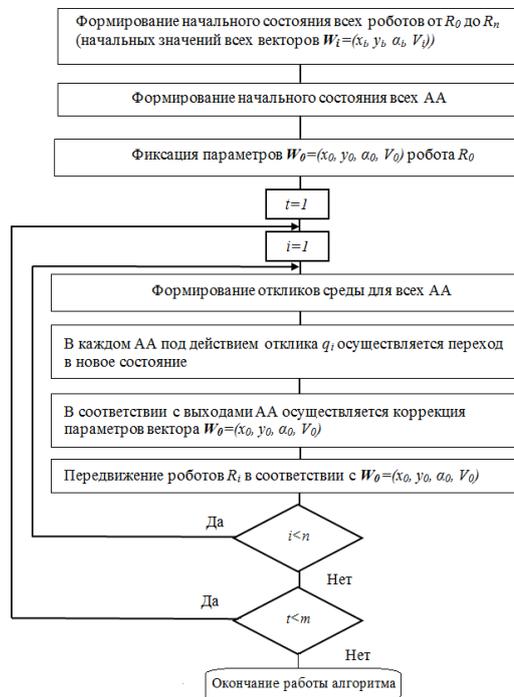


Рис. 7. Структура алгоритма управления движением коллектива роботов, развернутых в линию

Перепланирование параметров движения роботов R_i , производится в каждый момент времени t .

На первом такте коллективной адаптации для каждого R_i рассчитываются значения параметров вектора W_i .

На втором такте для каждого автомата адаптации вырабатывается отклик среды: «поощрение» или «наказание».

Для каждого параметра p_{ij} вектора W_i рассчитывается отклонение $\mu_{ij}(t)$ от его значения в векторе W_{i-1} .

Если $\text{sgn}(\mu_{ij}(t))=0$, то для соответствующего АА вырабатывается сигнал «поощрение» (+).

Если $\text{sgn}(\mu_{ij}(t))\neq 0$, то для соответствующего АА вырабатывается сигнал «наказание» (-).

На третьем такте в каждом автомате адаптации под действием подаваемого на его вход отклика осуществляется переход в новое состояние.

На четвертом такте для каждого объекта адаптации реализуется альтернатива в соответствии с выходами АА:

1. Если АА находится в одном из состояний группы C^1ij , то значение параметра p_{ij} не изменяется.

2. Если АА находится в одном из состояний группы C^2ij , то значение параметра p_{ij} изменяется на величину пропорциональную отклонению $\mu_{ij}(t)$.

Заключение. В работе представлены новые математические методы моделирования движения строя роботов. Для решения задач управления строим разработаны оригинальные правила управления по скорости и по ускорению, обладающие рядом преимуществ по сравнению с другими методами: полная децентрализация управления в сочетании с динамической коррекцией параметров роботов, задающих положение и ориентацию робота в абсолютной системе координат, и линейную скорость робота соответственно. Управление осуществляется с помощью алгоритма коллективной альтернативной адаптации, основанного на идеях коллективного поведения объектов адаптации, что позволяет эффективно обрабатывать внештатные ситуации, такие как выход агентов из строя, изменения числа агентов вследствие выхода из строя или внезапного приобретения связи с очередным агентом, а также в условиях наличия ошибок измерений и шумов, удовлетворяющих определенным ограничениям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желанное и действительное // Современная мехатроника: Сб. научн. трудов Всероссийской научной школы. – 2011. – С. 35-51.
2. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – 3-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Бауманаб 2021. – 448 с.
3. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Методы и модели коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
4. Морозова Н.С. Децентрализованное управление движением строя роботов при динамически изменяющихся условиях // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2015. – Т. 1. – С. 65-74.
5. Бурдаков С.Ф., Сизов П.А. Алгоритмы управления движением мобильного робота в задаче преследования // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2014. – № 6 (210). – С. 49-58.
6. Зенкевич С.Л., Чжу Х. Управление движением группы роботов в строю типа «конвой» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18 (1). – С. 30-34.
7. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Лебедева Е.М. Гибридный алгоритм ситуационного планирования траектории на плоскости в условиях частичной неопределенности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2018. – № 1. – С. 76-93.
8. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление движением группы мобильных роботов в колонне // Научно-практический журнал Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 7-11.

9. *Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Адаптивное управление передвижением коллектива мобильных роботов развернутых в линию // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сб. научных трудов X-й Международной научно-технической конференции (ИММВ-2021). – Смоленск: Универсум, 2021. – С. 238-246.
10. *Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Management of Behavior of a Swarm of Robots Applicable to the Tasks of Monitoring a Some Territory // Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings of the 9th Computer Science On-line Conference. Springer, Czech Republic. – 2020. – Vol. 2. – P. 324-332.
11. *Кузнецов А.В.* Модель движения и взаимодействия системы интеллектуальных агентов // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2018. – № 2. – С. 130-138.
12. *Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Поисковая адаптация: Теория и практика. – М.: Физматлит, 2006. – 272 с.
13. *Иванов С.В., Соколов О.Д., Беседин С.А., Егоров М.О., Андриянов Е.А.* Системы применения роевого интеллекта беспилотными летательными аппаратами на базе пчелиного алгоритма // Информационная безопасность – актуальная проблема современности. Совершенствование образовательных технологий подготовки специалистов в области информационной безопасности. – 2018. – № 1 (9). – С. 329-334.
14. *Иванов С.В., Пищичный Ф.И.* Анализ применения интеллекта живых организмов для исследования алгоритмов функционирования роя беспилотных летательных аппаратов // Актуальные исследования. – 2020. – № 21 (24). – С. 28-32.
15. *Успанова Р.А.* Актуальные проблемы управления группой БПЛА // Тр. тринадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции: в 2-х т. Сер. Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». – СПб., 2021. – № 76. – С. 128-130.
16. *Байгутлина И.А.* Реализация новых сервисов с использованием робототехнических комплексов // Славянский форум. – 2021. – № 4 (34). – С. 162-170.
17. *Щербаков Г.Н., Русин П.В., Рычков А.В., Ужичин М.В., Ефремов И.А.* Актуальность защиты объектов от микро-БПЛА, летящих на предельно малых высотах // Безопасность жизнедеятельности. – 2020. – № 5 (233). – С. 53-59.
18. *Чекалина Е.А., Дмитренко М.Е., Попов А.И.* Управление роем беспилотных летательных аппаратов в тактическом звене управления // Технологии. Инновации. Связь: Сб. материалов научно-практической конференции. – СПб., 2022. – С. 181-185.
19. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Планирование двухмерной траектории в условиях частичной неопределенности на основе интеграции волнового и муравьиного алгоритмов // 5-я Всероссийская Поспеловская конференция с международным участием «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы» ГИСИС'2020. – Зеленоградск: Изд-во Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, 2020. – С. 87-94.
20. *Городецкий В.И.* Управление коллективным поведением роботов в автономной миссии // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 1 (10). – С. 40-54.
21. *Муслимов Т.З., Мунасытов Р.А.* Децентрализованное управление круговыми формациями беспилотных летательных аппаратов на основе метода векторного поля // Вестник УГАТУ. – 2019. – Т. 23, № 3 (85). – С. 112-121.
22. *Медведев Ю.М., Пищихов В.Х. и др.* Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пищихова. – М.: Физматлит, 2014. – 300 с.
23. *Пищихов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В.* Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // Проблемы управления. – 2015. – С. 66-74.

REFERENCES

1. *Karpov V.E.* Kollektivnoe povedenie robotov. Zhelaemoe i deystvitel'noe [Collective behavior of robots. Desired and real], *Sovremennaya mekhatronika: Sb. nauchn. trudov Vserossiyskoy nauchnoy shkoly* [Modern mechatronics. Proceedings of the All-Russian Scientific School], 2011, pp. 35-51.
2. *Karpenko A.P.* Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennye prirodoy: ucheb. posobie [Modern search engine optimization algorithms. Algorithms inspired by nature: a tutorial]. 3rd ed. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2021, 448 p.
3. *Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.* Metody i modeli kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Methods and models of collective management in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 280 p.

4. *Morozova N.S.* Detsentralizovannoe upravlenie dvizheniem stroya robotov pri dinamicheski izmenyayushchikhsya usloviyakh [Decentralized control of the movement of robots in a dynamically changing environment], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial Intelligence and Decision Making], 2015, Vol. 1, pp. 65-74.
5. *Burdakov S.F., Sizov P.A.* Algoritmy upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota v zadache presledovaniya [Algorithms for controlling the motion of a mobile robot in the pursuit problem], *Informatika, telekommunikatsii i upravlenie* [Informatics, Telecommunications and Management], 2014, No. 6 (210), pp. 49-58.
6. *Zenkevich S.L., Chzhu Kh.* Upravlenie dvizheniem gruppy robotov v stroyu tipa «konvoy» [Movement control of a group of robots in an «escort» type formation], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2017, Vol. 18 (1), pp. 30-34.
7. *Lebedev B.K., Lebedev O.B., Lebedeva E.M.* Gibridnyy algoritm situatsionnogo planirovaniya traektorii na ploskosti v usloviyakh chastichnoy neopredelennosti [Hybrid algorithm for situational planning of a trajectory on a plane under conditions of partial uncertainty], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Instrumentation], 2018, No. 1, pp. 76-93.
8. *Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Upravlenie dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov v kolonne [Controlling the movement of a group of mobile robots in a column], *Nauchno-prakticheskiy zhurnal Informatizatsiya i svyaz'* [Scientific and practical journal Informatization and communication], 2021, No. 3, pp. 7-11.
9. *Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Adaptivnoe upravlenie peredvizheniem kolektiva mobil'nykh robotov razvernutykh v liniyu [Adaptive control of the movement of a group of mobile robots deployed in a line], *Integrirovannyye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte: Sb. nauchnykh trudov X-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii (IMMV-2021)* [Integrated models and soft computing in artificial intelligence. Collection of scientific papers of the Xth International Scientific and Technical Conference]. Smolensk: Universum, 2021, pp. 238-246.
10. *Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Management of Behavior of a Swarm of Robots Applicable to the Tasks of Monitoring a Some Territory, *Artificial Intelligence Methods in Intelligent Algorithms. Proceedings of the 9th Computer Science On-line Conference. Springer, Czech Republic*, 2020, Vol. 2, pp. 324-332.
11. *Kuznetsov A.V.* Model' dvizheniya i vzaimodeystviya sistemy intellektual'nykh agentov [Model of motion and interaction of the system of intelligent agents], *Vestnik VGU. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of VSU. System Analysis and Information Technology], 2018, No. 2, pp. 130-138.
12. *Kureychik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Poiskovaya adaptatsiya: Teoriya i praktika [Search Engine Adaptation: Theory and Practice]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 272 p.
13. *Ivanov S.V., Sokolov O.D., Besedin S.A., Egorov M.O., Andriyanov E.A.* Sistemy primeneniya roevogo intellekta bespilotnymi letatel'nyimi apparatami na baze pchelinogo algoritma [Systems for the use of swarm intelligence by unmanned aerial vehicles based on the bee algorithm], *Informatsionnaya bezopasnost' – aktual'naya problema sovremennosti. Sovershenstvovanie obrazovatel'nykh tekhnologiy podgotovki spetsialistov v oblasti informatsionnoy bezopasnosti* [Information security – an urgent problem of our time. Improving educational technologies for training specialists in the field of information security], 2018, No. 1 (9), pp. 329-334.
14. *Ivanov S.V., Pshenichnyy F.I.* Analiz primeneniya intellekta zhivykh organizmov dlya issledovaniya algoritmov funktsionirovaniya roya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Analysis of the application of intelligence of living organisms to study algorithms for the functioning of a swarm of unmanned aerial vehicles], *Aktual'nye issledovaniya* [Current Research], 2020, No. 21 (24), pp. 28-32.
15. *Uspanova R.A.* Aktual'nye problemy upravleniya gruppoy BPLA [Current problems of managing a group of UAVs], *Tr. trinadtsatoy obshcherossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnikeskoy konferentsii: v 2-kh t. Ser. Biblioteka zhurnala «Voenmekh. Vestnik BGTU»* [Proceedings of the thirteenth all-Russian youth scientific and technical conference: in 2 vol. Ser. Library of the magazine «Voenmekh. Bulletin of BSTU»]. St. Petersburg, 2021, No. 76, pp. 128-130.
16. *Baygutlina I.A.* Realizatsiya novykh servisov s ispol'zovaniem robototekhnicheskikh kompleksov [Implementation of new services using robotic systems], *Slavyanskiy forum* [Slavic Forum], 2021, No. 4 (34), pp. 162-170.
17. *Shcherbakov G.N., Rusin P.V., Rychkov A.V., Uzhitsin M.V., Efremov I.A.* Aktual'nost' zashchity ob'ektov ot mikro-BPLA, letyashchikh na predel'no malyykh vysotakh [Relevance of protecting objects from micro-UAVs flying at extremely low altitudes], *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life Safety], 2020, No. 5 (233), pp. 53-59.

18. Chekalina E.A., Dmitrenko M.E., Popov A.I. Upravlenie roem беспилотnykh letatel'nykh apparatov v takticheskom zvene upravleniya [Controlling a swarm of unmanned aerial vehicles at the tactical control level], *Tekhnologii. Innovatsii. Svyaz': Sb. materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technologies. Innovation. Communication: Collection of materials of the scientific and practical conference]. St. Petersburg, 2022, pp. 181-185.
19. Lebedev B.K., Lebedev O.B. Planirovanie dvukhmernoy traektorii v usloviyakh chastichnoy neopredelennosti na osnove integratsii volnovogo i murav'inogo algoritmov [Planning a two-dimensional trajectory under conditions of partial uncertainty based on the integration of wave and ant algorithms], *5-ya Vserossiyskaya Pospelovskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy» GISIS'2020* [5th All-Russian Pospelov Conference with international participation «Hybrid and synergetic intelligent systems» GISIS'2020]. Zelenogradsk: Izd-vo Baltiyskiy federal'nyy universitet im. Immanuila Kanta, 2020, pp. 87-94.
20. Gorodetskiy V.I. Upravlenie kolektivnym povedeniem robotov v avtonomnoy missii [Controlling collective behavior of robots in an autonomous mission], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2016, No. 1 (10), pp. 40-54.
21. Muslimov T.Z., Munasyrov R.A. Detsentralizovannoe upravlenie krugovymi formatsiyami беспилотnykh letatel'nykh apparatov na osnove metoda vektornogo polya [Decentralized control of circular formations of unmanned aerial vehicles based on the vector field method], *Vestnik UGATU* [Vestnik UGATU], 2019, Vol. 23, No. 3(85), pp. 112-121.
22. Medvedev yu.M., Pshikhopov V.Kh. i dr. Intellektual'noe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob"ektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent planning of vehicles path in the environment with obstacles], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2014, 300 p.
23. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Algoritmy adaptivnykh pozitsionno-traektornykh sistem upravleniya podvizhnymi ob"ektami [Algorithms for adaptive position-trajectory control systems for moving objects], *Problemy upravleniya* [Control problems], 2015, pp. 66-74.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Г. Коробейников.

Котов Дмитрий Васильевич – Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации; e-mail: dim.kot2009@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89269275177; научный сотрудник.

Лебедев Олег Борисович – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89085135512; доцент.

Kotov Dmitry Vasilievich – Military Academy of the General Staff of the Armed Forces of the Russian Federation; e-mail: dim.kot2009@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79269275177; researcher.

Lebedev Oleg Borisovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79085135512; associate professor.

УДК 614.842.47

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-167-180

И.В. Образцов, М.Г. Пантелеев

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРАБЛЕЙ ВМФ*

Информации о пожароопасных ситуациях, циркулирующей в контурах систем контроля и управления кораблём ВМФ и уровня технологий искусственного интеллекта, вполне достаточно, чтобы разработать научно-методический аппарат обнаружения пожароопасных ситуаций в корабельных помещениях, определения места их возникновения и факторов пожара, прогнозиро-

* Работа выполняется в рамках научно-исследовательской работы «Поиск и исследование методов и технологий искусственного интеллекта для применения в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей», включенная в научный план ВС РФ на 2023 год и плановый 2024 и 2025 года.

вания развития пожароопасной ситуации и разработать комплекс технологических решений с применением искусственного интеллекта для получения обоснованных рекомендаций по локализации и тушению пожаров на кораблях ВМФ. Это позволит значительно сократить время обнаружения источников возгорания, дать достоверную информацию о пожароопасной обстановке, спрогнозировать развитие пожара в корабельных помещениях и оперативно организовать борьбу с корабельным пожаром до возникновения критических пожароопасных факторов и ущерба кораблю, здоровью и жизни личного состава. Технологии искусственного интеллекта являются эффективным средством решения сложных плохо формализуемых задач. К этому классу традиционно относятся задачи классификации, кластеризации, аппроксимации многомерных отображений, прогнозирования временных рядов, нелинейной фильтрации, управления сложными технологическими объектами. Анализ пожарной опасности технологических процессов, работы корабельных систем и технических средств показал, что одним из наиболее перспективных путей разрешения системного противоречия в обеспечении пожарной безопасности является использование технологий искусственного интеллекта. Необходимость разработки интеллектуальных систем обеспечения живучести на кораблях ВМФ обусловлена необходимостью повышения эффективности руководства при борьбе за живучесть в ряде аварий и катастроф. Описаны примеры влияния различных факторов на ведение борьбы за живучесть при возникновении аварий. Определена роль интеллектуальных систем обеспечения живучести в составе систем кораблей и судов. Обоснована необходимость внедрения таких систем. Разрабатываемые в настоящее время интеллектуальные системы обеспечения живучести на кораблях ВМФ призваны оказывать помощь командному составу кораблей и судов в своевременности и обоснованности принятия решений, что позволит повысить эффективность борьбы за живучесть.

Пожарная безопасность; борьба за живучесть; корабли ВМФ; интеллектуальная система живучести; онтологическая база знаний; расписывание образов; искусственные нейронные сети; искусственный интеллект; база данных; база знаний; интеллектуальная поддержка принятия решения.

I.V. Obratsov, M.G. Pantelev

SUBSTANTIATION AND DEVELOPMENT OF AN INTELLECTUAL DECISION SUPPORT SYSTEM IN THE TASKS OF ENSURING FIRE SAFETY OF NAVY SHIPS

Information about fire-hazardous situations circulating in the circuits of the control and control systems of the Navy ship and the level of artificial intelligence technologies is quite enough to develop a scientific and methodological apparatus for detecting fire-hazardous situations in ship premises, determining the location of their occurrence and fire factors, predicting the development of a fire-hazardous situation and developing a set of technological solutions using artificial intelligence to obtain sound recommendations on localization and extinguishing fires on Navy ships. This will significantly reduce the time for detecting sources of ignition, provide reliable information about the fire-hazardous situation, predict the development of a fire in the ship's premises and promptly organize the fight against a ship's fire before the occurrence of critical fire-hazardous factors and damage to the ship, the health and life of personnel. Artificial intelligence technologies are an effective means of solving complex poorly formalized tasks. This class traditionally includes the tasks of classification, clustering, approximation of multidimensional maps, time series forecasting, nonlinear filtering, and management of complex technological objects. The analysis of the fire hazard of technological processes, the operation of ship systems and technical means has shown that one of the most promising ways to resolve the systemic contradiction in ensuring fire safety is the use of artificial intelligence technologies. The need to develop intelligent survivability systems on Navy ships is due to the need to improve the effectiveness of leadership in the fight for survivability in a number of accidents and catastrophes. Examples of the influence of various factors on the conduct of the struggle for survivability in the event of accidents are described. The role of intelligent survivability systems in the systems of ships and vessels is determined. The necessity of implementing such systems is justified. The intelligent survivability systems currently being developed on Navy ships are designed to assist the command staff of ships and vessels in the timeliness and validity of decision-making, which will increase the effectiveness of the fight for survivability.

Fire safety; the struggle for survivability; Navy ships; intelligent survivability system; Schedule images artificial neural networks; ontological knowledge base; artificial intelligence; database; knowledge base; Intelligent decision support.

Введение. Исходя из анализа пожаров на кораблях и судах ВМФ, утверждается, что причинно-следственные связи в пожароопасных ситуациях, несмотря на их в целом типичный характер, в каждой пожароопасной ситуации обладают свойством уникальности. Тем не менее закономерности тактики борьбы с корабельным пожаром, основанной на требованиях и руководствах, регулярных тренировок и опыте борьбы с реальными корабельными пожарами, можно и нужно вывести через умную – интеллектуальную поддержку принятия решений по борьбе с корабельными пожарами. Поэтому путь создания системы управления борьбой за живучесть, ориентированный на интеллектуальное принятие решений, является актуальным [1].

Вместе с тем, задачи по борьбе с корабельным пожаром по своему многообразию, множеству агентов и сложности структурных взаимосвязей между ними могут оказаться недоступными для обзора (мониторинга) лицом-руководителем процесса выполнения задач (ЛПР). Фундаментальный принцип кибернетики, известный как принцип необходимого разнообразия У.Р. Эшби, состоит в том, что сложность управляющей системы должна быть не меньше сложности объекта управления. Из этого принципа следует, что интеллектуализация управления борьбой с пожаром не может быть только сведена к автоматическому выполнению алгоритмической последовательности заранее сформированного набора действий.

Поэтому возникает необходимость организации функционирования системы управления борьбой с корабельным пожаром на основе сетевого планирования, путем создания системы интеллектуальной поддержки принятия решений (СИППР) управленческой деятельности руководителя.

Система интеллектуальной поддержки принятия решений. Отличие СИППР от классических экспертных систем состоит в том, что выбор пути на дереве целей, средств и способов их достижения определяется не системой продукционных правил «если-то», заложенных в базу знаний (БЗ) экспертной системы, а самим руководителем, ЛПР.

Поддержка состоит в доступном для восприятия ЛПР мониторинге пожароопасной ситуации и процесса борьбы с корабельным пожаром, обычно воспроизводимого лишь мысленно. В результате ЛПР становится доступным во всем объеме и полноте поле управленческой деятельности по оценке обстановки, выработке замысла, принятию решения по борьбе с пожаром, организации, координации и контролю действий личного состава для его выполнения.

Отслеживание пожароопасной ситуации и процесса борьбы с корабельным пожаром с помощью табло, мнемосхем и сигнальных датчиков современных автоматизированных систем контроля и управления пожаробезопасностью на кораблях ВМФ продуктивно, но весьма непросто. Управляемая система образно представляет собой калейдоскоп взаимосвязанных операций, находящихся в различных состояниях. Эти обстоятельства диктуют необходимость оснащения перспективных систем управления подсистемой, имеющей характер и смысл «Интеллектуальной системы обеспечения живучести на кораблях ВМФ».

Ниже рассматривается основной аспект разработки этой подсистемы в плане реализации действий личного состава в соответствии со схемой на рис. 1, с применением сетевой информационной технологии.

Концептуальное, формализованное описание постановки задачи, отражающее идеологию ее формирования, может быть представлено как минимизация риска развития аварии от опасной ситуации до катастрофической.

Для осуществления управления по достижению целевого состояния «Безопасное выполнение задачи» должна подвергаться анализу вся располагаемая масса сведений о текущем состоянии корабля, истории развития пожара и возможных вариантах борьбы с пожаром.

Рассматриваются принципы и концепция построения СИППР как систем, основанных знаниях. Формулируется и развивается класс математических моделей представления знаний как мета-граф знаний с системой правил, реализующих

(формализующих) логико-детерминированный или логико-вероятностный подход в представлении набора причинно-следственных связей между классами сценариев развития нештатных пожароопасных ситуаций и стратегиями / правилами принятия управляющих решений по изменению сценариев развития ситуаций.

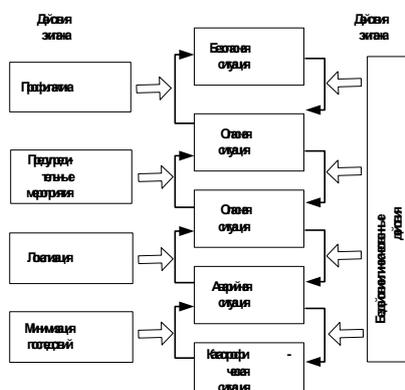


Рис. 1. Источники информации о пожароопасной ситуации

Ключевым элементом интеллектуальной системы управления становится база знаний управления [2, 3]. Знания в данном случае можно интерпретировать как систему формализации причинно-следственных связей, характеризующих взаимосвязи между изменением состояния объекта управления, и факторами, оказывающими влияние на эти состояния.

Анализ задач, решаемых СИППР обнаружения пожароопасных ситуаций и формирования плана действий. В соответствии с определенными в ТЗ [4] целью и задачами НИР СИППР должна решать три основные задачи:

1. Оценка взрывопожароопасной обстановки в корабельных помещениях.
2. Прогнозирование развития пожароопасной ситуации (ПОС).
3. Формирование плана действий по устранению ПОС и ликвидации ее последствий.

Оценка обстановки включает автоматический контроль (мониторинг) состояния корабельных помещений различного назначения на предмет взрывопожароопасной обстановки, обнаружение, локализацию и (по возможности) установление источника и причин ПОС. Особенностью систем рассматриваемого класса является сбор информации от большого количества датчиков и сенсоров различных типов, территориально распределенных по корабельным помещениям. При этом разные типы помещений отличаются потенциальными причинами возникновения пожаров. Сбор и анализ информации о состоянии корабельных помещений должны выполняться непрерывно в повседневных условиях, при обнаружении пожара и при борьбе за живучесть корабля.

Кроме того, оценка обстановки предполагает формирование, хранение и динамическое обновление в базе данных (БД) СИППР общего ситуационного контекста, включающего выполняемую в данный момент кораблем задачу, текущее состояние сил и средств.

Прогнозирование развития обнаруженной ПОС предназначено для формирования возможных будущих ситуаций на основе специализированных моделей. Важной особенностью таких моделей является определение динамики процесса развития пожара с явным представлением темпоральности, т.е. с привязкой состояния прогнозируемых процессов к моментам времени. Это, в частности, необходимо для определения запаса времени на принятие решений по ликвидации пожара и его последствий. В рамках этого времени может существовать возмож-

ность сбора дополнительной информации о ситуации, включая проведение осмотра мест распространения огня экипажем корабля. Разработка (или выбор) моделей прогнозирования является одной из важнейших задач разработки СИППР.

Интеллектуальная поддержка принятия решений при борьбе с пожарами предполагает формирование плана действий по устранению ПОС и ликвидации последствий пожара. В простых случаях решения могут содержать рекомендации по выполнению разовых действий, например по включению систем пожаротушения для локализации и ликвидации корабельного пожара. В более сложных случаях решением может быть многошаговый план, содержащий последовательность действий. Такие планы могут учитывать более широкий контекст ситуации (миссия корабля и его текущая задача, имеющиеся в данный момент силы и средства, конкретные особенности корабельных помещений, фаза развития пожара, риски распространения и т.п.) и включать организационные мероприятия по эвакуации личного состава [5].

На основе состава решаемых задач и требований к СИППР должен быть определен состав, структура и характеристики интеллектуальной системы обеспечения пожарной безопасности корабля (СИППР ОПБК).

На этапе НИР целесообразно анализировать две категории требований к СИППР:

- ◆ функциональные требования;
- ◆ требования к архитектуре СИППР.

Функциональные требования определяются составом и содержанием основных задач СИППР, предполагают уточнение требований к моделям и методам их решения, т.е. к математическому обеспечению системы. На основе этих требований на последующих этапах уточняются требования к алгоритмическому и программному обеспечению.

Функциональные требования к СИППР определяются необходимостью решения и содержанием трех рассмотренных выше базовых задач – оценки обстановки, прогнозирования развития событий и формирования плана действий.

Основными требованиями в части оценки обстановки являются:

- ◆ полнота входной информации;
- ◆ своевременность – все существенные события, свидетельствующие о наличии ПОС, должны обнаруживаться своевременно для идентификации этой ситуации и оперативного принятия решений.

Полнота поступающей на вход СИППР от всех источников (датчиков, сенсоров, личного состава) первичной информации понимается как ее достаточность для оперативной (своевременной) оценки ситуации и принятия адекватного решения [6]. Требование полноты исходных данных должно обеспечиваться составом и размещением источников первичной информации, и организацией ввода данных в систему. На данном этапе можно считать, что данное требование обеспечивается на этапе проектирования корабля при размещении систем пожарной безопасности в различных корабельных помещениях.

Своевременность предполагает обнаружение всех событий, существенных для идентификации ПОС, настолько быстро, чтобы осталось достаточное время для адекватной оценки ситуации. Модель, используемая для оценки ситуации, в свою очередь, должна оставлять время для прогнозирования и принятия адекватного решения. Требование своевременности, таким образом, декомпозируется на требование к времени сбора первичной информации и к времени комплексной оценки ситуации на основе всей совокупности исходных данных. Последнее определяется особенностями модели оценки ситуации.

Основными требованиями в части моделей и методов решения задачи прогнозирования являются:

- ◆ адекватность моделей прогнозирования;
- ◆ минимизация время решения задачи.

Адекватность модели прогнозирования означает, что она определяет возможные последствия наблюдаемой аварийной ситуации с достоверностью и точностью, позволяющими в заданное время принять адекватные решения по ее устранению.

Динамика развития пожара на корабле в общем случае может варьироваться в зависимости от множества факторов, которые должны учитываться в модели. Возможные последствия наблюдаемых событий должны определяться с привязкой к временной шкале, при этом модель должна формировать оценки тяжести последствий (ущерба) с привязкой к различным моментам времени.

Модель прогнозирования должна позволять решать задачу в опережающем масштабе времени, чтобы оставалось достаточное время для принятия решения (формирования плана действий) его практической реализации до момента наступления критических событий (неприемлемого ущерба).

Поскольку сложность моделей прогнозирования может варьироваться в широких пределах, при разработке (выборе) модели необходим разумный компромисс между ее сложностью и временем решения задачи. Таким образом, модель прогнозирования должна быть достаточно простой, чтобы обеспечивать решение задачи в опережающем масштабе времени и оставлять время для оперативного принятия решения и его реализации.

В части моделей и методов решения задачи планирования действий основными требованиями также являются адекватность и своевременность формирования планов. Планирование должно выполняться с учетом общего ситуационного контекста (оперативной обстановки), включающего текущую задачу, выполняемую кораблем в рамках заданной миссии, его местонахождение (у пирса, в своих или чужих территориальных водах и т.п.) и положение (для ПЛ – в надводном или подводном состоянии), состояние собственных сил и средств и т.п.

Существует два базовых подхода к решению задачи планирования действий является одной из классических в теории ИИ:

- ◆ формирование плана по реактивному принципу;
- ◆ использование методов планирования, основанных на делиберативных архитектурах.

Уточнение требований к моделям и методам планирования возможно на основе детального анализа особенностей проблемной области [7].

Основными требованиями к архитектуре СИППР являются: универсальность и открытость.

Универсальность предполагает возможность использования общей архитектуры (путем ее настройки и адаптации) для построения СИППР разных типов (ПЛ, НК), классов и видов кораблей.

Открытость предполагает возможность достаточно просто расширять (наращивать) функциональные возможности СИППР в рамках ее базовой архитектуры без (существенной) доработки программного обеспечения. Реализация данного требования имеет два аспекта:

- ◆ модульность построения программной архитектуры – возможность добавления новых модулей решения базовых задач (например, прогнозирования), на уровне программных библиотек;
- ◆ использование интерпретируемых БЗ – возможность расширять функциональные возможности СИППР путем пополнения (модификации) знаний в БЗ без доработки ПО.

Важным классом требований к данному классу систем являются также эргономические требования к интерфейсу пользователя: содержанию и форме выводимой информации (в том числе, в многомодальном режиме). Такие требования подлежат уточнению на основе сложившейся практики построения корабельных информационных систем.

Общие принципы построения СИППР определяются на основе анализа особенностей проблемной области. Проблемная область рассматривается как совокупность предметной области и множества решаемых в ней задач. Предметная область описывается совокупностью сущностей, их свойств и отношений между ними. Модель предметной области фиксирует декларативные знания, необходимые пользователю СИППР для решения соответствующего класса задач.

Множество задач, которые должна решать (поддерживать решение) СИППР в данной проблемной области, характеризуется методами их решения. При этом для одной и той же задачи в общем случае может существовать несколько методов ее решения (аналитических, логических, эвристических, имитационных), которые могут существенно отличаться вычислительной сложностью (и, следовательно, временем решения) и степенью точности (достоверности) получаемых результатов.

К особенностям рассматриваемой проблемной области относятся:

- ◆ разнообразие классов и подклассов кораблей;
- ◆ разнообразие типов источников первичной информации о ПОС (датчиков, сенсоров);
- ◆ распределенность их размещения на объектах (в корабельных помещениях) и необходимость интеграции (комплексирования) данных от различных источников для оценки обстановки;
- ◆ разнообразие средств пожаротушения и их размещения в корабельных помещениях;
- ◆ широкий спектр возможных ПОС;
- ◆ возможность решения задач оценки обстановки, прогнозирования и планирования действий с использованием различных методов.

С учетом отмеченных особенностей, базовых задач и требований можно определить общие принципы построения СИППР:

1. Унификация архитектуры. Целесообразно использовать обобщенную базовую архитектуру, позволяющую с единых позиций проектировать СИППР для различных классов/подклассов кораблей. Реализация подхода на основе унифицированной архитектуры СИППР предполагает ее адаптивность, т.е. возможность ее профилирования (адаптации) под особенности конкретного объекта – НК или ПЛ разных классов. Адаптация должна выполняться на уровне содержимого БД и БЗ, без доработки (по возможности) программного кода системы. Особенности типов кораблей разных классов (а, при необходимости, и конкретного корабля), включая состав и планировку корабельных помещений, размещение в них датчиков, средств пожаротушения и т.д. должно явно фиксироваться в модели, хранимой в БЗ.

2. Открытость – способность расширения функционала СИППР при:

- ◆ появлении новых типов источников первичной информации;
- ◆ появлении новых типов средств борьбы с пожарами;
- ◆ разработке новых методов решения задач оценки обстановки, прогнозирования и планирования действий;
- ◆ создании кораблей новых проектов;

Открытость системы имеет два аспекта:

- ◆ Модульность – возможность добавления в унифицированный архитектурный фреймворк новых программных модулей (программных библиотек), реализующих различные формальные модели и методы решения базовых задач.

- ◆ Пополняемость БЗ.

Эффективная реализация принципа открытости возможна при использовании онтологического подхода, т.е. представления знаний с использованием моделей и языков онтологий.

Решение задач оценки обстановки, прогнозирования и планирования действий в ПОС предполагает разработку и/или выбор соответствующих моделей и методов. При этом для решения разных задач должны использоваться разные модели и методы, т.е. СИППР должна строиться как гибридная система.

В практике построения СИППР в общем случае используются следующие основные классы моделей:

- ◆ традиционные аналитические модели теории принятия решений;
- ◆ логические модели, основанные на разных классах формальных логик;
- ◆ эвристические модели, основанные на экспертных знаниях.

При рассмотрении моделей и методов ИИ выделяют два основных направления:

1. Использование искусственных нейронных сетей (ИНС) и методов машинного обучения.

2. Использование явных символьных моделей знаний.

Нейросетевая парадигма систем ИИ получила в последние годы широкое распространение вследствие динамичного развития методов машинного обучения (в том числе, глубокого) и соответствующих программно-аппаратных средств. Наиболее известным применением нейросетевого подхода в последние годы являются большие языковые модели (*Large Language Models, LLM*), реализованные в виде «чат-ботов», обученных на очень больших корпусах текстов. Другим классом задач, в которых традиционно применяются ИНС является распознавание образов, в частности в системах технического зрения.

В рассматриваемом классе систем СИППР нейросетевой подход может быть использован на этапе оценки обстановки, в частности, для обнаружения и распознавания событий и ПОС (например, дыма или пламени) на основе поступающих с видеокамер данных (видеопотока). Возможность эффективного применения данного подхода в значительной степени определяется наличием достаточного количества обучающих данных (датасетов). Вместе с тем, в задачах, где отсутствует достаточное количество представительных и надежных обучающих данных, эффективность применения нейросетевого подхода существенно снижается.

Кроме того, эффективность ИНС при построении систем поддержки принятия оперативных решений, существенно ограничивается проблемами с объяснимостью и верифицируемостью получаемых результатов. В последние годы работы в направлении объяснимости нейросетевых моделей ведутся достаточно активно. Однако уровень достигнутых в настоящее время в этом направлении результатов не позволяет в полной мере обеспечить реализацию требования объяснимости решений, предъявляемого в критических (в частности, военных) приложениях СИППР.

Для решения задачи определения причины пожара в качестве формальных моделей могут использоваться диаграммы отношений, представленные ориентированными графами. Такой подход рассмотрен в [17] для анализа причин пожаров на торговых и рыболовных судах.

ПОС могут обнаруживаться и идентифицироваться на основе зафиксированной последовательности срабатывания датчиков разных типов, установленных в корабельном помещении. Основными типами датчиков, используемых в корабельных системах пожарной сигнализации, являются датчики дыма (оптической плотности) и температуры.

Модель представления знаний для обнаружения и идентификации ПОС на основе срабатывания данного типа датчиков при таком подходе может быть представлена в общем виде в форме продукционных правил вида:

«Если (Датчик $_i$, Событие $_1$, Время t_1) &

(Датчик $_i$, Событие $_2$, Время Δt_2) &

...

(Датчик $_j$, Событие $_M$, Время Δt_N)

то (Пожар в помещении R)»,

где Датчик i – идентификатор конкретного датчика; Событие k – событие, зафиксированное соответствующим датчиком в определенный момент времени; $t1$ – время первого события, запускающего процесс анализа ПОС; Δt_n – интервал времени от начального события до текущего.

В более сложном случае правила могут анализировать события от датчиков, установленных в смежных помещениях.

Конкретные правила на основе данного шаблона должны формироваться с учетом параметров конкретного корабельного помещения, мест установки датчиков разных типов и т.п. Такие знания целесообразно хранить в онтологической базе знаний, представленной на языке *OWL* [18]. Правила целесообразно представлять на языке *SWRL* [19], совместимым с языком *OWL*.

Язык описания онтологий *OWL (Web Ontology Language)* позволяет описывать классы, свойства и индивидуумы. С 2004 г. является официальной рекомендацией консорциума *W3C* и широко поддерживается разработчиками ПО.

Следующие ключевые понятия *OWL* унаследовал от *RDF Schema*.

Онтологический подход к построению подсистем оценки обстановки в сложных киберфизических (в том числе многоагентных) системах рассмотрен в работах [18–20].

Графы знаний [20]. При рассмотрении моделей и языков представления знаний особняком стоят графы знаний (ГЗ). Граф знаний представляет собой набор взаимосвязанных описаний сущностей – объектов реального мира, событий, ситуаций или абстрактных концепций, в котором:

- ◆ описания имеют формальную структуру, которая позволяет как людям, так и компьютерам обрабатывать их эффективным и недвусмысленным образом;

- ◆ описания объектов дополняют друг друга, образуя сеть, в которой каждый объект представляет собой часть описания связанных с ним объектов.

Графы знаний интегрируют в себе характеристики нескольких парадигм управления данными и могут рассматриваться как:

- ◆ графы, поскольку их можно анализировать как любую другую графовую структуру данных;

- ◆ БД, поскольку данные могут запрашиваться с помощью структурированных запросов;

- ◆ БЗ, поскольку данные в ней имеют формальную семантику, которая может использоваться для интерпретации данных и вывода новых фактов.

Когда для выражения и интерпретации данных в ГЗ используется формальная семантика, обычно рассматриваются следующие концепции представления и моделирования знаний:

Классы. Описание сущности содержит классификацию сущности относительно иерархии классов. Например, при работе с общими новостями или деловой информацией могут быть классы *Person*, *Organization* и *Location*. У лиц и организаций может быть общий агент суперкласса. Местоположение обычно имеет множество подклассов, например Страна, Населенный пункт, Город и т.д. Понятие класса заимствовано из объектно-ориентированного проектирования, в котором каждая сущность должна принадлежать ровно к одному классу.

Типы отношений. Отношения между сущностями обычно помечаются типами, которые предоставляют информацию о природе отношения, например друг, родственник, конкурент и т.д. Типы отношений также могут иметь формальные определения, например, что *parent-of* является обратным отношением *child-of*, они оба являются частными случаями *relative-of*, которое является симметричным отношением. Отношения субрегиона и дочерней компании могут быть определены как транзитивные.

Категория. Сущность может быть связана с категориями, которые описывают некоторые аспекты ее семантики, например «Консультанты большой четверки» или «композиторы XIX века». Книга может принадлежать одновременно ко всем

этим категориям: «Книги об Африке», «Бестселлеры», «Книги итальянских авторов», «Книги для детей» и т.д. Категории, как правило, описываются и упорядочиваются по таксономии.

Выводы. Внедрение в алгоритмическое обеспечение корабельных информационных систем соответствующих моделей и алгоритмов интеллектуального принятия решений при контроле пожарной опасности позволит существенно повысить эффективность принимаемых решений при обеспечении пожарной безопасности кораблей ВМФ.

Для реализации интеллектуального подхода в обеспечении живучести выполняется поисковая научно-исследовательская работа: «Поиск и исследование методов и технологий искусственного интеллекта для применения в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей» с выполнением фундаментальных задач направлена на повышение эффективности обеспечения пожарной безопасности кораблей (судов обеспечения) и подводных лодок ВМФ. Работа включена в научный план Вооруженных сил Российской Федерации на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов. Цель работы – обосновать методы и технические решения для обеспечения интеллектуального контроля пожарной опасности в корабельных помещениях различного назначения. Заказчиками НИР выступают Управление развития технологий искусственного интеллекта Министерства обороны Российской Федерации и Морской научный комитет Военно-Морского Флота. Головной исполнитель: Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия».

Впервые проводится работа по теоретическому обоснованию методов и технологий, позволяющих интеллектуализировать процесс контроля пожарной безопасности в корабельных помещениях. По результатам выполнения НИР будет принято решение о целесообразности внедрения функций интеллектуальной поддержки в системы обеспечения живучести кораблей (судов обеспечения) и подводных лодок ВМФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Поленин В.И., Сухачев Ю.А.* Сетевая система информационной автоматизированной поддержки управлением борьбой за живучесть морского судна // Морская радиоэлектроника. – 2016. – № 3 (64).
2. *Поленин В.И., Киваев Н.М., Сухачев Ю.А.* Создание интегрированных систем боевого управления – высшая стадия комплексирования // Морская радиоэлектроника. – 2014. – № 2 (48). – С. 44-49.
3. *Можяев А.С., Поленин В.И.* Сетевое планирование и управление – перспективный путь создания интегрированных систем боевого управления // Сб. трудов 12-й Международной научной школы "Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах". – СПб., 2014;
4. *Образцов И.В., Петров С.А., Кулинь В.Ф., Пахомов Е.С. и др.* Промежуточный отчет о научно-исследовательской работе «Поиск и исследование методов и технологий искусственного интеллекта для применения в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей» (шифр «Триумф-25»). 1 этап, ВИ ДПО ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». УДК 623.8/9. – СПб., 2023.
5. *Образцов И.В.* Применение технологий искусственного интеллекта в системах обеспечения пожарной безопасности кораблей ВМФ // Сб. статей по результату круглого стола на тему: «Теория и практика применения искусственного интеллекта в военной сфере» МВТФ «Армия-2022». – Серпухов, 2022.
6. *Образцов И.В.* Прогнозирование корабельных пожароопасных ситуаций с использованием искусственной нейронной сети // Сб. материалов научно-практического семинара «Проблемы ПВО (ВКО) перспективных надводных кораблей». – СПб., 2022.
7. *Образцов И.В.* Перспективы разработки и внедрения интеллектуальной поддержки принятия решений по борьбе за живучесть кораблей ВМФ // Сб. материалов по итогу научно-технического семинара «Информационная поддержка процессов эксплуатации комплексов военного назначения» ЯВВУ ПВО. – Ярославль, 2023.

8. Semantic Sensor Network Ontology. W3C Recommendation 19 October 2017. – <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>.
9. SSN ontology. – <http://www.w3.org/ns/ssn/>.
10. Руководство по обеспечению живучести надводных кораблей. – М.: Воениздат, 2017.
11. Руководство по обеспечению живучести подводных кораблей (РОЖ ПЛ-2017).
12. Руководство по обеспечению живучести ремонтируемого корабля (РОЖ РК-2017).
13. Правила и программы подготовки подводных лодок ВМФ (ПБЖ ПЛ-2018).
14. Корабельный устав ВМФ (КУ ВМФ-2021).
15. Требования ВМФ к системам информационной поддержки по борьбе за живучесть подводной лодки. Д-5539. – СПб.: НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ, 2013.
16. *Никитин Е.В.* Некоторые проблемы обеспечения живучести кораблей и судов ВМФ // Военная мысль. – 2016.
17. *Kwiecińska B.* Cause-and-effect analysis of ship fires using relations diagrams // Scientific Journals Zeszyty Naukowe of the Maritime University of Szczecin. – 44 (116). – P. 187-191.
18. *Пантелеев М.Г., Лебедев С.В.* Онтологическое проектирование подсистемы оценки обстановки интеллектуальных агентов // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6, № 3(21). – С. 297-316.
19. *Lebedev S., Panteleyev M.* Ontology-Driven Situation Assessment System Design and Development in IoT Domains // International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS). – 2017. – Vol. 8, No. 1. – P. 1-17.
20. *Panteleyev M.G., Lebedev S.V.* Ontology-Driven Design and Development of Situation Assessment Software in Cyber-Physical Systems // In «Tools and Technologies for the Development of Cyber-Physical Systems». – IGI Global, 2020. – P. 51-76.

REFERENCES

1. *Polenin V.I., Sukhachev Yu.A.* Setevaya sistema informatsionnoy avtomatizirovannoy podderzhki upravleniem bor'boy za zhivuchest' morskogo sudna [Network system of information automated support for the management of the struggle for the survivability of a marine vessel], *Morskaya radioelektronika* [Marine Radio Electronics], 2016, No. 3 (64).
2. *Polenin V.I., Kivaev N.M., Sukhachev Yu.A.* Sozdanie integrirovannykh sistem boevogo upravleniya – vysshaya stadiya kompleksirovaniya [Creation of integrated combat control systems is the highest stage of integration], *Morskaya radioelektronika* [Marine Radio Electronics], 2014, No. 2 (48), pp. 44-49.
3. *Mozhaev A.S., Polenin V.I.* Setevoe planirovanie i upravlenie – perspektivnyy put' sozdaniya integrirovannykh sistem boevogo upravleniya [Network planning and management – a promising way to create integrated combat control systems], *Sb. trudov 12-y Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly "Modelirovanie i analiz bezopasnosti i riska v slozhnykh sistemakh"* [Proceedings of the 12th International Scientific School "Modeling and analysis of security and risks in complex systems"]. Saint Petersburg, 2014;
4. *Obraztsov I.V., Petrov S.A., Kulit' V.F., Pakhomov E.S. i dr.* Promezhutochnyy otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Poisk i issledovanie metodov i tekhnologiy iskusstvennogo intellekta dlya primeneniya v sistemakh obespecheniya pozharnoy bezopasnosti korabley» (shifr «Triumf-25»). 1 etap, VI DPO VUNTS VMF «Voенно-morskaya akademiya». UDK 623.8/9 [Interim report on the research work "Search and research of artificial intelligence methods and technologies for use in ship fire safety systems" (code "Triumph-25"). Stage 1, VI DPO VUNTS of the Navy "Naval Academy". UDC 623.8/9]. Saint Petersburg, 2023.
5. *Obraztsov I.V.* Primenenie tekhnologiy iskusstvennogo intellekta v sistemakh obespecheniya pozharnoy bezopasnosti korabley VMF [Application of artificial intelligence technologies in fire safety systems for Navy ships], *Sb. statey po re ul'tatu kruglogo stola na temu: «Teoriya i praktika primeneniya iskusstvennogo intellekta v voennoy sfere» MVTF «Armiya-2022»* [A collection of articles on the results of the round table on the topic: "Theory and practice of the use of artificial intelligence in the military sphere" MVTF "Army-2022"]. Serpukhov, 2022.
6. *Obraztsov I.V.* Prognozirovanie korabel'nykh pozharoопасnykh situatsiy s ispol'zovaniem iskusstvennoy neyronnoy seti [Forecasting of shipboard fire-hazardous situations using an artificial neural network], *Sb. materialov nauchno-prakticheskogo seminara «Problemy PVO (VKO) perspektivnykh nadvodnykh korabley»* [Collection of materials of the scientific and practical seminar "Problems of air defense (East Kazakhstan region) of promising surface ships"]. Saint Petersburg, 2022.

7. *Obraztsov I.V.* Perspektivy razrabotki i vnedreniya intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy po bor'be za zhivuchest' korably VMF [Prospects for the development and implementation of intellectual decision-making support for the fight for the survivability of Navy ships], *Sb. materialov po itogu nauchno-tekhnicheskogo seminara «Informatsionnaya podder hka protsessov ekspluatatsii kompleksov voennogo na nacheniya» YaVVU PVO* [Collection of materials on the results of the scientific and technical seminar "Information support for the operation of military complexes" YaVVU Air Defense]. Yaroslavl', 2023.
8. Semantic Sensor Network Ontology. W3C Recommendation 19 October 2017. Available at: <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>.
9. SSN ontology. Available at: <http://www.w3.org/ns/ssn/>.
10. Rukovodstvo po obespecheniyu zhivuchesti nadvodnykh korably [Guidelines for ensuring the survivability of surface ships]. Moscow: Voenizdat, 2017.
11. Rukovodstvo po obespechenii zhivuchesti podvodnykh korably (ROZH PL-2017) [Guidelines for ensuring the survivability of submarines (ROJ PL-2017)].
12. Rukovodstvo po obespecheniyu zhivuchesti remontiruemogo korablya (ROZH RK-2017) [Guidelines for ensuring the survivability of the repaired ship (ROJ RK-2017)].
13. Pravila i programmy podgotovki podvodnykh lodok VMF (PBZH PL-2018) [Rules and training programs for Navy submarines (PBJ PL-2018)].
14. Korabel'nyy ustav VMF (KU VMF-2021) [Naval Ship Charter (Navy Code-2021)].
15. Trebovaniya VMF k sistemam informatsionnoy podderzhki po bor'be za zhivuchest' podvodnoy lodki. D-5539 [Requirements of the Navy for information support systems to combat the survivability of a submarine. D-5539]. Saint Petersburg: NII korablestroeniya i vooruzheniya VMF, 2013.
16. *Nikitin E.V.* Nekotorye problemy obespecheniya zhivuchesti korably i sudov VMF [Some problems of ensuring the survivability of ships and vessels of the Navy], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2016.
17. *Kwiecińska B.* Cause-and-effect analysis of ship fires using relations diagrams, *Scientific Journals Zeszyty Naukowe of the Maritime University of Szczecin*, 44 (116), pp. 187-191.
18. *Panteleev M.G., Lebedev S.V.* Ontologicheskoe proektirovanie podsistemy otsenki obstanovki intellektual'nykh agentov [Ontology-Driven Approach to Design of Situation Awareness Subsystem of Intelligent Agents], *Ontologiya proektirovaniya* [Ontology of Designing], 2016, Vol. 6, No. 3 (21), pp. 297-316.
19. *Lebedev S., Panteleyev M.* Ontology-Driven Situation Assessment System Design and Development in IoT Domains, *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS)*, 2017, Vol. 8, No. 1, pp. 1-17.
20. *Panteleyev M.G., Lebedev S.V.* Ontology-Driven Design and Development of Situation Assessment Software in Cyber-Physical Systems, In *«Tools and Technologies for the Development of Cyber-Physical Systems»*. IGI Global, 2020, pp. 51-76.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.А. Петров.

Образцов Иван Викторович – ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»; e-mail: lion-jan@ya.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89119293044; к.т.н.; докторант.

Пантелеев Михаил Георгиевич – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»; e-mail: panteleev.mihail@nicetu.spb.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89213128928; к.т.н.; доцент; преподаватель кафедры вычислительной техники.

Obraztsov Ivan Viktorovich – VUNC Navy "Naval Academy"; e-mail: lion-jan@ya.ru; St. Petersburg,, Russia; phone: +79119293044; cand. of eng. sc.; doctoral student.

Panteleev Mikhail Georgievich – St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"; e-mail: panteleev.mihail@nicetu.spb.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79213128928; cand. of eng. sc.; associate professor; lecturer of the department of computer engineering.

Ф.А. Хуссейн, В.А. Костюков, И.Д. Евдокимов

**МЕТОД РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ МУЛЬТИ-КОММИВОЯЖЁРА В СРЕДЕ
БЕЗ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ОСНОВЕ УМЕНЬШЕНИЯ РАЗМЕРА
ПРОСТРАНСТВА РЕШЕНИЙ**

Проводится анализ проблемы мульти коммивояжера, которая в отличие от знаменитой задачи коммивояжера, задействует несколько коммивояжеров, которые посещают заданное количество городов ровно один раз и возвращаются в исходное положение с минимальными затратами на поездку. Задача мульти коммивояжера является важной для области оптимизации маршрутов и распределения назначений между несколькими агентами. Основной целью исследования является разработка эффективного метода решения данной проблемы, который позволит сократить время выполнения задач и оптимизировать использование ресурсов. В ходе исследования был создан инновационный метод, основанный на уменьшении размерности пространства решений. Этот метод позволяет более эффективно управлять нагрузкой и ресурсами, что в свою очередь способствует минимизации общего времени выполнения задач. Особенностью метода является его универсальность и применимость в различных сценариях, включая ситуации с разным количеством задач и коммивояжеров. Такой подход обеспечивает более широкий охват и позволяет оценить применимость метода в различных контекстах, что является важным преимуществом данного исследования. Для оценки эффективности разработанного метода было проведено сравнительное исследование с использованием классического метода решения проблемы мульти коммивояжера. Оценка результатов осуществлялась на основе трех ключевых критериев: вычислительного времени получения решения задачи мульти коммивояжера, суммарной длины пройденных маршрутов коммивояжерами и максимальной длины маршрута среди них. Анализ экспериментальных данных показал, что разработанный метод значительно превосходит классический подход по всем рассматриваемым критериям в большинстве экспериментов, так как при использовании предложенного метода среднее время расчета для задачи мульти коммивояжера уменьшается на 56% по сравнению с наилучшим известным классическим результатом, при этом средняя сумма длины пройденных маршрутов коммивояжерами соответственно уменьшается на 12% и максимальная длина пути среди пройденных агентами маршрутов (дисбаланс нагрузки) уменьшается на 8%, что подтверждает высокую эффективность предложенного метода и перспективность для практического применения в различных сферах, где требуется оптимизация маршрутов и распределения задач между несколькими исполнителями.

Задача мульти коммивояжера; распределение задач; целераспределение; мультиагентные системы; централизованное управление; групповое управление.

F.A. Houssein, V.A. Kostyukov, I. D. Evdokimov

**A METHOD FOR SOLVING THE MULTI-TRAVELING SALESMAN
PROBLEM IN AN ENVIRONMENT WITHOUT OBSTACLES BASED ON
REDUCING THE SIZE OF THE SOLUTION SPACE**

This research paper analyzes the multi traveling salesman problem, which, unlike the famous traveling salesman problem, involves several traveling salesmen who visit a given number of cities exactly once and return to their original position with minimal travel costs. The multi-traveling salesman problem is an important problem in the field of route optimization and task distribution among multiple agents. The main goal of the study is to develop an effective method for solving this problem, which will reduce task completion time and optimize the use of resources. During the study, an innovative method was created based on reducing the dimension of the solution space. This method allows you to more efficiently manage workload and resources, which in turn helps to minimize the overall execution time of tasks. A special feature of the method is its versatility and applicability in various scenarios, including situations with different numbers of tasks and traveling salespeople. This approach provides broader coverage and allows the applicability of the method to be assessed in different contexts, which is an important strength of this study. To evaluate the effectiveness of the developed method, a comparative

study was conducted using the classical method for solving the multi-traveling salesman problem. The results were evaluated based on three key criteria: the calculation time for solving the multi-traveling salesman problem, the total length of the routes traveled by the traveling salesmen, and the maximum route length among them. Analysis of experimental data showed that the developed method significantly exceeds the classical approach in all considered criteria in most experiments, since when using the proposed method, the average time for calculating a solution to the multi-traveling salesman problem is reduced by 56%, while the average sum of the lengths of routes traveled by traveling salesmen is reduced by 12%. In addition, the maximum path length among the routes traveled by agents (load imbalance) is reduced by 8%, which confirms the high efficiency of the proposed method and its promise for practical application in various fields where optimization of routes and distribution of tasks among several executors is required.

Multi traveling salesman problem; task allocation; multi-agent systems; centralized control; group control.

Введение. Задача коммивояжера (Travelling Salesman Problem, TSP) – классическая NP-трудная задача комбинаторной оптимизации [1], определяется следующим образом. При наличии списка городов и расстояний между каждой парой городов, каков кратчайший возможный маршрут, позволяющий посетить каждый город ровно один раз и возвратиться в исходный город.

В отличие от задачи коммивояжера, которая в последние годы широко исследуется, задача мульти-коммивояжеров (Multiple Travelling Salesmen Problem, MTSP) не так привлекательна и интенсивно изучается, где задействовано несколько коммивояжеров, которые посещают заданное количество городов ровно один раз и возвращаются в исходное положение с минимальными затратами на поездку. MTSP тесно связана с другими проблемами оптимизации, такими как проблема маршрутизации транспортных средств (Vehicle Routing Problem, VRP) [2] и проблема назначения задач [3]. Действительно, MTSP представляет собой смягчение VRP, не учитывающее ни вместимость транспортного средства, ни требования клиентов. Однако MTSP можно использовать для моделирования многих реальных приложений. Например, такие проблемы, как производство/распространение газет [4, 5], планирование горячей прокатки [6, 7], планирование работы причальных кранов [8], военные поисково-спасательные операции [9] – во всех этих примерах решалась задача MTSP. MTSP является NP-полным [10], следовательно, поиск подходящих оптимальных методов и разработка эффективных алгоритмов для решения MTSP имеет большое практическое значение.

MTSP имеет несколько разных вариантов, в зависимости от характеристик депо:

- ◆ Одно депо или несколько депо: в стандартной версии MTSP следует учитывать только одно депо, и его положение фиксировано. Поскольку задействовано несколько коммивояжеров, наличие нескольких складов может оптимизировать стоимость туров. В таком варианте MTSP коммивояжеры могут начать свой обход с одного склада и закончить в другом складе.

- ◆ Фиксированное и мобильное депо: как правило, в MTSP депо является фиксированным. Однако в некоторых приложениях депо также может быть мобильным. Например, мобильное депо может представлять собой грузовик, из которого БПЛА начинают и заканчивают свои полеты.

- ◆ Закрытый и открытый путь: в классическом MTSP путь продавца закрыт, поскольку ему приходится начинать и заканчивать свой обход с/на одном и том же складе. Однако в некоторых приложениях продавцу не нужно возвращаться на склад, и он может оставаться в последнем посещенном городе. Более того, если рассматривается несколько складов, продавец может присоединиться к любому из существующих складов, которые могут отличаться от его первоначального склада.

В зависимости от целевой функции различают следующие разновидности MTSP:

♦ **MinSum MTSP:** в этом варианте MTSP целевая функция заключается в минимизации суммы затрат на поездку всех роботов. Формально вариант MinSum моделируется как:

$$\min_{Tour_i \in TOURS} (\sum_{i=1}^m C(Tour_i)), \quad (1)$$

при условии : $Tour_i \cap Tour_j = \emptyset, \forall i \neq j, i \leq 1, j \leq m$,

где i, j – номер коммивояжера, $Tour_i$ – путь коммивояжера i , m – количество коммивояжеров задачи, TOURS – совокупность всех возможных туров. $C(.)$ – функционал качества (длина тура).

♦ **MinMax MTSP:** в этом варианте целевая функция есть стоимость самого длительного тура (например, с точки зрения расстояния или времени) среди всех туров коммивояжеров. Эта случай широко используется в исследованиях, посвященных, например, сокращению времени выполнения миссии. Формально говоря, этот вариант моделируется так:

$$\min_{Tour_i \in TOURS} (\max_{j \in 1..m} C(Tour_j)), \quad (2)$$

при условии : $Tour_i \cap Tour_j = \emptyset, \forall i \neq j, i \leq 1, j \leq m$,

♦ **MinSum & MinMax (многоцелевая) MTSP:** в этом варианте целевая функция состоит из двух предыдущих функционалов качества.

В данной статье будет решаться MTSP с одним фиксированным депо, с закрытым путём в среде без препятствий. Функционал качества будет выбран как MinSum/MinMax. Задачи, выполняемые группой беспилотных летательных аппаратов, могут играть роль практического применения разрабатываемого нами алгоритма семейства MTSP.

Обзор публикаций. В последние годы интеллектуальные вычислительные технологии привлекают все большее внимание исследователей. Большинство этих технологий основаны на природных явлениях и пытаются использовать достоинства элементов поведения живых существ на разных иерархических уровнях их организации.

Харрат и др. [11] предложили гибридный алгоритм AC2OptGA для решения MTSP. В алгоритме использовались генетический (Genetic Algorithm, GA) и муравьиный алгоритм. Алгоритм муравьиной колонии использовался для генерации решений, а GA использовался для улучшения полученных решений. Гомес и др. [12] реализовали GA в задаче выбора маршрута транспортного средства (VRP). Цель заключалась в оптимизации ежедневных маршрутов для работников, назначенных на раздачу некоторой продукции для компании, расположенной в городе (Ковильян, Португалия). Основная цель здесь заключалась в том, чтобы минимизировать стоимость и расстояние вместо того, чтобы сбалансировать туры.

Акбай и Калайчи [13] предложили решение, основанное на алгоритме поиска перемешанных окрестностей, для решения задачи MTSP со сбалансированной стоимостью. Для получения результатов вычислений они использовали двадцать два набора данных, включая малые, средние и крупномасштабные экземпляры. Муньос-Эррера и Сучан [14] сосредоточили свои исследования на анализе фитнес-ландшафта (FLA) для задачи мульти-коммивояжеров и емкостного VRP (CVRP). Они предложили новую меру FLA, которая предоставила ценную информацию для характеристики структуры фитнес-ландшафта в конкретных сценариях и получила несколько взаимосвязей между структурой фитнес-ландшафта и производительностью алгоритмов. Сюй и Чжан [15] реализовали гибридный алгоритм сбалансированного MTSP, основанный на генетических алгоритмах и методе локального поиска (two-opt). Хуфи и др. [16] провели обзор существующей литературы, посвященной задачам оптимизации траектории БПЛА (беспилотных летательных аппаратов), связанным с двумя существующими общими классическими задачами: задачей коммивояжера и задачей выбора маршрута

транспортного средства. Они предоставили синтетический обзор методов решения и показателей производительности и получили числовые результаты. Перейра и др. [17] реализовали гибридный алгоритм GABC-LS для решения минимального MTSP на основе генетического алгоритма, пчелиного алгоритма и двух методов локального поиска (move1-inside и two-opt).

Методика решения задач, основанная на поведении муравьев при поиске путей от гнезда к источникам пищи (оптимизация колонии муравьев – ACO), приобрела особое значение благодаря своим успешным результатам при применении к задачам оптимизации [18, 19]. Исходный ACO претерпел несколько модификаций, чтобы адаптировать его к различным реальным задачам, таким как задачи назначения, раскраска графов, планирование, проектирование схем, сети связи, биоинформатика, маршрутизация транспортных средств и т. д. С тех пор было создано несколько расширений ACO, такие, как элитарная AS [20], Ant-Q [21], Ant Colony System [22], ранговая AS [23], популяционная ACO [24], Beam-ACO [25] и т. д. Позже Алгоритм ACO был объединен с другими алгоритмами для создания гибридных методов и получения лучших результатов. Некоторые примеры гибридных методов с использованием ACO можно найти в работах [26–29].

Основы задачи мульти коммивояжеров. Одной из самых известных классических комбинаторных задач является задача коммивояжера (Travelling salesman problem) (далее TSP). Целью этой задачи является минимизация значения – обычно расстояния – при определении последовательности городов, каждый из которых посещается агентом ровно один раз, а затем агент возвращается в начальный город. Задача мульти коммивояжеров (MTSP) отличается от TSP тем, что в место одного коммивояжера их несколько, и каждый город должен посещаться только один раз, только одним коммивояжером и при этом коммивояжеры должны вернуться в начальный город, откуда они начали свой тур, минимизировав сумму расстояний пройденных путей, или максимального по длине пути среди всех коммивояжеров.

Для описания задачи вводят граф $G = (V, E)$ с множеством вершин V , соединенных ребрами E , где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ и $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$. На этом графе вершины представляют города, а ребра – дороги или возможные пути, ведущие из одного города в другой, с соответствующим значением стоимости. Самый простой способ решить TSP – попробовать все возможности, используя исчерпывающие методы, но, когда количество ребер растет, эти методы становятся слишком трудоемкими и вычислительно затратными.

Ввиду временной сложности TSP, когда количество городов становится большим, для решения задачи используются эвристические и мета-эвристические методы. Эвристика не гарантирует, что будет найдено оптимальное решение проблемы, но она может вернуть качественное решение за адекватное время для нескольких потребностей приложения. Основная цель эвристики – просто и быстро найти хорошее решение. С другой стороны, мета-эвристика – это модель, которая служит руководством для построения эвристики. Многие из этих моделей основаны на природных явлениях.

Предлагаемое решение. Сложность проблемы влияет на качество решения. Задача оптимального распределения целей может различаться по сложности в зависимости от таких факторов, как количество целей, их пространственное распределение, ограничения и количество роботов, участвующих в выполнении миссии. MTSP является NP-сложной проблемой, а это означает, что по мере увеличения количества коммивояжеров и количества городов поиск точного оптимального решения становится сложной задачей с вычислительной точки зрения.

Объем пространства решений MTSP с n задачами и m коммивояжерами можно рассчитать с помощью числа Лаха – представляет собой коэффициент, выражающий возрастающие факториалы через падающие факториалы и наоборот. Они были обна-

ружены Иво Лахом в 1954 году [30]. Беззнаковые числа Лаха имеют интересное значение в комбинаторике: они подсчитывают количество способов, которыми набор элементов « n » может быть разделен на « m » непустые линейно упорядоченные подмножества. Беззнаковое число Лаха рассчитывается следующей формуле:

$$L(n, m) = \left(\frac{n!}{m!}\right)^2 * \frac{m}{n(n-m)!} \quad (3)$$

Для решения MTSP было предложено множество различных алгоритмов, включая точные методы, такие как метод ветвей и границ, такие алгоритмы невозможно использовать для решения этой проблемы в случае, когда имеется большое количество задач и коммивояжеров из-за больших вычислительных затрат, что влияет на масштабируемость этих алгоритмов. Также используются для решения MTSP эвристические и мета-эвристические методы, такие как оптимизация муравьиной колонии, генетические алгоритмы и имитация отжига. Но они имеют две проблемы. Во-первых, использование эвристики соответствует локальной оптимизации, которая в свою очередь не приводит к глобальному оптимуму. Во-вторых, эти алгоритмы полагаются на случайные методы в поиске решений, что уменьшает вероятности нахождения оптимального решения в условиях больших количеств коммивояжеров и задач к распределению. В связи с этим, предлагается решение задачи MTSP на основе уменьшения размера пространства возможных решений.

Предложенная идея реализуется следующим образом:

Шаг 1: предполагаем, что количество агентов равно одному и решаем задачу коммивояжера.

Шаг 2: в результате решения задачи коммивояжера получаем оптимальную последовательность выполнения задач, которую в итоге разделяем как можно более равномерно между агентами.

Шаг 3: комбинаторно выбираем оптимальные первые и последние задачи каждого агента.

Таким образом, размер пространства возможных решений будет равен $(n-1)! + n-1$, где n – количество городов задачи MTSP.

В результате использования предложенного метода ожидается: а) существенное сокращение времени расчета задачи MTSP в связи с уменьшением размера пространства решения MTSP; б) увеличение степени оптимальности найденного решения в связи с тем, что поиск решения MTSP основан на оптимальном решении задачи TSP.

Эта методология в основном включает в себе 2 алгоритма: алгоритм решения задачи TSP и алгоритм разделения решения задачи TSP на несколько агентов.

Алгоритм решения задачи TSP (муравьиный алгоритм). В литературе существует очень много алгоритмов решения задачи TSP, например, генетические алгоритмы, биоинспирированные алгоритмы и другие. В качестве алгоритма решения задачи TSP будет использован муравьиный алгоритм.

Муравьиный алгоритм основан на том, что при поиске пищи муравьи демонстрируют сложное совместное поведение, определенное выделяемыми ими феромонами. Феромоны привлекают других муравьев и указывают путь к источнику пищи. В результате, чем больше муравьев идет по выбранному пути, тем больше этот путь будет насыщен феромоном, следовательно, вероятность того, что большее число муравьев пойдет по нему, растет. Кратчайший путь к цели (пище муравьев) определен большим количеством феромонов, т.к. большое количество муравьев будут двигаться по этому пути. Для устранения неоптимального пути (локальный минимум), алгоритм предусматривает испарение феромона с течением времени. Уровни феромона на самом коротком пути остаются высокими, т.к. е скорость осаждения феромона будет больше, чем его скорость испарения.

Алгоритм реализуется следующим образом. На рис. 1 изображена примерная среда передвижения, каждая точка это узел. От заданного узла i муравей имеет возможность перехода в другой узел j , если есть путь к нему, т.е. если i и j соединены

прямой пунктирной линией (с исключением узла, в котором муравей был один шаг назад). В муравьином алгоритме действует вероятностно-пропорциональное правило, определяющее вероятность перехода k -го муравья из узла i к узлу j :

$$P_{ij,k} = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j \in J_{i,k}} [\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}, \quad (4)$$

где τ_{ij} - уровень феромона между узлами i и j ; η_{ij} - эвристика на движение между узлами i и j ; α, β - два регулируемых параметра, задающие веса следа феромона и эвристики при выборе маршрута; $J_{i,k}$ - список еще не посещенных узлов муравьем k .

При $\alpha=0$ эффект феромона будет проигнорирован в расчёте вероятностей следующего шага, на вероятности выбора какого-либо узла будет влиять только эвристика, т.е. если эвристика есть расстояние между узлами, то выбор ближайшего узла будет самым вероятным, что соответствует жадному алгоритму в классической теории оптимизации. Если $\beta=0$, то работает лишь феромонное усиление, что влечет за собой быстрое вырождение маршрутов к одному субоптимальному решению.

Уравнение (4) определяет вероятности выбора конкретного узла. Сам выбор сделан по принципу колеса рулетки: в каждом узле есть свой сектор, площадь которого пропорциональна с вероятностью $P_{ij,k}$. Узел выбран на основе равновероятного распределения. Когда муравей k достигает цели, то он оставляет феромон, значение которого рассчитывается по следующему уравнению:

$$\Delta\tau_{ij,k} = \begin{cases} Q/L_k & \text{if } (i,j) \in T_k; \\ 0 & \text{if } (i,j) \notin T_k; \end{cases} \quad (5)$$

где T_k - маршрут муравья k ; L_k - длина маршрута; Q - константа.

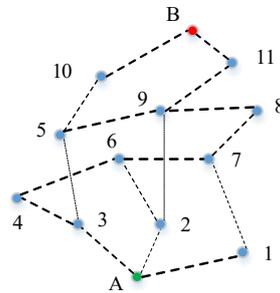


Рис. 1. Пример среды работы муравьиного алгоритма, узлы и пути между ними

Чтобы изучить все пространство решений и избежать попадания в локальный минимум, феромон должен испариться, правило обновления феромонов принимает форму:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij,k}, \quad (6)$$

где t - номер цикла; ρ - коэффициент испарения; m - количество муравьев.

Алгоритм берёт на вход список координат местоположения городов (C) (задач) и координат города-депо ($C_{start} \in C$) (города, из которого коммивояжёр начинает свой маршрут), если не указывать координаты города-депо, то программа выберет ближайший к центру карты город в качестве города-депо. Далее город-депо исключается из списка городов чтобы его не ограничивать к двумя городами. Таким образом об-

разуется список городов без города-депо (C). После этого рассчитывается матрица расстояний каждого города до остальных городов (D), следовательно, рассчитывается параметр эвристики муравьиного алгоритма следующим образом:

$$\eta = 1/D. \quad (7)$$

В качестве функционала качества выбрано евклидово расстояние:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (8)$$

где d – евклидово расстояние, x_1, y_1 – координаты первого города, x_2, y_2 – координаты второго города.

Далее запускается муравьиный алгоритм и рассчитывается оптимальное решение задачи TSP как показано ниже.

Алгоритм 1 Муравьиный Алгоритм.

```

Инициализировать параметры
Расположите муравьев в начальном узле
while условие остановки не выполнено do
    Муравьи строят пути
    Обновление феромона
    Обновить лучшее решение
end while
Сохранить лучшее решение.
    
```

Алгоритм разделения решения задачи TSP на несколько агентов. После расчёта оптимального пути задачи TSP нужно его разделить между агентами, чтобы получить решение задачи MTSP. Для этого формируем матрицу расстояния каждого города до других городов η^* , включая промежуточных города по пути, если они есть.

Далее рассчитывается примерная длина маршрута d^* , который должен быть пройден каждым из агентов путем разделения длины маршрута задачи TSP на количество агентов. Путем последовательного перебора городов первого агента, начиная с первого города, находится такой город, что расстояние до него по полученной кусочно-ломаной траектории максимально близко к числу d^* . Узлы этой траектории и есть центры городов. Для нахождения такого города необходимо пользоваться ранее полученной матрицей расстояний между каждой парой городов.

Первый город следующего агента выбирается в качестве города, следующего за последним городом предыдущего агента, и этот процесс повторяется до тех пор, пока не будут набраны все агенты. Далее рассчитывается и сохраняется сумма длин маршрутов всех клиентов.

Начальный город первого агента изменяется с помощью цикла до тех пор, пока не будут рассмотрены все решения, затем сохраняется решение, обеспечивающее наименьшую сумму пройденных расстояний.

Таким образом мы достигаем минимизации суммы длин пройденных маршрутов за счет оптимизации решения задачи TSP (на первом шаге) и обеспечиваем наилучшее разделение маршрута TSP на пути отдельных коммивояжеров за счет равномерного разбиения этого маршрута на одинаковые по длине сегменты (на втором шаге).

Моделирование. В качестве алгоритма для сравнения используется алгоритм АСО-ВМТSP [31], который, как и предложенный метод, основан на муравьином алгоритме. Оба алгоритма были запрограммированы на языке Python.

Для исследования указанных алгоритмов были приготовлены 3 эталонных задачи:

- ◆ eil51: эталонная задача с 51 городом.
- ◆ kroA100: эталонная задача с 100 городами.
- ◆ kroA150: эталонная задача с 150 городами.

Для каждой из этих задач были поставлены 3 сценария:

- ◆ с 3 агентами.

- ◆ с 5 агентами.
- ◆ с 10 агентами.

Каждый сценарий был запущен с 40, 320 муравьями по 100 раз чтобы посчитать статистику.

Критерии оценки:

- ◆ время расчета решения задачи MTSP.
- ◆ сумма длин пройденных агентами путей.
- ◆ максимальная длина пути среди пройденных агентами маршрутов.

Результаты. Результаты, полученные после моделирования, представлены в табл. 1-3. содержат сравнения результатов предложенного алгоритма и алгоритма АСО-ВМТСП в экземплярах Eil51, KroA100, KroA150 последовательно, с точки зрения среднего времени расчета «average time» (в секундах), средней суммы длин маршрутов «average sum» (в метрах), средней максимальной длины маршрутов «average max» (в метрах). Усреднение проводилось на множестве всех численных экспериментов для каждого типа задачи.

Таблица 1

Результаты исследования сценария eil51

Алгоритм	АСО-ВМТСП			Предложены		
Кол. муравьев	40					
Кол. агентов	3	5	10	3	5	10
average time	20.736	21.387	22.226	11.138	11.365	11.280
average sum	574.453	652.233	869.084	560.458	639.968	825.55
average max	201.378	146.134	105.455	193.585	141.616	101.2
Кол. муравьев	320					
average time	175.244	179.321	173.894	91.235	84.765	85.439
average sum	551.047	628.635	846.799	516.529	614.415	837.305
average max	193.042	139.77	103.738	178.685	134.889	100.757

Таблица 2

Результаты исследования сценария KroA100

Алгоритм	АСО-ВМТСП			Предложены		
Кол. муравьев	40					
Кол. агентов	3	5	10	3	5	10
average time	58.241	59.188	61.851	29.924	29.691	29.798
average sum	34498.26	42908.17	65523.66	33485.07	41400.2	59090.6
average max	12188.25	9631.54	8154.340	11717.517	9456.03	8277.39
Кол. муравьев	320					
average time	469.95	482.28	498.25	234.46	236.22	233.14
average sum	32985.43	41521.02	63963.67	30547.18	38918.78	56477.77
average max	11651.21	9488.57	8025.11	10820.9	9009.73	8076.90

Таблица 3

Результаты исследования сценария KroA150

Алгоритм	АСО-ВМТСП			Предложены		
Кол. муравьев	40					
Кол. агентов	3	5	10	3	5	10
average time	107.88	108.94	114.1	52	51.33	51.27
average sum	43049.57	50974.79	72337.29	41854.93	49117.82	66728.86
average max	14987.11	11190.31	8700.76	14401.55	10846.61	8758.39
Кол. муравьев	320					
average time	851.4	871.53	911.61	401.4	401.99	401.08
average sum	41123.39	48892.26	70298.32	38103.16	45767.76	63477.08
average max	14290.97	10777.28	8552.64	13193.32	10271.08	8471.84

Сравнительный анализ показал, что при использовании предложенного метода достигаются следующие сравнительные преимущества: а) время расчета решения задачи MTSP уменьшается на 56%; б) суммарная длина пути уменьшается на 12%; в) максимальная длина пути среди пройденных агентами маршрутов (дисбаланс нагрузки) уменьшается на 8%.

Заключение. В данной статье предлагается новая методика решения задачи мульти коммивояжеров на основе уменьшения пространства состояний. Проведено исследование предложенной методики на 3 эталонных задачах коммивояжера с участием 3, 5, 10 агентов. Качество решения измерялось по 3 критериям: времени расчета решения, суммы расстояний маршрутов всех коммивояжеров, максимальной длины пути среди пройденных всеми агентами маршрутов. Результаты были сравнены с традиционным алгоритмом на основе муравьиного алгоритма. Статистический анализ результатов показал, что в среднем, предложенный метод превосходит классический.

В последующих публикациях мы намерены показать, каким образом рассмотренный в настоящей статье алгоритм решения задачи мульти коммивояжеров позволяет получить соответствующий оптимальный алгоритм по критерию минимума на множестве всех расстояний, проходимых коммивояжерами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00492 «Разработка методов оптимального целераспределения в группе подвижных робототехнических комплексов», <https://rscf.ru/project/24-29-00492/> на базе АО «НКБ Робототехники и систем управления».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Gutin G., Punnen A.P.* The Traveling Salesman Problem and its Variations. – Springer, Boston, 2007.
2. *Braekers K., Ramaekers K., Nieuwenhuysse I.* The vehicle routing problem: State of the art classification and review, *Comput. Ind. Eng.*, 99.
3. *Oncan T.* A survey of the generalized assignment problem and its applications // *INFOR: Information Systems and Operational Research*. – 2007. – Vol. 45. – P. 123-141.
4. *Van Buer M.G., Woodru D.L., Olson R.T.* Solving the medium newspaper production/distribution problem // *European Journal of Operational Research*. – 1999. – P. 237-253.
5. *Carter A.E., Ragsdale C.T.* Scheduling pre-printed newspaper advertising inserts using genetic algorithms // *Omega*. – 2002. – P. 415-421.
6. *Kewei Huang, Dingwei Wang.* Multiple traveling salesman problem and its application to hot rolling planning // *Application Research of Computers*. – July 2007. – 24 (7). – P. 43-46.
7. *Tang L., Liu J., Ronga A., Yang Z.* A multiple traveling salesman problem model for hot rolling schedule in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex // *European Journal of Operational Research*. – 2000. – 124 (2). – P. 267-282.
8. *Kim K.H., Park Y.M.* A crane scheduling method for port container terminals // *European Journal of Operational Research*. – 2004. – P. 752-768.
9. *Sheldon H. Jacobson, Laura A. McLay, Shane N. Hall, Darrall Henderson, Diane E. Vaughan.* Optimal search strategies using simultaneous generalized hill climbing algorithms // *Mathematical and Computer Modelling*. – 2006. – 43. – P. 1061-1073.
10. *Evelyn C. Brown, Cliff T. Ragsdale, Arthur E. Carter.* A grouping genetic algorithm for the multiple traveling salesperson problem // *International Journal of Information Technology & Decision Making*. – 2007. – Vol. 6, No. 2. – P. 333-347.
11. *Harrath Y., Salman A.F., Alqaddoumi A., Hasan H., Radhi A.* A novel hybrid approach for solving the multiple traveling salesmen problem // *Arab. J. Basic Appl. Sci.* – 2019. – P. 103-112.
12. *Gomes D.E., Iglésias M.I.D., Proença A.P., Lima T.M., Gaspar P.D.* Applying a Genetic Algorithm to a m-TSP: Case Study of a Decision Support System for Optimizing a Beverage Logistics Vehicles Routing Problem // *Electronics*. – 2021.

13. Akbay M.A., Kalayci C.B. A Variable Neighborhood Search Algorithm for Cost-Balanced Travelling Salesman Problem // In Proceedings of the Metaheuristics Summer School, Taormina, Italy, 2018.
14. Muñoz-Herrera S., Suchan K. Constrained Fitness Landscape Analysis of Capacitated Vehicle Routing Problems // Entropy. – 2022. – Vol. – P. 53.
15. Xu H.L., Zhang C.M. The research about balanced route MTSP based on hybrid algorithm // In Proceedings of the 2009 International Conference on Communication Software and Networks, Chengdu, China, 2009. – P. 533-536.
16. Khoufi I., Laouiti A., Adjih C. A Survey of Recent Extended Variants of the Traveling Salesman and Vehicle Routing Problems for Unmanned Aerial Vehicles // Drones. – 2019. – Vol. 3. – P. 66.
17. de Castro Pereira S., Solteiro Pires E.J., de Moura Oliveira P.B. A Hybrid Approach GABC-LS to Solve MTSP // In Proceedings of the Optimization, Learning Algorithms and Applications. – Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022. – P. 520-532.
18. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization // IEEE Comput. Intell. Mag. – 2006. – P. 28-39.
19. Zhan S.C., Xu J., Wu J. The optimal selection on the parameters of the ant colony algorithm // Bull. Sci. Technol. – 2003. – P. 381-386.
20. Dorigo M. Optimization, Learning and Natural Algorithms. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Milano, Italy, 1992.
21. Gambardella L.M., Dorigo M. Ant-Q: A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem // In Machine Learning Proceedings. – Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1995. – P. 252-260.
22. Dorigo M., Gambardella L.M. Ant colonies for the travelling salesman problem // Biosystems. – 1997. – P. 73-81.
23. Bullnheimer B., Hartl R., Strauss C. A New Rank Based Version of the Ant System—A Computational Study // Cent. Eur. J. Oper. Res. – 1999. – P. 25-38.
24. Guntsch M., Middendorf M. A population based approach for ACO // In Proceedings of the Workshops on Applications of Evolutionary Computation, Kinsale, Ireland, 3-4 April 2002. – Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2002. – P. 72-81.
25. Blum C. Theoretical and Practical Aspects of Ant Colony Optimization. – IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 2004. – Vol. 282.
26. Хуссейн Ф.А., Финаев В.И. Исследование эффективности алгоритма искусственных потенциалов, муравьиного алгоритма и их комбинации при планировании траектории движения мобильного робота // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2020). – 2020. – С. 39-48.
27. Huang K.L., Liao C.J. Ant colony optimization combined with taboo search for the job shop scheduling problem // Comput. Oper. Res. – 2008. – P. 1030-1046.
28. Xiao J., Li L. A hybrid ant colony optimization for continuous domains // Expert Syst. Appl. – 2011. – P. 11072-11077.
29. Rahmani R., Yusof R., Seyedmahmoudian M., Mekhilef S. Hybrid technique of ant colony and particle swarm optimization for short term wind energy forecasting // J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn. – 2013. – P. 163-170.
30. Lah Ivo. A new kind of numbers and its application in the actuarial mathematics // Boletim do Instituto dos Actuários Portugueses. – 1954. – P. 7-15.
31. de Castro Pereira S., Solteiro Pires E.J., de Moura Oliveira P.B. Ant-Balanced Multiple Traveling Salesmen: ACO-BMTSP // Algorithms. – 2023. – P. 37.

REFERENCES

1. Gutin G., Punnen A.P. The Traveling Salesman Problem and its Variations. Springer, Boston, 2007.
2. Braekers K., Ramaekers K. Nieuwenhuysse I. The vehicle routing problem: State of the art classification and review, Comput. Ind. Eng., 99.
3. Oncan T. A survey of the generalized assignment problem and its applications, *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 2007, Vol. 45, pp. 123-141.
4. Van Buer M.G., Woodru D.L., Olson R.T. Solving the medium newspaper production/distribution problem, *European Journal of Operational Research*, 1999, 115, pp. 237-253.

5. Carter A.E., Ragsdale C.T. Scheduling pre-printed newspaper advertising inserts using genetic algorithms, *Omega*, 2002, pp. 415-421.
6. Kewei Huang, Dingwei Wang. Multiple traveling salesman problem and its application to hot rolling planning, *Application Research of Computers*, July 2007, 24 (7), pp. 43-46.
7. Tang L., Liu J., Ronga A., Yang Z. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling schedule in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex, *European Journal of Operational Research*, 2000, 124 (2), pp. 267-282.
8. Kim K.H., Park Y.M. A crane scheduling method for port container terminals, *European Journal of Operational Research*, 2004, 156, pp. 752-768.
9. Sheldon H. Jacobson, Laura A. McLay, Shane N. Hall, Darrall Henderson, Diane E. Vaughan. Optimal search strategies using simultaneous generalized hill climbing algorithms, *Mathematical and Computer Modelling*, 2006, 43, pp. 1061-1073.
10. Evelyn C. Brown, Cliff T. Ragsdale, Arthur E. Carter. A grouping genetic algorithm for the multiple traveling salesperson problem, *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 2007, Vol. 6, No. 2, pp. 333-347.
11. Harrath Y., Salman A.F., Alqaddoumi A., Hasan H., Radhi A. A novel hybrid approach for solving the multiple traveling salesmen problem, *Arab. J. Basic Appl. Sci.*, 2019, pp. 103-112.
12. Gomes D.E., Iglésias M.I.D., Proença A.P., Lima T.M., Gaspar P.D. Applying a Genetic Algorithm to a m-TSP: Case Study of a Decision Support System for Optimizing a Beverage Logistics Vehicles Routing Problem, *Electronics*, 2021.
13. Akbay M.A., Kalayci C.B. A Variable Neighborhood Search Algorithm for Cost-Balanced Travelling Salesman Problem, *In Proceedings of the Metaheuristics Summer School, Taormina, Italy, 2018*.
14. Muñoz-Herrera S., Suchan K. Constrained Fitness Landscape Analysis of Capacitated Vehicle Routing Problems, *Entropy*, 2022, pp. 53.
15. Xu H.L., Zhang C.M. The research about balanced route MTSP based on hybrid algorithm, *In Proceedings of the 2009 International Conference on Communication Software and Networks, Chengdu, China, 2009*, pp. 533-536.
16. Khoufi I., Laouiti A., Adjih C. A Survey of Recent Extended Variants of the Traveling Salesman and Vehicle Routing Problems for Unmanned Aerial Vehicles, *Drones*, 2019, Vol. 3, pp. 66.
17. de Castro Pereira S., Solteiro Pires E.J., de Moura Oliveira P.B. A Hybrid Approach GABC-LS to Solve MTSP, *In Proceedings of the Optimization, Learning Algorithms and Applications. – Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022*, pp. 520-532.
18. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization, *IEEE Comput. Intell. Mag.*, 2006, pp. 28-39.
19. Zhan S.C., Xu J., Wu J. The optimal selection on the parameters of the ant colony algorithm, *Bull. Sci. Technol.*, 2003, pp. 381-386.
20. Dorigo M. Optimization, Learning and Natural Algorithms. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Milano, Italy, 1992.
21. Gambardella L.M., Dorigo M. Ant-Q: A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem, *In Machine Learning Proceedings*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1995, pp. 252-260.
22. Dorigo M., Gambardella L.M. Ant colonies for the travelling salesman problem, *Biosystems*, 1997, pp. 73-81.
23. Bullnheimer B., Hartl R., Strauss C. A New Rank Based Version of the Ant System—A Computational Study, *Cent. Eur. J. Oper. Res.*, 1999, pp. 25-38.
24. Guntsch M., Middendorf M. A population based approach for ACO, *In Proceedings of the Workshops on Applications of Evolutionary Computation, Kinsale, Ireland, 3-4 April 2002*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2002, pp. 72-81.
25. Blum C. Theoretical and Practical Aspects of Ant Colony Optimization. IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 2004, Vol. 282.
26. Khusseyn F.A., Finaev V.I. Issledovanie effektivnosti algoritma iskusstvennykh potentsialov, murav'inogo algoritma i ikh kombinatsii pri planirovanii traektorii dvizheniya mobil'nogo robota [Study of the effectiveness of the algorithm of artificial potentials, the ant algorithm and their combination when planning the trajectory of a mobile robot], *Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii (KomTekh-2020)* [Computer and information technologies in science, engineering and management (ComTech-2020)], 2020, pp. 39-48.
27. Huang K.L., Liao C.J. Ant colony optimization combined with taboo search for the job shop scheduling problem, *Comput. Oper. Res.*, 2008, pp. 1030-1046.

28. *Xiao J., Li L.* A hybrid ant colony optimization for continuous domains, *Expert Syst. Appl.*, 2011, pp. 11072-11077.
29. *Rahmani R., Yusof R., Seyedmahmoudian M., Mekhilef S.* Hybrid technique of ant colony and particle swarm optimization for short term wind energy forecasting, *J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.*, 2013, pp. 163-170.
30. *Lah Ivo.* A new kind of numbers and its application in the actuarial mathematics, *Boletim do Instituto dos Actuários Portugueses*, 1954, pp. 7-15.
31. *de Castro Pereira S., Solteiro Pires E.J., de Moura Oliveira P.B.* Ant-Balanced Multiple Traveling Salesmen: ACO-BMTSP, *Algorithms*, 2023, pp. 37.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. В.В. Пивнев.

Костюков Владимир Александрович – АО «НКБ Робототехники и систем управления»; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; научный руководитель.

Хуссейн Фирас Айманович – e-mail: firas94mecha@gmail.com; тел.: 89996379357; м.н.с.

Евдокимов Игорь Дмитриевич – e-mail: igor.ezio2000@yandex.ru; тел. 89182235832; м.н.с.

Kostyukov Vladimir Aleksandrovich – Joint-Stock Company “Robotics and Control Systems”; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371694; can. of eng. sc.; senior researcher.

Houssein Fieas Aimanovich – e-mail: firas94mecha@gmail.com; phone: +79996379357; junior researcher.

Evdokimov Igor Dmitrivich – e-mail: igor.ezio2000@yandex.ru; phone: +79182235832; junior researcher.

Раздел III. Связь, навигация и наведение

УДК 621.396.967

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-193-202

Е.А. Бабушкин, Р.В. Калашников, А.М. Лаврентьев**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ,
С КОМПЕНСАЦИОННЫМИ КАНАЛАМИ, ИНТЕГРИРОВАННЫМИ
В ФАЗИРОВАННУЮ АНТЕННУЮ РЕШЕТКУ ПРОХОДНОГО ТИПА**

Непрерывное совершенствование технологий создания беспилотных авиационных платформ приводит к росту их количественного состава и спектра решаемых ими задач. Установка станций постановки помех в качестве полезной нагрузки на беспилотные летательные аппараты (БпЛА) позволяет осуществлять радиоэлектронное подавление многофункциональных радиолокационных станций (МРЛС) средств противовоздушной обороны за счет превышения числа помех над числом каналов компенсатора этих помех. Поскольку современные МРЛС сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн оснащаются фазированными антенными решетками (ФАР), чаще всего проходного типа, то задача увеличения противопомехового канального ресурса в таких системах наиболее актуальна. Одним из направлений решения данной задачи является конструктивное объединение (интеграция) основной и компенсационных подрешеток в общем раскрыве ФАР. Данное решение требует незначительной программно-аппаратной доработки образца, заключающейся в применении системы дополнительных облучателей с цифровым выходом, расположенных за основным полотном ФАР, что является более экономичным в сравнении с использованием множества вспомогательных малоразмерных компенсационных ФАР. В статье приводится сравнительная оценка эффективности функционирования подсистемы автоматической компенсации помех с подрешетками компенсационных каналов интегрированных в основную ФАР и автокомпенсатора помех с множеством малоразмерных компенсационных решеток. Исследование проводилось методами компьютерного моделирования на имитационной программной модели функционирования подсистемы автоматической компенсации помех МРЛС с ФАР при воздействии группы БпЛА – носителей станций постановки помех. Результаты моделирования показали возможность увеличения противопомехового канального ресурса при реализации в МРЛС предложений, а также рост показателя помехоустойчивости в 1,02...1,23 раза по сравнению с МРЛС, оснащенной малоразмерными ФАР компенсационных каналов.

Многофункциональная радиолокационная станция; автокомпенсатор помех; фазированная антенная решетка; коэффициент сжатия зоны обнаружения.

E.A. Babushkin, R.V. Kalashnikov, A.M. Lavrentiev**ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE AUTOMATIC
INTERFERENCE COMPENSATION SUBSYSTEM WITH COMPENSATION
CHANNELS INTEGRATED INTO A PASS-TYPE PHASED ARRAY ANTENNA**

Continuous improvement of the technology for creating unmanned aerial platforms leads to an increase in their quantitative composition and the tasks they solve. Installing jamming elements as a payload on unmanned aerial vehicles (UAVs) makes it possible to study the electronic suppression of multifunctional radar devices (MRLS) by air defense systems due to the excess of the jamming numbers over the number of oscillations of the jammer compensator. Since modern cali-

ber and millimeter-wave wavy radars are connected to phased array antennas (PAA), most often of the pass-through type, the task of increasing the anti-interference channel resource in such conditions is most relevant. One solution to this problem is the constructive unification (integration) of the main and compensation subarrays in a common phased array array. This solution requires a small hardware and software modification, which consists in using a system of additional receivers with a digital output operating on the main FAR network, which is more economical when using auxiliary small-sized compensation FARs. The article presents the comparative effectiveness of the subsystem when exposed to interference with subarrays of compensation elements integrated mainly by phased arrays and an automatic interference compensator with a large number of small-sized compensation arrays. The study was carried out by modeling using a simulation software computer model of the electrical subsystem of periodic periodic interference of a radar with phased array under the influence of a group of UAVs - carriers of the operating parameters of the interference. The results of demonstrating the possibility of increasing the anti-interference channel resource when implementing the proposals of the radar, as well as an increase in the noise immunity indicator by 1.02...1.23 times compared to the radar, equipped with small-sized phased array compensation channels.

Multifunctional radar station; automatic noise canceller; phased array antenna; detection zone compression ratio.

Введение. Стремительное развитие беспилотной авиации, способной выполнять роль носителей станций постановки активных шумовых помех (АШП), в направлении удешевления приводит к неуклонному росту их количества в зоне ответственности средств противовоздушной обороны (ПВО), что накладывает высокие требования к помехоустойчивости существующих и перспективных многофункциональных радиолокационных станций (МРЛС) средств ПВО. Для защиты от АШП МРЛС оснащаются подсистемами автоматической компенсации помех (АКП), которые позволяют снизить уровень помехи на входе приемного устройства до уровня собственного шума при условии, что число источников помех не превышает количество компенсационных каналов (КК) [6, 18, 19]. Жесткие ограничения на габариты и стоимость мобильных средств ПВО не позволяют оснащать их МРЛС достаточным числом вспомогательных антенн КК. Наглядным примером таких ограничений служит МРЛС миллиметрового диапазона зенитного ракетного пушечного комплекса (ЗРПК) «Панцирь С», оснащенная проходной фазированной антенной решеткой (ФАР) с круглым раскрывом – крупноразмерной основной и одной-двумя малоразмерными вспомогательными [4].

Решением противоречия может выступать использование подсистемы АКП с КК, интегрированными в проходную ФАР, при условии незначительной программно-аппаратной доработки образца техники, заключающейся в применении системы дополнительных облучателей с цифровыми выходами (СДО с ЦВ), расположенными за основным полотном ФАР (рис. 1) [2]. Суть способа заключается в введении на ФАР такого фазового распределения (ФР), чтобы часть элементов основного полотна и дополнительный облучатель сформировали узконаправленный луч ДНА КК в направлении источника помехи, а ДНА основного канала (ОК) была сфазирована в направлении источника полезного сигнала с учетом компенсации разности хода волн от элементов ФАР до облучателей ОК и каждого КК [2]. Информацию о направлении на постановщик АШП предлагается получать с помощью спектральных методов пеленгования, на основе алгоритма MUSIC [5, 17, 19], при многоканальной обработке сигналов в СДО с ЦВ.

Для проверки данной гипотезы необходимы численные оценки, а **целью работы** является оценка эффективности подсистемы АКП с КК, интегрированными в проходную ФАР и СДО с ЦВ, при пеленгации с помощью спектральных методов в условиях массового воздействия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – носителей станций постановки АШП.

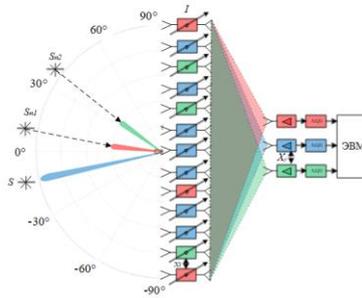


Рис. 1. ФАР проходного типа и СДО с ЦВ

Количественной мерой способности МРЛС функционировать в условиях воздействия помех рассматривается коэффициент сжатия зоны обнаружения (КСЗО), который показывает отношение реализуемой дальности обнаружения в условиях помех к дальности обнаружения в беспомеховой обстановке [1] и с учетом работы АКП может быть рассчитан исходя из своего определения [1, 6, 9];

$$КСЗО = \frac{D_{\text{п}}}{D_0} = 4 \sqrt{\frac{K_{\text{п}} K_{\text{с}}}{K_{\text{п}} + \frac{Y_{0\text{п}}^2}{N_0}}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{п}}$ – дальность обнаружения целей в условиях воздействия помех; D_0 – дальность обнаружения в беспомеховой обстановке; $K_{\text{п}} = \frac{Y_{0\text{п}}^2}{Y_{\text{ВЫХ п}}^2}$ – коэффициент подавления помехи при прохождении через АКП; $K_{\text{с}} = \frac{Y_{\text{ВЫХ с}}^2}{Y_{0\text{с}}^2}$ – коэффициент изменения уровня сигнала при прохождении через АКП; $Y_{0\text{п}}^2, Y_{0\text{с}}^2$ – спектральная плотность мощности помехи и энергия сигнала на входе основного приемного канала; $Y_{\text{ВЫХ п}}^2, Y_{\text{ВЫХ с}}^2$ – спектральная плотность мощности помехи и энергия сигнала на выходе автокомпенсатора; N_0 – спектральная плотность мощности внутреннего шума приемного устройства.

Сущность АКП вне зависимости от способа формирования КК заключается в компенсации помех, приходящих с направлений, отличных от сигнального путем соответствующего подбора весовых коэффициентов в КК [3, 5, 7, 12]:

$$\dot{Y}_{\text{ВЫХ}}(t) = \dot{\boldsymbol{\mu}} \cdot \dot{Y}(t)^{\text{H}}, \quad (2)$$

где $\dot{\boldsymbol{\mu}} = [\dot{\mu}_0, \dot{\mu}_1, \dots, \dot{\mu}_p, \dots, \dot{\mu}_P] = \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{r}$ – вектор весовых коэффициентов, $\dot{Y}(t) = [\dot{Y}(t)_0, \dot{Y}(t)_1, \dots, \dot{Y}_p(t), \dots, \dot{Y}(t)_P]$ – матрица реализаций в каналах обработки, t – номер отсчета реализации p – номер канала, P – количество каналов, $\dot{Y}_{\text{ВЫХ}}(t)$ – сигнал на выходе АКП, \mathbf{R}^{-1} – обратная корреляционная матрица (КМ) помех в КК, \mathbf{r} – вектор взаимной корреляции выходных сигналов ОК и КК.

Однако в силу ограниченности времени накопления вместо точной КМ помех (\mathbf{R}) и вектора взаимной корреляции выходных сигналов (\mathbf{r}) могут использоваться только их максимально правдоподобные оценки [8, 19]:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{2T} \dot{Y}(t)^{\text{H}} \dot{Y}(t) \quad (3)$$

и

$$\hat{\mathbf{r}} = \frac{1}{2T} \dot{Y}(t)^{\text{H}} \dot{Y}_0(t), \quad (4)$$

где T – количество отсчетов реализации.

Постановка расчетной задачи. Пусть в зоне действия МРЛС действует M БПЛА – постановщиков АШП распределенных равномерно в секторе углов θ на удалении r_n . В качестве радиоэлектронного оборудования выступает станция постановки АШП с мощностью передатчика P_n и коэффициентом усиления антенны G_n , которая формирует прямошумовую помеху с шириной спектра Δf_n . Необходимо определить величину КСЗО МРЛС с учетом работы АКП (1) при наличии P слабонаправленных антенн КК и P КК, интегрированных в круглую ФАР с пространственным возбуждением I антенных элементов с координатами x_i, y_i .

Для этого с помощью выражений (2-4) должна быть получена реализация на выходе АКП $\dot{Y}_{\text{ВЫХ}}(t)$ на основе входных реализаций в каналах при воздействии M постановщиков АШП, которые могут быть представлены в виде:

$$Y_p(t) = \sum_{m=1}^M \left[\sqrt{\dot{G}_p(\theta_{nm})} \cdot n_{nm}(t) \right] + n_{0p}(t), \quad (4)$$

где $\dot{G}_p(\theta_{nm})$ – значение коэффициента усиления p -го канала в направлении m -го ПАП, θ_{nm} – азимут m -го ПАП, $n_{nm}(t)$, $n_{0p}(t)$ – реализации m -й помехи и шума p -го канала, представляющие собой «белый шум» со спектральной плотностью мощности σ_{nm}^2 , σ_0^2 соответственно в секторе частот Δf_n .

При формировании КК, интегрированных в проходную ФАР, коэффициент усиления канала и множитель должны быть рассчитаны на основе преобразования Фурье от амплитудно-фазового распределения (АФР) на элементах ФАР [6, 10]:

$$G_p(\theta) = G_{max} \left(\frac{\dot{F}_p(\theta)}{\sum_{i=1}^I A_{0i}} \right)^2 \quad (5)$$

и

$$F_p(\theta) = \sum_{i=1}^I \dot{\Phi}_{pi} e^{j[k \cdot \rho_i \cdot \sin(\theta)]}, \quad (6)$$

где i – номер элемента ФАР, I – количество элементов ФАР, G_{max} – максимальный коэффициент усиления антенны, k – волновое число, $\dot{F}_p(\theta)$ – ДНА p -го пространственного канала, $\dot{\Phi}_{pi} = A_{pi} e^{j(\varphi_i + \vartheta_{pi})}$ – амплитудное (A_{pi}) и фазовое (ϑ_{pi}) распределения (АР и ФР), формируемые p -м облучателем на ФАР, а также ФР (φ_i), задаваемое на элементах антенной решетки фазовращателями, $\rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ – координата i -го элемента ФАР, x_i, y_i – координаты i -го элемента ФАР по вертикали и горизонтали.

Основной и дополнительные облучатели ФАР представляют собой рупора, которые формируют спадающее к краям амплитудное и сферичное фазовое распределения поля на элементах ФАР [6, 10]:

$$A_{pi} = 0.8 \cdot \cos \left[\frac{\pi \cdot \sqrt{(x_i - X_p)^2 + (y_i - Y_p)^2}}{2} \right] \quad (7)$$

и

$$\vartheta_{pi} = k \cdot \left[\sqrt{(x_i - X_p)^2 + (y_i - Y_p)^2 + z_0^2} - z_0 \right], \quad (8)$$

где z_0 – расстояние от облучателя до сечения ФАР $D_p = \sqrt{X_p^2 + Y_p^2}$ – координата p -го облучателя, X_p, Y_p – координаты p -го облучателя по вертикали и горизонтали.

ФР φ_i на антенных элементах ФАР в условиях АКП КК, интегрированными в проходную ФАР, для азимутальной плоскости описывается выражением [2]:

$$\varphi_i = \sum_{p=0}^P \sum_{i=1}^I C_{pi} \cdot [k \cdot (x_i \cdot \sin \theta_{pm}) - \vartheta_{pi}], \quad (9)$$

где θ_{pm} – направление на m -й ПАП, отсчитываемое от нормали к раскрыву, m – номер постановщика АШП, C_{pi} – элемент матрицы, принимающий значения 0 и 1 и характеризующий к какой подрешетке относится данный элемент.

Процесс формирования компенсационных подрешеток осуществляется путем генерирования набора случайных чисел \mathbf{Q} размерностью $1 \times I$, равномерно распределенных в интервале $[0 \dots 1]$. Попадание числа Q_p в интервал, длина которого определяется значением функции распределения элементов в полотне $W(\rho_i)$, соответствует включению модуля ФАР с индексом p в подрешетку КК [2]:

$$C_{pi}(W) = \begin{cases} 1, & (p-1)W(\rho_i) < Q_p \leq pW(\rho_i) \\ 0, & Q_p \leq (p-1)W(\rho_i), Q_p > pW(\rho_i) \end{cases} \quad (10)$$

Распределение функции $W(\rho_i)$ выбора элементов с учетом создаваемого центрального облучателем АР характеризует однопараметрическое распределение Хансена [13, 16, 20] и описывается выражением [2]:

$$W(\rho_i, T_H, I) = \begin{cases} g(I) \left[1 - \frac{J_0 \left\{ \pi T_H \sqrt{1 - \left(\frac{\rho_i}{\rho_{max}} \right)^2} \right\}}{A_{0i}} \right], & \rho_i < \rho_{max}, \\ 0, & \rho_i > \rho_{max} \end{cases} \quad (11)$$

где $g(I)$ – коэффициент, обеспечивающий включение заданного числа элементов в подрешетки КК; J_0 – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка; T_H – положительный действительный параметр распределения Хансена, определяющий значение углового смещения первых нулей ДНА подрешетки ОК.

Поскольку точная информация о пеленгах на БПЛА априорно неизвестна, но требуется для формирования в их направлении узких лучей ДНА КК, то ее предлагается получать между периодами компенсации помех [11]. Для этого на отдельном этапе пеленгования необходимо устанавливать на антенных элементах нулевое ФР ($\varphi_i = 0$) с целью формирования широких перекрывающихся пространственных каналов [10, 16] и последующей обработки принятых сигналов.

Полученные реализации (4) подвергаются предварительной фазовой корректровке, учитывающей вносимые ФАР искажения, возникающие из-за разности хода волн от каждого элемента ФАР до своего облучателя [14, 15]:

$$\dot{Y}_{p \text{ кор}}(t) = \dot{Y}_p(t) \exp(j\mu_p), \quad (12)$$

где $\mu_p = -\kappa \left[\sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + z_0^2} - z_0 \right]$ – корректирующий коэффициент, рассчитываемый из приближений геометрической оптики.

Далее по скорректированным реализациям формируется оценка пеленга с помощью спектральных методов пеленгования на основе алгоритма MUSIC который включает следующие этапы [5, 17, 19]:

- ♦ оценка КМ (3);
- ♦ выполнение спектрального разложения на собственные числа (СЧ) и собственные вектора (СВ):

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}^H \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}, \quad (13)$$

где \mathbf{U} – матрица, столбцами которой являются СВ КМ, $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_p, \dots, \lambda_P)$ – диагональная матрица, элементы которой СЧ;

- ♦ разделение СВ на сигнальные и шумовые и выделения всех шумовых СВ в отдельную матрицу $\mathbf{\Pi}_0$;

- ♦ формирование пространственного спектра по алгоритму:

$$Q_{MUSIC}(\beta) = [\mathbf{V}(\beta)^H \mathbf{P}_0 \mathbf{V}(\beta)]^{-1}, \quad (14)$$

где $\mathbf{V}(\beta) = \exp[-j \cdot \mathbf{k} \cdot \mathbf{X} \cdot \sin(\beta)]$ – вектор-гипотеза;

- ♦ отыскание положений экстремумов функции $Q_{MUSIC}(\beta)$ которые соответствуют пеленгам БпЛА – постановщиков АПП.

При формировании КК за счет использования малоразмерных антенных решеток справедливы выражения (1-8) с той лишь разницей, что $p=0$, т.е. используется только основной облучатель ОК, а количество элементов I кратно меньше. В качестве фазового распределения используется (9), $p=0$ и все элементы C_{pi} равны единице, т.е. формируется единственный луч ДНА КК. Поскольку лучи КК от малоразмерных антенных решеток являются слабонаправленными, то пеленги БпЛА – постановщиков АПП могут быть получены в результате побочных измерений с низкой точностью при обзоре пространства [4].

В силу наличия множества случайных параметров задача решалась путем численного моделирования и рассматривалось два случая:

- 1) пеленгация БпЛА – постановщиков АПП и компенсация формируемых ими помех с помощью АКП с КК, интегрированными в ФАР с пространственным возбуждением;
- 2) компенсация помех малоразмерными компенсационными антенными решетками.

Исходные данные при моделировании. При моделировании ожидаемой воздушной обстановки рассматривалось воздействие 6 ПАП распределенных по равномерному закону в секторе углов $[-30^\circ \dots -1^\circ]$ и $[1^\circ \dots 30^\circ]$ на удалении $[0,2 \dots 10]$ км. Станция постановки помех формировала помеху с шириной спектра 10 МГц, мощностью 50 Вт, а коэффициент усиления ее антенны составлял 9 дБ.

При моделировании антенно-фидерной подсистемы рассматривалась плоская проходная ФАР с круглым раскрывом и пространственным возбуждением 13505 антенных элементов. в гексагональной сетке с шагом 0,627 длины волны. Дискретность фазовращателей антенных элементов составляла 45° , а ошибка установки фазы имела нормальное распределение со среднеквадратическим отклонением в $22,5^\circ$. Компенсация с помощью АКП с интегрированными КК осуществлялась системой из шести ДО с ЦВ размещенными в виде кольца в плоскости раскрыва моноимпульсного облучателя (МИО) с радиусом 4,5 длины волны. Полотно ФАР разбивалось на 7 вложенных подрешеток – одну подрешетку ОК (рис. 2,а) и шесть подрешеток КК с 491...558 элементами (рис. 2,б). Коэффициент шума приемника равен 6дБ.

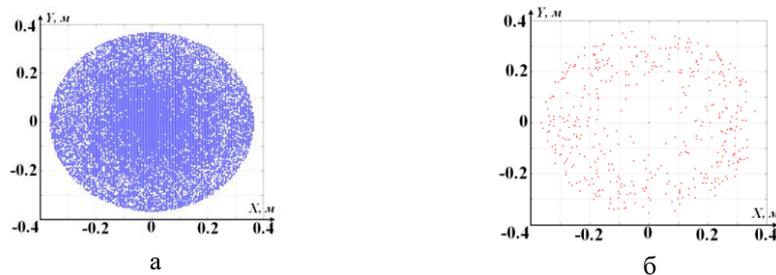


Рис. 2. Используемый при моделировании вариант размещения элементов в полотне ФАР: а – подрешетки ОК, б – 1-й подрешетки КК

В соответствии с методикой [2] координаты элементов подрешеток КК выбирались таким образом, чтобы обеспечивался низкий уровень первых боковых лепестков ДНА ОК. С учетом создаваемого первичным облучателем АР распределе-

ние элементов компенсационных подрешеток в раскрыве ФАР соответствует однопараметрическому распределению Хансена, формирующее ДНА ОК с уровнем первого бокового лепестка менее -30 дБ [16, 20]. На рис. 3 представлена ДНА ОК при синфазном возбуждении элементов исходной ФАР и ДНА с включенными антенными элементами ФАР в компенсационные подрешетки и отклонения их главных максимумов вне сектора угловых направлений $\pm 15^\circ$. Выбор элементов в подрешетки позволил снизить уровень боковых лепестков ДНА на 11,21 дБ при снижении главного максимума на 4,5 дБ (рис. 3,а) и позволил сформировать КК с уровнем главного максимума ДНА КК превышающего первый и последующие боковые лепестки ДНА ОК (рис. 3,б).

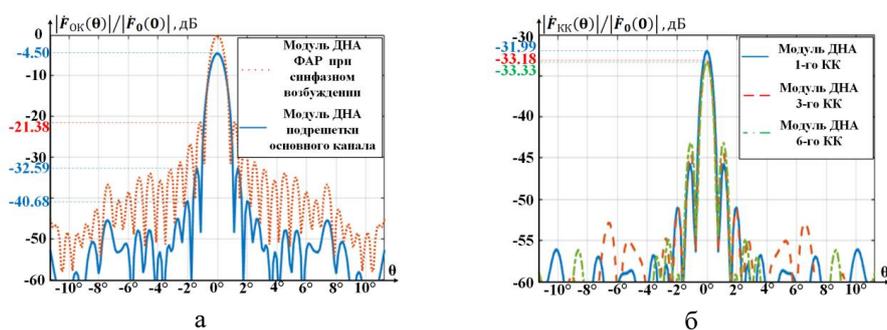


Рис. 3. Модуль ДНА: а – подрешетки ОК, б – 1, 3, 6-й подрешетки КК

В случае автоматической компенсации с помощью малоразмерных компенсационных ФАР оценивалась помехоустойчивость при наличии двух и шести решеток с 506 антенными элементами в гексагональной сетке (рис. 4,а). ДНА КК малоразмерных ФАР обеспечивала значение нормированного максимума равного -28,43 дБ (рис. 4,б).

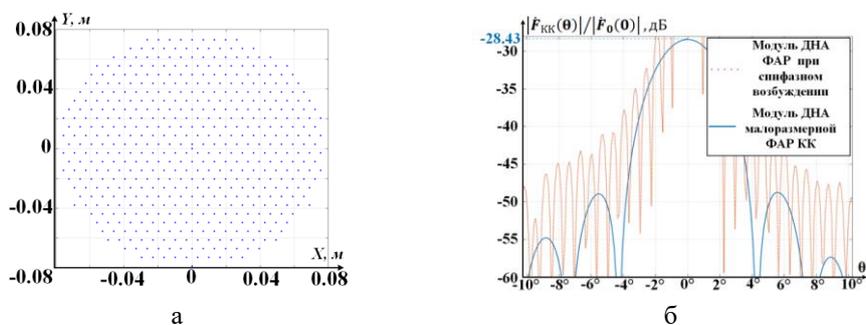


Рис. 4. а – размещение элементов малоразмерной ФАР КК, б – ДНА ФАР КК

Результаты моделирования по оценке эффективности АКП с различными КК. Путем численного моделирования по результатам многократного повторения опытов были получены количественные оценки эффективности функционирования подсистемы АКП с КК, интегрированными в проходную ФАР и СДО с ЦВ, при пеленгации с помощью спектральных методов в условиях массового воздействия БПЛА – носителей станций постановки АШП.

Результаты опытов были усреднены и сведены в диаграмму, представленную на рис. 5.

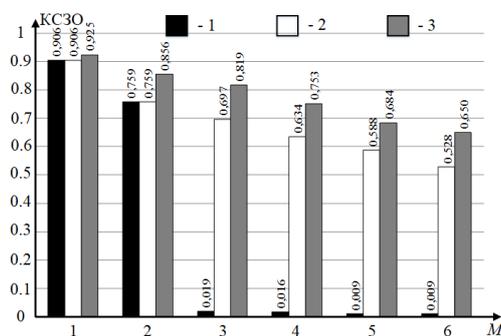


Рис. 5 – Среднее значение КСЗО МРЛС при различном числе БпЛА
 1 – для МРЛС с двумя малоразмерными ФАР КК; 2 – для МРЛС с шестью малоразмерными ФАР КК; 3 – с интегрированными в круглую проходную ФАР компенсационными подрешетками

Анализ зависимости позволяет заметить, что при увеличении числа направлений воздействия АШП выигрыш в дальности обнаружения цели по сравнению с МРЛС оснащенной малоразмерными компенсационными антеннами, увеличивается. Обусловлено это меньшим отношением помеха/шум на входе приемника, а также меньшей корреляцией между сигналами помех в компенсационных каналах. Так при воздействии 6 БпЛА суммарная мощность помехи в ходе эксперимента на входе основного приёмного канала, в среднем, была на 42 дБ больше его собственного внутриканального шума, коэффициент подавления помехи при применении системы АКП составлял 40,2дБ. Таким образом, реализация КК в виде подрешеток из состава основного полотна ФАР позволяет повысить КСЗО МРЛС при воздействии одного БпЛА до 1,02, а при воздействии шести БпЛА до 1,23 раз в сравнении с малоразмерными компенсационными ФАР.

Вывод. На основе имитационного моделирования процесса подавления АШП системой АКП с неэквидистантными компенсационными подрешетками, интегрированными в круглую проходную ФАР, была произведена оценка помехоустойчивости МРЛС с ФАР проходного типа и системой ДО с ЦВ. Проведенные прогнозные оценки показали возможность увеличения КСЗО при реализации в МРЛС ЗРПК малой дальности разработанных предложений по сравнению с МРЛС, оснащенной малоразмерными антеннами компенсационных каналов, в 1,02...1,23 раза. Исходя из этого цель работы по оценке эффективности подсистемы АКП с КК, интегрированными в проходную ФАР и СДО с ЦВ, при пеленгации с помощью спектральных методов в условиях массового воздействия БпЛА – носителей станций постановки АШП можно считать достигнутой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурмистров С.К. Справочник офицера воздушно-космической обороны / под общей ред. С.К. Бурмистрова. – Тверь: ВА ВКО, 2006. – 564 с.
2. Лаврентьев А.М., Калашников Р.В. Методика выделения из круглой ФАР просветолинзового типа элементарных излучателей для формирования дополнительных компенсационных антенн // Матер. международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – РЭУС-2018» (Москва 11-12 мая 2018 г.). Доклады. Москва, Россия. – С. 65-70.
3. Лосев И.Ю., Бердников А.Г., Гойхман Э.Ш. [и др.]. Адаптивная компенсация помех в каналах связи. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
4. Многофункциональная радиолокационная станция 1РС2-1. Руководство по эксплуатации. 1РС2-1.00.00.000РЭ. – 106 с.

5. *Ратынский М.В.* Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: ЛЕНАНД, 2022. – 240 с.
6. *Сколник М.* Справочник по радиолокации: в 4 ч. Ч. 1. – М.: Сов. Радио, 1976. – 456 с.
7. *Уидроу Б.* Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
8. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
9. *Ширман Я.Д., Голиков В.Н., Бусыгин И.Н. [и др.]*. Теоретические основы радиолокации / под ред. Ширмана Я.Д. – 443 с.
10. *Шифрин Я.С.* Антенны. – Харьков: ВИРТА им. Говорова Л.А., 1976. – 407 с.
11. *Шушов Ю.А., Ворошилов В.А.* Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов. – М.: Радио и связь, 1987. – 144 с.
12. *Guerci J.R.* Space-time adaptive processing for radar. – Boston and London: Artech House, 2015. – 298 p.
13. *Hansen R.C.* A One-Parameter Circular Aperture Distributions with Narrow Beam-width and Low Sidelobes // IEEE trans. – 1967. – Vol. AP-24. – P. 477-480.
14. *Hansen R.C.* Microwave scanning antennas. Vol. 1. Apertures. – New York and London, Academic press, 1964. – 536 p.
15. *Hansen R. C.* Microwave scanning antennas. Vol. 2. Array theory and practice. – New York and London, Academic press, 1966. – 496 p.
16. *Hansen R.C.* Phased array antennas. – 2nd ed. – Wiley, 2009. – 558 p.
17. *Marple Jr.S.L.* Digital spectral analysis with application. – 2nd ed. – Dover Publications Inc., 2019. – 432 p.
18. *Melvin W.L.* Space-time adaptive processing and adaptive arrays: special collection of papers // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. – 2000. – Vol. 36, No. 2. – P. 508-509.
19. *Monzingo R.A.* Introduction to Adaptive Arrays. – New York, John Wiley and sons, 1980. – 446 p.
20. *Taylor T.T.* One-Parameter Family of Line Sources Producing Modified $\sin \pi u / \pi u$ Pattern, rep. TM 324. Hughes Aircraft Co., Culver City, CA, 1953.

REFERENCES

1. *Burmistrov S.K.* Spravochnik ofitsera vozdušno-kosmicheskoy oborony [Aerospace Defense Officer's Handbook], ed. by S.K. Burmistrova. Tver': VA VKO, 2006, 564 p.
2. *Lavrent'ev A.M., Kalashnikov R.V.* Metodika vydeleniya iz krugloy FAR prosvetno-liniovogo tipa elementarnykh izluchateley dlya formirovaniya dopolnitel'nykh kompensatsionnykh antenn [Methodology for isolating elementary emitters from a circular phased array of the transparent-lens type to form additional compensation antennas], *Mater. mezhdunarodnoy konferentsii «Radioelektronnye ustroystva i sistemy dlya infokommunikatsionnykh tekhnologiy – REUS-2018» (Moskva 11-12 maya 2018 g.). Doklady* [Proceedings of the international conference “Radio-electronic devices and systems for infocommunication technologies - REUS-2018” (Moscow, May 11-12, 2018). Reports], Moskva, Rossiya, pp. 65-70.
3. *Losev I.Yu., Berdnikov A.G., Goykhman E.Sh. [i dr.]*. Adaptivnaya kompensatsiya pomekh v kanalakh svyazi [Adaptive compensation of interference in communication channels]. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 208 p.
4. *Mnogofunktsional'naya radiolokatsionnaya stantsiya IRS2-1. Rukovodstvo po ekspluatatsii. IRS2-1.00.00.000RE* [Multifunctional radar station IRS2-1. Manual. IRS2-1.00.00.000RE], 106 p.
5. *Ratynskiy M.V.* Adaptatsiya i sverkhrazreshenie v antennykh reshetkakh [Adaptation and super-resolution in antenna arrays]. Moscow: LENAND, 2022, 240 p.
6. *Skolnik M.* Spravochnik po radiolokatsii [Handbook on radar]: in 4 part. Part 1. Moscow: Sov. Radio, 1976, 456 p.
7. *Uidrou B.* Adaptivnaya obrabotka signalov [Adaptive signal processing]: trans. from engl. Moscow: Radio i svyaz', 1989, 440 p.
8. *Shirman Ya.D., Manzhos V.N.* Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh [Theory and technology of processing radar information against a background of interference]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 416 p.
9. *Shirman Ya.D., Golikov V.N., Busygin I.N. [i dr.]*. Teoreticheskie osnovy radiolokatsii [Theoretical foundations of radar], ed. by Shirmana Ya.D., 443 p.
10. *Shifrin Ya.S.* Antenny [Antennas]. Khar'kov: VIRTA im. Govorova L.A., 1976, 407 p.
11. *Shishov Yu.A., Voroshilov V.A.* Mnogokanal'naya radiolokatsiya s vremennym razdeleniem kanalov [Multichannel time division radar]. Moscow: Radio i svyaz', 1987, 144 p.

12. *Guerci J.R.* Space-time adaptive processing for radar. Boston and London: Artech House, 2015, 298 p.
13. *Hansen R.C.* A One-Parameter Circular Aperture Distributions with Narrow Beam-width and Low Sidelobes, *IEEE trans.*, 1967, Vol. AP-24, pp. 477-480.
14. *Hansen R.C.* Microwave scanning antennas. Vol. 1. Apertures. New York and London, Academic press, 1964. – 536 p.
15. *Hansen R. C.* Microwave scanning antennas. Vol. 2. Array theory and practice. New York and London, Academic press, 1966, 496 p.
16. *Hansen R.C.* Phased array antennas. 2nd ed. Wiley, 2009, 558 p.
17. *Marple Jr.S.L.* Digital spectral analysis with application. 2nd ed. Dover Publications Inc., 2019, 432 p.
18. *Melvin W.L.* Space-time adaptive processing and adaptive arrays: special collection of papers, *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 2000, Vol. 36, No. 2, pp. 508-509.
19. *Monzingo R.A.* Introduction to Adaptive Arrays. New York, John Wiley and sons, 1980, 446 p.
20. *Taylor T.T.* One-Parameter Family of Line Sources Producing Modified $\sin \pi u / \pi$ Pattern, rep. TM 324. Hughes Aircraft Co., Culver City, CA, 1953.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.Л. Приоров.

Лаврентьев Александр Михайлович – Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны; e-mail: alexalawrentew24@icloud.com; г. Ярославль, Россия; тел.: 89108293521; д.т.н.; профессор; начальник кафедры радиотехнических систем.

Калашников Роман Васильевич – e-mail: karomm12@mail.ru; тел.: 89201023588; к.т.н.; старший преподаватель кафедры радиотехнических систем.

Бабушкин Евгений Александрович – e-mail: bebs37@mail.ru; тел.: 89056306556; адъюнкт.

Lavrentyev Aleksandr Mihailovich – Yaroslavl higher military college of air defense; e-mail: alexalawrentew24@icloud.com; Yaroslavl, Russia; phone: +79108293521; dr. of eng. sc.; professor; head of the department of radio engineering systems.

Kalashnikov Roman Vasil'evich – e-mail: karomm12@mail.ru; phone: +79201023588; cand. of eng. sc.; senior lecturer of radio engineering systems.

Babushkin Eugeniĭ Alexandrovich – e-mail: bebs37@mail.ru; phone: 89056306556; adjunct.

УДК 519.714

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-202-213

К.Г. Кебкал, А.А. Кабанов, В.В. Альчаков, В.А. Крамарь, М.Э. Димин

ПРОГРАММНЫЕ ПОДХОДЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В СИСТЕМАХ МОРСКОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ *

При одновременной работе нескольких гидроакустических модемов в районе взаимного покрытия могут возникать коллизии пакетов данных, поступающих на прием от нескольких источников, что приводит к потерям части или всей информации. С ростом числа одновременно работающих гидроакустических модемов алгоритмы физического уровня не обеспечивают стабильную передачу данных и вероятность возникновения коллизий повышается, что делает работу модемов неэффективной или даже невозможной. Для обеспечения эффективной работы в условиях гидроакустической среды распространения сигнала и для уменьшения или исключения коллизий при обмене и доставке данных между двумя модемами, не обладающими возможностью синхронной работы, а также для уменьшения времени доступа к среде распространения сигнала требуются методы уровня управления доступом к среде с применением протоколов канального уровня. Обычно, такая задача решается при помощи кодового разделения гидроакустических

* Работа частично выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект FEFM-2024-0015.

каналов. Модемы общаются как бы на разных частотах, что не создаёт коллизий, это позволяет общаться абонентам подводной сети в формате «точка-точка», либо в режиме «multicast», то есть всем отдельно, однако, в случае, если надо сделать передачу по сети, такой вариант уже не подойдёт, так как сетевая передача, предполагает работу на основе «broadcast» сообщений. При практическом использовании указанные протоколы удобно поместить в состав программной среды разработки (фреймворк) конкретных пользовательских приложений для решения задач сетевой г/а связи. Такой фреймворк принято называть программным каркасом, он позволяет выполнять пользовательскую модификацию имеющихся в составе каркаса сетевых алгоритмов, а также включение силами пользователя новых алгоритмов сетевой гидроакустической связи. Для построения прогнозирующей модели в работе использовались протоколы DACAP, T-Lohi, Flooding и ICRP. Реализация алгоритмов выполнена на языке Erlang. В работе приведены алгоритмы реализации указанных протоколов. Приводится сравнительный анализ сетевой работы с использованием протоколов и без них. Оценена эффективность и скорость работы. Даны рекомендации по дальнейшей разработке программного каркаса.

Морской интернет вещей; гидроакустическая связь; сетевые протоколы; программный каркас.

K.G. Kebkal, A.A. Kabanov, V.V. Alchakov, V.A. Kramar, M.E. Dimin

THE SOFTWARE APPROACHES FOR SOLVING HYDROACOUSTIC COMMUNICATION PROBLEMS IN MARINE INTERNET OF THINGS SYSTEMS

When several hydroacoustic modems operate simultaneously in an area of mutual coverage, collisions of data packets received from several sources may occur, which leads to the loss of some or all information. With the increase in the number of simultaneously operating hydroacoustic modems, physical layer algorithms do not provide stable data transmission and the likelihood of collisions increases, which makes the operation of modems ineffective or even impossible. To ensure effective operation in a hydroacoustic signal propagation environment and to reduce or eliminate collisions during the exchange and delivery of data between two modems that do not have the ability to operate synchronously, as well as to reduce the access time to the signal propagation environment, methods of the medium access control layer are required using link layer protocols. Typically, this problem is solved using code separation of hydroacoustic channels. Modems communicate as if at different frequencies, which does not create collisions, this allows subscribers of the underwater network to communicate in a point-to-point format, or in multicast mode, that is, everyone separately, however, in case it is necessary to make a transmission over the network, this option is no longer suitable, since network transmission involves working on the basis of "broadcast" messages. In practical use, it is convenient to place these protocols into a software development environment (framework) for specific user applications for solving network communication problems. Such a framework is usually called a software framework; it allows for user modification of the network algorithms available in the framework, as well as the inclusion of new network hydroacoustic communication algorithms by the user. To build a predictive model, the DACAP, T-Lohi, Flooding and ICRP protocols were used in the work. The algorithms were implemented in Erlang. The paper presents algorithms for implementing these protocols. A comparative analysis of network operation with and without protocols is provided. Efficiency and speed of work were assessed. Recommendations for further development of the software framework are given.

Marine Internet of Things; hydroacoustic communications; network protocols; software framework.

Введение. В области Морского интернета вещей (МИоТ) накопился задел технических решений, который способен обеспечить быстрое достижение практических результатов на пути создания подводных гидроакустических (г/а) сетей [1]. Совместно работающие подводные агенты, такие как автономные и телеуправляемые подводные аппараты (АНПА/ТНПА), подводные датчики, буи и т.д., требуют постоянного обмена данными [2–5]. Это же относится и к устройствам, действующим в группе, учитывая изменяющуюся геометрию формируемой ими сети из-за изменений положения внутри неё [6]. МИоТ предлагает различные варианты беспроводной связи и формирования сетей на основе г/а, оптической, радиочастотной

связи и связи на основе магнитного синтеза. При этом, г/а связь является наиболее подходящей для подводной среды из-за ее возможностей передачи данных на большие расстояния, от нескольких сотен метров до десятков километров [1, 7–9], имея при этом ряд ограничений [10, 11].

Решение задачи передачи данных под водой с помощью г/а канала предполагает включение г/а модемов в состав сенсорных модулей подводных устройств [12, 13]. Для воздушного пространства существует множество методов для маршрутизации и разрешения коллизий данных, но в гидроакустике они могут применяться не всегда и, как правило, с большими ограничениями.

Для передачи данных в г/а сети, характеризуемой постоянно изменяющимися условиями излучения и приема сигналов, в последнее время получили развитие специализированные сетевые методы, способные учитывать случайным образом меняющееся число узлов сети, находящихся в области взаимной или односторонней "слышимости". Важным направлением в создании сетевых методов связи является развитие алгоритмов формирования ad-hoc сетей [14–16].

Для работы множества устройств в одной зоне покрытия и разрешения коллизий необходимо использование специализированных сетевых протоколов [17–22]. При практическом использовании указанные протоколы удобно поместить в состав программной среды разработки конкретных пользовательских приложений, которую принято называть программным каркасом. Он позволяет выполнять пользовательскую модификацию имеющихся в составе каркаса сетевых алгоритмов, а также включение силами пользователя новых алгоритмов сетевой г/а связи.

Для использования в подводных системах связи на сегодня известны четыре развитых программных каркаса, способных интегрировать разнородные устройства связи и превратить их в сетевые устройства, а также обеспечить возможность гибкой интеграции модемов с различными сенсорными устройствами, исполнительными механизмами, манипуляторами, датчиками или системами датчиков. Эти программные каркасы существуют в открытом доступе: 1) SUNSET (университет "Сапиенца", Италия), 2) DESERT (университет Падуа, Италия), 3) UNetStack (национальный университет Сингапура), и 4) EviNS (компания Evologics, Германия).

Наименее требовательным к вычислительным ресурсам является программный каркас EviNS (Evologics intelligent Networking Software Framework). Он представляет собой компактное ПО с открытым исходным кодом, разработанным на языке программирования Erlang. К преимуществам относится то, что ряд базовых программ, реализующих протоколы управления доступом к среде и протоколы маршрутизации, уже включены в состав программного каркаса.

В качестве образцов модемов, над которыми надстраивается программный каркас EviNS, в данной работе были выбраны два г/а модема: uWave («Лаборатория подводной связи и навигации», Россия) и г/а модем серии S2C (Evologics, Германия) (рис. 1).



Рис. 1. Образцы: а – г/а модем Evologics S2C; б – г/а модемы UC&NL uWave

Для использования обширного задела (встроенных возможностей) программного каркаса EviNS были разработаны пользовательские приложения в виде протоколов уровня управления доступом к среде и протоколов сетевого уровня, кото-

рые оснащались возможностями работы с разными ролями, которые, в свою очередь обеспечивали техническую возможность подключения к программному каркасу EviNS модемов разных производителей (а именно, путем разработки набора ролей, способных выполнять синтаксический разбор наборов команд этих модемов). В частности, для включения г/а модема uWave в состав программного каркаса был разработан синтаксический анализатор команд модема uWave.

В статье для разработки пользовательского программного обеспечения, предназначенного для решения задач сетевой г/а связи в системах МIoT, в качестве программного инструмента предложено использование программного каркаса EviNS, который может быть развернут на стороннем вычислителе или прямо на вычислителе г/а модема и исполняться как часть стандартного ПО, превращая модем из простого устройства симплексной цифровой связи в полноценный узел сетевой связи.

Универсальность и концепция построения программного каркаса EviNS. Программный каркас EviNS обладает универсальностью за счет использования языка программирования Erlang, который обеспечивает возможность кроссплатформенной компиляции разработанного программного каркаса. Это позволяет использовать EviNS на различных вычислительных платформах, включая как настольные ПК, так и встраиваемые системы с невысокой производительностью. Кроме того, универсальность взаимодействия пользовательского приложения с программным каркасом EviNS обеспечивается открытым списком команд в сетевом уровне, позволяя разработчикам разрабатывать собственные команды и макросы для изменения и расширения функциональности программного каркаса. В целом, программный каркас EviNS можно рассматривать, как универсальное средство для разработки пользователем своих собственных приложений, который могут исполняться на вычислительной платформе, выбранной им из широкого круга моделей.

Распространение EviNS осуществляется по лицензиям GPL/MIT, что позволяет свободное использование и распространение каркаса. Исходный код программного каркаса EviNS открыт и расположен на веб-сервисе GitHub (github.com/okebkal/evins). В его состав может также включаться множество пользовательских библиотек с закрытым исходным кодом, запрещая таким образом свободное распространение пользовательской (специализированной) версии программного каркаса.

На рис. 2 представлена базовая концепция программного каркаса EviNS – модель структурирования процессов, основанная на взаимодействии рабочих окружений и супервизоров (<https://github.com/EvoLogics/evins/wiki/arch>). В рабочее окружение входят рабочие процессы, выполняющие полезные вычисления. Это могут быть агенты, интерфейсные обработчики и конфигураторы.

Супервизоры представляют собой процессы, которые следят за функционированием рабочего окружения или за работой других супервизоров. Супервизор может перезапускать процессы рабочего окружения при обнаружении в них сбоев. Как представлено на рис. 2 конечный автомат (КА) - супервизор верхнего уровня (КА-СВУ) отслеживает работу КА конфигулятора программного каркаса (КА-КПК) и КА супервизора агентов (КА-СА). В случае сбоя КА-КПК или одного из КА-СА супервизор верхнего уровня КА-СВУ перезапускает соответствующий процесс, не затрагивая другие запущенные процессы. Каждый КА-СА настраивается и запускается конфигуратором КА-КПК. В соответствии со своей конфигурацией каждый КА-СА запускает и контролирует определенные ему модули, реализующие функции КА рабочего окружения (КА-РО), роли рабочего окружения (РРО) и других КА, в том числе являющихся частью Erlang/OPT. Общий подход в реализации программного каркаса EviNS состоит в разделении кода процесса на общую (функциональные модули) и специальную части (модули обратного вызова).

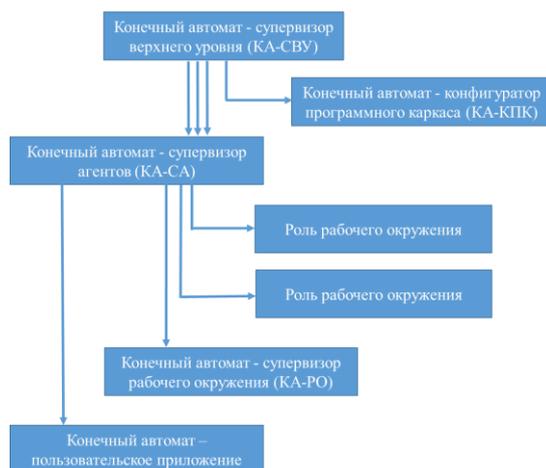


Рис. 2. Модель структурирования процессов – взаимодействие рабочих процессов и супервизоров

Функциональные возможности РРО обеспечивают связь через интерфейсы, поддерживаемые программным каркасом. Интерфейсные обработчики являются реализациями ролей рабочего окружения. Для реализации новых функциональных возможностей РРО необходимо назначение обратных вызовов, отвечающих за синтаксический разбор и за восстановление данных, инициализацию обратного вызова, управление конфигуратором обратного вызова, и остановку обратного вызова при завершении процесса. КА-КПК может контролировать несколько интерфейсных обработчиков в соответствии с конфигурациями агентов. КА-РО поддерживает инициализацию агента и его взаимосвязь с интерфейсными обработчиками. КА обеспечивает запуск в работу таких агентов, как пользовательский конечный автомат или автомат с магазинной памятью.

Агенты, каждый из которых явно определен в виде конечного автомата или автомата с магазинной памятью, управляются событиями, генерируемыми извне интерфейсными обработчиками или внутри обработчиками событий или таймерами. Они изолированы друг от друга для защиты от сбоев, гарантируя, что сбой одного агента не повлияет на работу другого. Работа каждого агента контролируется супервизором, который в случае ошибки перезапускает его. Агенты, как автономные программные компоненты, обладают четко определенными функциями и интерфейсами для обмена сообщениями. Интерфейсные обработчики связывают агентов с внешними процессами, а конфигурация агентов определяется конфигуратором или агентом конфигурирования.

В программном каркасе EviNS используются четыре типа интерфейсов (рис. 3): 1. Сокет TCP (может использоваться как для взаимодействия агента с агентом, так и для взаимодействия агента с внешним приложением); 2. Порт Erlang (обеспечивает основной механизм связи с внешним миром, можно использовать только для взаимодействия агентов с внешними приложениями). 3. Очередь сообщений Erlang (используется для прямого обмена сообщениями между агентами без синтаксического разбора данных интерфейсными обработчиками); 4. HTTP-сервер Cowboy. Это небольшой, быстрый и модульный сервер HTTP, написанный на Erlang. Преобразует действия пользователя в веб-браузере в сообщения, доставляемые через интерфейсные обработчики агентам, и формирует необходимые уведомления на запросы пользователя.

На этом стоит остановиться подробнее. На данный момент EviNS включает в свой состав роль АТ-команд, которая выполняет функцию синтаксического анализатора только для команд г/а модема компании Evologics. В то же время существует большое число производителей г/а модемов, которые не имеют прямой возможности использовать протоколы EviNS для собственных задач сетевой г/а связи.

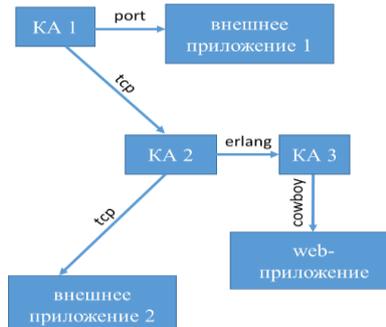


Рис. 3. Типы интерфейсов, используемых в программном каркасе EviNS

Для решения задачи интеграции произвольного г/а модема с EviNS есть два пути. Первый состоит в изменении роли АТ-команд, чтоб протоколы канального и сетевого уровней смогли работать с командами выбранного модема. Второй путь состоит во встраивании в EviNS дополнительных ролей, которые бы наряду с ролью АТ-команд, обеспечивали возможность работы протоколов канального и сетевого уровней с командами сторонних модемов. Для подключения к EviNS любого другого модема в каркас должна быть включена дополнительная (вновь разработанная) модификация протокола уровня управления доступом к среде, и, кроме нее, также дополнительная (вновь разработанная) модификация сетевого протокола. Т.е. сколько модемов необходимо подключить к EviNS, столько и пар модифицированных или вновь разработанных пар протоколов необходимо иметь в составе программного каркаса. Для каждого из модемов понадобится также разработка роли, обеспечивающей синтаксический разбор команд соответствующего модема.

Благодаря открытости кода EviNS, все это реализуемо, однако, такая реализация требует существенного изменения программного каркаса. Во многих смыслах что-либо менять в хорошо работающем программном каркасе нежелательно. В связи с этим, на наш взгляд существует еще один путь, который состоит в том, чтобы не изменять программный каркас, а добавлять в него только такие приложения, которые изначально были бы способны работать не с одним, а разными модемами (с разными ролями). Т.е. в дополнение к существующему протоколу или вместо него можно разработать протокол, который бы работал не только с ролью АТ-команд, но также и с ролями других команд. Это смогло бы существенно сократить затраты на расширение возможностей программного каркаса, в частности, дополнением его возможностями создания гидроакустических сетей на основе г/а модемов разных производителей. В свою очередь, это способствовало бы расширению круга прикладных задач Морского интернета вещей.

В рамках текущей работы для расширения возможностей программного каркаса выполнена разработка пользовательских протоколов уровня управления доступом к среде и протоколов сетевого уровня, которые способны работать с множеством ролей, обеспечивающих выполнение функций синтаксического анализатора команд г/а модемов разных производителей – г/а модема uWave и г/а модема Evologics. Такие роли позволяют выполнять синтаксический разбор команд соответствующего модема и конвертировать их в формат внутренних сообщений,

свойственных приложениям EviNS. Также и в обратную сторону – выполнять синтаксический разбор команд от приложений EviNS и конвертировать их в формат внутренних сообщений соответствующего модема.

Ниже представлено описание протоколов сетевого и канального уровней, реализованных и внедренных авторами для использования в составе программного каркаса EviNS.

Протоколы канального и сетевого уровня. Для обеспечения эффективной работы в условиях г/а среды распространения сигнала и для уменьшения или исключения коллизий при обмене и доставке данных на модемы, не обладающие возможностью синхронной работы, а также для уменьшения времени доступа к среде распространения сигнала был разработан алгоритм передачи данных с применением протокола канального уровня DACAP. Это асинхронный протокол управления доступом к среде, он основан на подтверждении приёма-передачи отдельных соединений между модемами.

Для осуществления обмена данными модем-отправитель, планирующий передать информацию другому модему, генерирует запрос на разрешение передачи (RTS). При получении запроса на отправку данных (RTS) г/а модем немедленно отправляет в ответ запрос на готовность к отправке (CTS), затем ожидает пакет данных. Когда после отправки пакета, разрешающего передачу, модем-получатель обнаруживает активность в среде распространения, которая может привести к повреждению сигнала, он генерирует короткий предупредительный сигнал, что приводит к остановке передачи сообщения. После получения разрешающей команды модем-отправитель выдерживает краткую паузу. Если в течение этой паузы происходит активность других модемов или модем-отправитель получает предупреждающий сигнал от модема-получателя, передача данных отменяется.

Для подводной г/а сети сенсоров малого радиуса действия разработан энергоэффективный протокол T-Lohi, который обеспечивает стабильный доступ к среде передачи при условии небольшой мощности бортового передатчика и небольшого энергоресурса. Протокол обладает механизмом резервирования каналов, гарантирующим отсутствие коллизий между сообщениями при передаче. Помимо программной реализации, протокол подразумевает наличие специального оборудования, имеющего функцию пробуждения по тональному сигналу. Таким образом достигается решение проблемы конфликтов при резервировании каналов без необходимости больших энергозатрат.

Существуют три различные реализации данного протокола: ST-Lohi (синхронизированный T-Lohi), обеспечивающий наиболее энергоэффективную передачу, aUT-Lohi (Aggressive Unsynchronized T-Lohi), позволяющий организовать максимальную из трёх реализаций пропускную способность, и cUT-Lohi (консервативный несинхронизированный T-Lohi), который обеспечивает наиболее надёжную передачу данных практически без потерь.

Протокол T-Lohi основан на использовании коротких сообщений (тонов) для резервирования канала связи и разрешения конкурентных запросов на доступ к каналу от других узлов сети. Принцип работы протокола состоит в том, что при наличии данных для передачи у того или иного узла, он уведомляет об этом остальные устройства и входит в соревновательный круг (CR). Каждое устройство, получившее тон, переходит в состояние “Backoff” на период w – нормально распределённое случайное значение, лежащее в диапазоне от 0 до CTS (число претендентов). Резервирует канал в итоге то устройство, которое раньше всех вышло из состояния “Backoff” или то, которое в него не входило. Для остальных начинается следующий соревновательный раунд.

Для обнаружения коллизий и оценки числа соперников используется механизм разрешения коллизий, учитывающий пространственно-временную неопределённость и большую латентность доставки пакетов данных. По числу пришедших тонов

происходит подсчёт претендентов на канал (СТС). Когда устройство приняло тон, оно уходит в состояние "Backoff". Если по истечению CR устройство не вошло в "Backoff", оно резервирует канал для передачи пакета данных и выходит из CR.

Flooding – протокол сетевого уровня, является частью протоколов маршрутизации, при которой пакеты отправляются всем узлам сети. Это поведение известно как «затопление». Если «затопление» не контролируется, каждый узел пересылает пакеты всем соседям, что приводит к неуправляемым ширококвещательным сообщениям и отказу сети («широковещательный шторм»). Это значительно замедляет пропускную способность и требует больших сетевых ресурсов. Для предотвращения «широковещательного шторма» реализуется условная логика с помощью протокола DPFlooding (Dynamic Probabilistic Flooding) – протокола маршрутизации, основанного на динамическом вероятностном «затоплении». Протокол принимает решение о перенаправлении поступившего пакета данных, исходя из текущего числа доступных соединений.

ICRP (Information-Carrying Based Routing Protocol) – протокол маршрутизации, основанный на передаче совмещенных пакетов со служебной информацией и полезными данными, У этого вида протоколов служебные данные, предназначенные для установления маршрута доставки, передаются как часть пакета с данными полезной нагрузки. Благодаря этому, механизм маршрутизации и передачи данных является эффективным с точки зрения потребления энергии и характеризуется относительно малым временем маршрутизации. Он не зависит от числа участников сети и их взаимного расположения и, соответственно, легко масштабируется для произвольного числа участников, их пространственного разнесения и/или мобильности.

Каждый узел на постоянной основе ширококвещательно посылает свою таблицу маршрутизации всем своим соседям. После получения узлом этой информации от соседа, происходит сравнение полученной таблицы маршрутизации со своей. Маршруты в полученной таблице сравниваются маршрутизатором с маршрутами в его таблице маршрутизации. Если новый маршрут имеет лучшую метрику, он может заменить существующий. Для оптимизации работы протокола используется обобщенная метрика, которая служит для более точной характеристики маршрута. Для обеспечения устойчивости маршрутизации вместо использования одного маршрута с наименьшей метрикой, трафик может распределяться по нескольким маршрутам, чьи метрики попадают в указанный диапазон.

Маршрут, имеющий наименьшую обобщенную метрику, будет наиболее предпочтительным. Поскольку пакет управления установлением маршрута передается пакетом данных, механизм передачи информации не только энергоэффективен, но и обеспечивает низкую задержку доставки из конца в конец.

Экспериментальная часть. При последовательной передаче пакетов от одного устройства к другому в условиях, указанных выше, метрики приведены на рис. 4,а. Успешность доставки данных – 96%, среднее время доставки – 1.5 секунды (с учётом расстояния), усреднённая скорость передачи (с учетом потерянных пакетов) – 104 байт/сек. Отметим, что протокол физического уровня, может позволить получить пакет, отправить квитанцию отправителю, но пакет может содержать ошибки.

При попытке принять информацию от двух устройств одновременно, возникают коллизии, приводящие к повреждениям пакетов (рис. 4,б). Успешность доставки данных составляет 56-63%, среднее время передачи – 2.8 секунды (с учётом расстояния), усреднённая скорость передачи (с учетом потерянных пакетов) – 98-130 байт/сек. Это свидетельствует о том, что коллизии, которые возникли с увеличением количества модемов приводят к увеличению нагрузки на принимающий модем и, как следствие, к повреждению пакетов.

Метрики, полученные при передаче данных с использованием протокола канального уровня DACAP, приведены на рис. 4,в. Успешность доставки данных составляет 100%, среднее время доставки – 2.7 секунды (с учётом расстояния), усреднённая скорость передачи – 93 байт/сек.

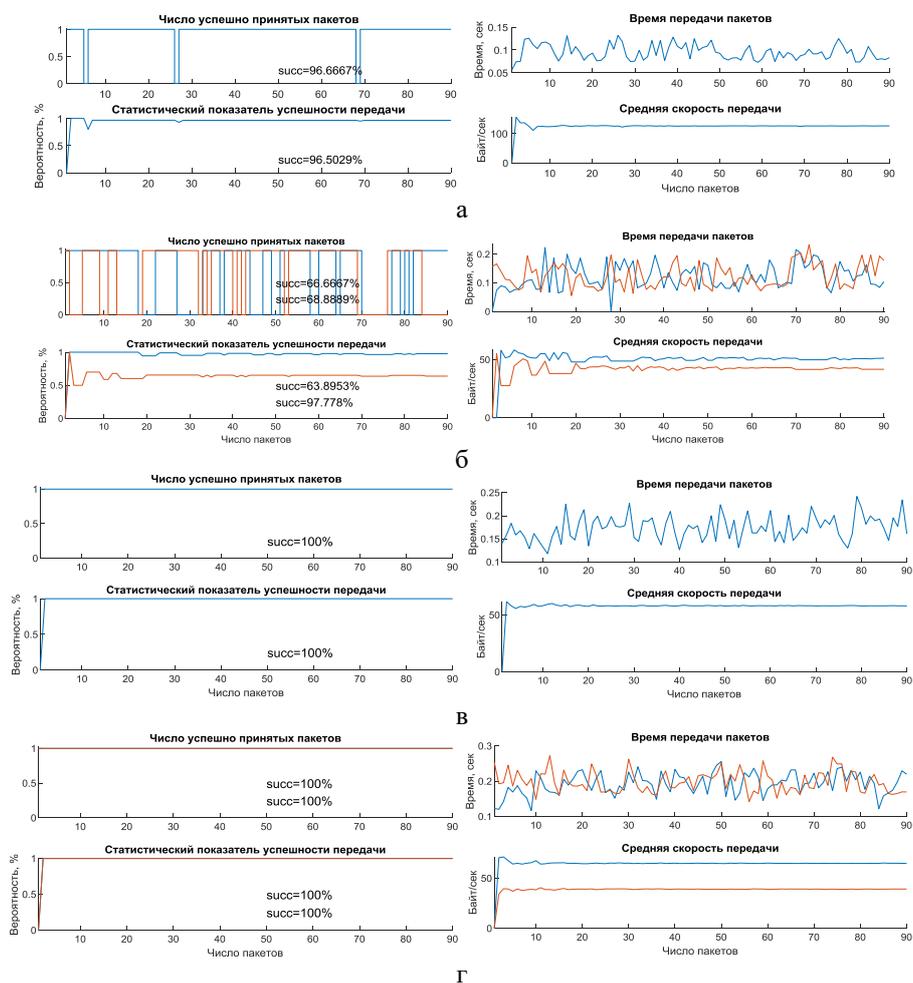


Рис. 4. Графики метрик для случаев: а – передачи в формате «точка-точка»; б – передачи одновременно с двух устройств; в – передачи с использованием протокола DACAP; г – передачи одновременно с двух устройств при использовании протокола DACAP

Использование протокола DACAP повысило надёжность до 100%. Такой результат был достигнут за счёт введения «рукопожатий» и контроля ошибочных пакетов. С использованием протокола, при передаче данных возросла нагрузка на пропускную способность, поэтому средняя скорость с учётом контроля пакетов (ретрансляция) и рукопожатий стабилизировалась на показателе ниже (93 байт/сек).

Метрики, полученные при одновременной передаче данных с двух модемов на один приведены на рис. 4,г. Успешность доставки данных составляет 100%, среднее время доставки – 2.8-3.8 секунды, усреднённая скорость передачи – 49-67 байт/сек.

Несмотря на возросшую нагрузку, благодаря использованию протокола DACAP, надёжность передачи была на уровне 100%, однако скорость передачи, в этом случае, упала до 49-67 байт в секунду.

Проиллюстрируем результаты тестирования протокола сетевого уровня. Пусть очередность передачи пакетов в сети, заданной модемами, расположенными как указано на рис. 5,а. Для передачи данных использовался стек, состоящий из сетевого протокола Flooding и канального протокола DACAP.

Среднее время доставки данных (через всю сеть) составляет 6.7 секунд. Среднее время доставки между двумя узлами – 3.4 секунды. Усреднённая скорость передачи (с учетом потерянных пакетов) составляет 7 байт/сек.

Сетевой протокол Flooding позволяет опосредовано передавать пакеты внутри сети, время и количество принятых пакетов конечным устройством зависит от максимального количества пролетов сети.

Метрики, полученные при передаче данных приведены на рис. 5,б.

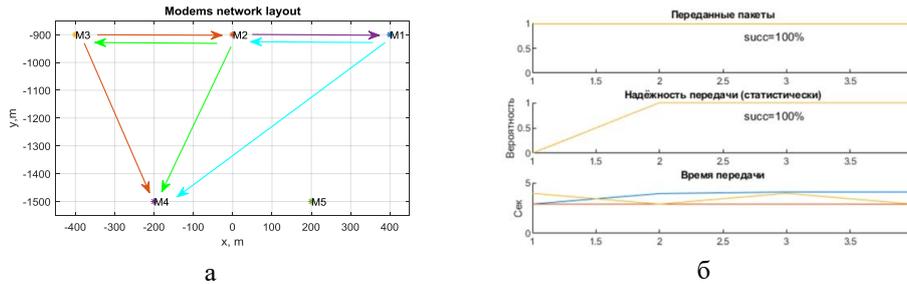


Рис.5. а – очерёдность передачи пакетов внутри сети; б – метрики, полученные при передаче данных между устройствами внутри сети

Заключение. В статье приведены результаты разработки пользовательской надстройки для программного каркаса EviNS, которая решает задачу реализации сетевой г/а связи. Надстройка включает в себя стек протоколов канального уровня DACAP и T-Lohi, служащих для обработки коллизий и основывающихся на использовании физических задержек при передаче. Стек протоколов сетевого уровня DPflooding и ICRP служит для объединения группы г/а модемов в сеть и для достижения устойчивой передачи пакетов полезных данных внутри этой сети. Исследование параметров передачи данных по г/а каналу показало, что внедрение протоколов сетевой связи позволило повысить вероятность успешного обмена пакетами данных между группой устройств ценой потерь скорости, возникающих в виду манипулирования значениями задержек при передаче. С использованием протоколов, вероятность успешной отправки пакета с данными устремляется к 100%, однако скорость передачи может быть снижена. Таким образом, подтверждается надёжность и скоростная разница примерно в два раза. В сумме, программный каркас EviNS с реализованными в нём протоколами подводной сетевой г/а связи может быть эффективным образом внедрён в концепцию МIoT или группового управления подводными роботами, где важна надёжность канала связи, поскольку повреждённые данные, представляющие собой навигационную информацию или управляющие сигналы для других устройств, могут привести к неверно обработанным командам подводного аппарата и аварийным ситуациям.

Работа выполнена в рамках выполнения проекта FEFM-2024-0015 и внутреннего гранта Севастопольского государственного университета 42-01-09/241/2022-2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kabanov A., Kramar V. Marine Internet of Things Platforms for Interoperability of Marine Robotic Agents: An Overview of Concepts and Architectures // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – No. 9 (10). – 1279.
2. Abreu P. Widely Scalable Mobile Underwater Sonar Technology: An Overview of the H2020 WiMUST Project // Marine Technology Society Journal. – 2016. – No. 4 (50), pp. 42-53.
3. Ali M.F. Recent Advances and Future Directions on Underwater Wireless Communications, Archives of Computational Methods in Engineering, 2020, No. 5 (27), pp. 1379-1412.
4. Dikarev A. Position Estimation of Autonomous Underwater Sensors Using the Virtual Long Baseline Method, International Journal of Wireless & Mobile Networks, 2019, No. 2 (11), pp. 13-25.

5. Chitre M., Bhatnagar R., Soh W.-S. UnetStack: An agent-based software stack and simulator for underwater networks St. John's, NL: IEEE, 2014.
6. Shah S.M. Advancements in Neighboring-Based Energy-Efficient Routing Protocol (NBEER) for Underwater Wireless Sensor Networks, *Sensors*, 2023, No. 13 (23), 6025.
7. Heidemann J., Stojanovic M., Zorzi M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, No. 1958 (370), pp. 158-175.
8. Schirripa Spagnolo G., Cozzella L., Leccese F. Underwater Optical Wireless Communications: Overview, *Sensors*, 2020, No. 8 (20), 2261.
9. Islam K.Y. Green Underwater Wireless Communications Using Hybrid Optical-Acoustic Technologies, *IEEE Access*, 2021, 9, pp. 85109-85123.
10. Gupta S., Singh N. P. Underwater wireless sensor networks: a review of routing protocols, taxonomy, and future directions, *The Journal of Supercomputing*, 2023, 3681.
11. Hanashi A. M., Algoul S. The Effectiveness of Dynamic Probabilistic Flooding in On-Demand Routing Protocols for MANETs was Assessed Through a Performance Analysis, *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, 2023, No. 5 (1), pp. 935-941.
12. ISO/IEC 30140-1:2018, Information technology – Underwater acoustic sensor network (UWASN). – Part 1: Overview and requirements.
13. Leonov A., Naniy O., Treshchikov V. Sovershenstvovanie formatov modulyatsii v opticheskikh sistemakh svyazi dwdm [Improving modulation formats in dwdm optical communication systems], *LAST MILE Russia*, 2019, No. 8 (85), pp. 30-36.
14. Petrioli C. The SUNSET framework for simulation, emulation and at-sea testing of underwater wireless sensor networks, *Ad Hoc Networks*, 2015, 34, pp. 224-238.
15. Sasson Y., Cavin D., Schiper A. Probabilistic broadcast for flooding in wireless mobile ad hoc networks New Orleans, LA, USA: IEEE, 2003.
16. Shang W. Vectorsync: distributed dataset synchronization over named data networking, *Proceedings of the 4th ACM Conference on Information-Centric Networking*, 2017, pp. 192-193.
17. Peleato B., Stojanovic M. Distance aware collision avoidance protocol for ad-hoc underwater acoustic sensor networks, *IEEE Communications Letters*, 2007, No. 12 (11), pp. 1025-1027.
18. Petrioli C., Petroccia R., Stojanovic M. A comparative performance evaluation of MAC protocols for underwater sensor networks, Quebec City, QC: IEEE, 2008.
19. Syed A.A., Ye W., Heidemann J. T-Lohi: A New Class of MAC Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2008.
20. Syed A.A., Ye W., Heidemann J. Comparison and Evaluation of the T-Lohi MAC for Underwater Acoustic Sensor Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, No. 9 (26), pp. 1731-1743.
21. Abu Zant M., Yasin A. Avoiding and Isolating Flooding Attack by Enhancing AODV MANET Protocol (AIF_AODV), *Security and Communication Networks*, 2019, pp. 1-12.
22. Liang W. Information-Carrying Based Routing Protocol for Underwater Acoustic Sensor Network, Harbin, China: IEEE, 2007.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.Н. Греков.

Кебкал Константин Георгиевич – Севастопольский государственный университет; e-mail: konstantin.kebkal@latena.ru; г. Севастополь, Россия; д.т.н.; ведущий научный сотрудник НИЛ «Робототехника и интеллектуальные системы управления».

Кабанов Алексей Александрович – e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; тел.: +79787622582; к.т.н.; доцент; директор Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем.

Альчаков Василий Викторович – e-mail: alchakov@mail.ru; тел.: +79787489941; к.т.н.; доцент кафедры «Информатика и управление в технических системах».

Крамарь Вадим Александрович – e-mail: kramarv@mail.ru; тел.: +79787927340; д.т.н.; профессор кафедры «Информатика и управление в технических системах».

Димин Максим Эдуардович – e-mail: dimin.maksim@yandex.ru; тел.: +79788112909; лаборант-исследователь НИЛ «Робототехника и интеллектуальные системы управления».

Kebkal Konstantin Georgievich – Sevastopol State University; e-mail: konstantin.kebkal@latena.ru; Sevastopol, Russia; dr. of eng. sc.; leading researcher at the Research Laboratory of Robotics and Intelligent Control Systems.

Kabanov Aleksey Aleksandrovich – e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; phone: +79787622582; cand. of eng. sc.; associate professor of the department «Informatics and Control in Technical Systems».

Alchakov Vasilii Viktorovich – e-mail: alchakov@mail.ru; phone: +79787489941; cand. of eng. sc.; associate professor of the department «Informatics and Control in Technical Systems».

Kramar Vadim Aleksandrovich – e-mail: kramarv@mail.ru; phone: +79787927340; dr. of eng. sc.; associate professor of the department «Informatics and Control in Technical Systems».

Dimin Maksim Eduardovich – e-mail: dimin.maksim@yandex.ru; phone: +79788112909; laboratory research assistant, Research Laboratory "Robotics and Intelligent Control Systems".

УДК 004.02:007.52

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-213-225

Ю.С. Баричев, О.П. Гойдин, В.П. Носков, С.А. Собольников

**ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ
РОБОТОВ ВОЗДУШНОГО И НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ
В УРБАНИЗИРОВАННОЙ СРЕДЕ**

Обоснована возрастающая в последнее время востребованность использования гетерогенных групп роботов (роботов воздушного и наземного базирования) повышенной автономности при проведении спецопераций в индустриально-городских средах, включая здания. Сформулирована актуальная задача формирования по данным бортовых систем технического зрения беспилотного летательного аппарата информационно-навигационного поля, обеспечивающего автономный целенаправленный безопасный полет и движение роботов воздушного и наземного базирования в экранированных зонах урбанизированной среды. Формирование обобщенной геометрической модели внешней среды можно обеспечить путем задания множества целевых положений в плане рабочей зоны, которые должен посетить БПЛА в заданной последовательности и вернуться в точку старта. В процессе посещения достижимых целевых точек формируется обобщенная геометрическая модель внешней среды и определяются текущие координаты БПЛА. Описаны методы и алгоритмы построения различных моделей внешней среды и решения навигационной задачи, которые обеспечивают планирование и отработку целенаправленных безопасных траекторий движения в реальном времени по данным бортовых средств, что и является основой автономного управления в том числе и управления гетерогенной группой роботов. В основу систем автономного управления движением роботов воздушного и наземного базирования положены методы и алгоритмы выделения семантических объектов (плоскостей опорной поверхности и вертикальных стен), которыми изобилуют урбанизированные среды, и экстремальной навигации по двумерным горизонтальным сечениям 3D-изображений (облакам точек), полученным с помощью лидара или камеры глубины. Приведены результаты работы созданных программно-аппаратных средств систем автономного управления роботами воздушного и наземного базирования по формированию информационно-навигационных полей и решению навигационных задач по данным бортовых систем технического зрения в реальной индустриально-городской среде, подтвердившие эффективность и практическую ценность предлагаемых методов и алгоритмов. Использование единого информационно-навигационного поля, с одной стороны, существенно повышает автономность группы роботов за счет возможности самостоятельного планирования действий при выполнении сложных спецопераций, а с другой стороны, повышает ситуационную осведомленность операторов роботов, предоставляя в удобной форме информацию о месте проведения работ.

Беспилотный летательный аппарат, наземный мобильный робот, групповое управление, локализация, картографирование.

Yu.S. Barichev, O.P. Goydin, V.P. Noskov, S.A. Sobolnikov

THE INFORMATION AND NAVIGATION FIELD CONSTRUCTING SYSTEM FOR UGV AND UAV IN AN URBAN ENVIRONMENT

The recent increasing demand of heterogeneous groups of robots (UAV and UGV) with increased autonomy when conducting special operations in industrial and urban environments is substantiated. The urgent task of forming, based on data from UAVs on-board computer vision systems, an information and navigation field that ensures autonomous targeted safe UAVs and UGVs movement in shielded areas of an urban environment is formulated. The formation of a generalized geometric model of the external environment can be achieved by specifying a set of target positions in terms of the working area, which the UAV must visit in a given sequence and return to the starting point. In the process of visiting achievable target points, a generalized geometric model of the external environment is formed and the current coordinates of the UAV are determined. Methods and algorithms for constructing various models of the external environment and solving navigation tasks are described, which ensure planning and executing of targeted safe movement trajectories in real time according to on-board data, which is the basis of autonomous control, including the heterogeneous robots' groups control. Autonomous control systems for the movement of UAVs and UGVs are based on methods and algorithms for identifying semantic objects (supporting surface planes and vertical walls), which abound in urban environments, and extreme navigation using 3D images (point clouds), obtained from lidar or depth cameras. The results of experiments on the information and navigation fields creation and solving navigation tasks based on on-board computer vision data in a real industrial-urban environment are presented, confirming the effectiveness and practical value of the proposed methods and algorithms. The use of a single information and navigation field, on the one hand, significantly increases the autonomy of a group of robots due to the ability to independently plan actions when performing complex operations, and on the other hand, increases the situational awareness of robot operators by providing information about the working space in a convenient form.

UAV, UGV, mobile robot, group control, multi-agent, SLAM.

Введение. Широкое развитие и применение при выполнении различных гражданских и специальных операций, особенно в условиях опасных для человека, получили наземные робототехнические комплексы (РТК) и беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащенные в настоящее время в основном системами дистанционного управления. Подавляющее число операций с использованием робототехнических средств (ликвидация пожаров, аварий и катастроф, борьба с терроризмом, военные действия и т.д.) проводится в индустриально-городских средах, включая здания (плотная городская застройка, промышленные территории, цеха, атомные станции, вокзалы, торгово-развлекательные центры и т.д.), где РТК и БПЛА с системами дистанционного управления имеют ряд принципиальных недостатков и ограничений, обусловленных избытком в таких средах экранированных зон, значительно ограничивающих устойчивую работу каналов связи и средств спутниковой навигации.

При планировании специальных операций на первое место выходит оперативность получения разведывательной информации. Перспективным здесь является применение БПЛА. По сравнению с наземными РТК, БПЛА обладают более высокими скоростью передвижения и маневренностью, большей дальностью действия и обзора и могут свободно перемещаться в пространстве, благодаря чему появляется возможность преодоления завалов и препятствий типа тупиков и лабиринтов, посещения смежных участков обследуемой зоны через проёмы в потолке или стенах. Современные БПЛА специального и гражданского назначения оснащены в основном системами дистанционного управления, дополненными в некоторых случаях элементами автономности, ограничивающимися автопилотированием по заранее заданной траектории по данным спутниковой и инерциальной навигации в условиях свободной от препятствий зоны полёта. Даже кратковременная потеря связи с дистанционно-управляемыми БПЛА в условиях плотной

городской застройки, а тем более в зданиях, практически гарантированно приводит к его потере. Традиционное автопилотирование здесь также невозможно из-за наличия множества препятствий в зоне полета, неустойчивой работы средств спутниковой навигации и недостаточная точность инерциальных систем навигации. То же самое можно сказать и о наземных РТК. Поэтому, несомненно, задачи повышения автономности РТК и БПЛА, ориентированных на использование в индустриально-городских средах, являются актуальными, особенно при их групповом применении. Центральными задачами здесь являются задачи формирования модели внешней среды и определение координат объектов управления по данным бортовых средств, решение которых в реальном времени позволяет автоматизировать процесс нахождения и отработки целенаправленных безопасных траекторий в средах с препятствиями, что и является основой автономного движения РТК и полета БПЛА в таких средах [1, 2]. Эффективное применение группы гетерогенных роботов (в рассматриваемом случае роботов наземного и воздушного базирования) требует не только повышения уровня их автономности, но и нуждается в едином информационно-навигационном поле для организации совместного выполнения общей задачи. Единое информационно-навигационное поле, содержащее обобщенную модель внешней среды и координаты членов группы, позволяет планировать и обрабатывать согласованные в пространстве и времени траектории движения и полета, что и обеспечивает на практическом уровне реализацию автономного и группового управления.

Наиболее простым и наиболее часто востребованным сценарием группового применения гетерогенных роботов является использование автономного разведывательного БПЛА для формирования информационно-навигационного поля, обеспечивающего автономное планирование и отработку траекторий движения как БПЛА, так и РТК или их группы, способных, в отличие от БПЛА, нести и применять более тяжелое и энергоемкое бортовое оборудование (средства пожаротушения, взятия проб, дезактивации вредных веществ, оружие и т.д.). Кроме того, автономный разведывательный БПЛА может формировать и план зоны интереса или визуально-подобную модель внешней среды [3], которые могут быть использованы для повышения ситуационной осведомленности операторов и планирования действий живой силы, возможно совместно с РТК.

Исследования по решению задачи построения информационно-навигационного поля для группы роботов в настоящее время активно ведутся во всем мире, однако основная масса исследований посвящена совместному решению SLAM задачи, что требует постоянного обмена данными между роботами группы и/или сервером [4–6]. Обеспечение устойчивой связи осложнено в условиях индустриально-городской застройки. В настоящей статье предлагается автономное (независимое от других агентов) формирование информационно-навигационного поля с помощью БПЛА с последующей передачей его наземным роботам. Также отличительной особенностью настоящей статьи является использование для навигации БПЛА и РТК выделенных плоских горизонтальных и/или вертикальных объектов (дорог, стен, полов, потолков), что существенно повышает точность локализации.

Навигационная система БПЛА в урбанизированной среде. Создание бортовой системы управления БПЛА при жестких масса-габаритных и энергетических ограничениях, обеспечивающей автономный безопасный целенаправленный полет в данных средах, требует решения ряда сложных научно-технических задач. Центральными задачами здесь являются задачи формирования объемной модели внешней среды и определение всех 6-и координат объекта управления по данным бортовых средств [2].

Для формирования трехмерной модели внешней среды БПЛА в качестве системы технического зрения (СТЗ) можно использовать 3D-лазерный сенсор с телесным углом обзора (лидар), позволяющий формировать 3D-изображения (объемные

облака точек) внешней среды. Тогда, используя инерциальные датчики крена и тангажа, полную навигационную задачу определения всех шести координат объекта управления в индустриально-городских средах можно решить так, как предлагается в [2]: по показаниям инерциальных датчиков, определить координату высоты (H), как вертикальное измерение из облака точек (перпендикуляр к горизонтальной опорной поверхности), а остальные координаты (две линейные X , Y и курс φ), как сумму приращений этих координат, вычисленных с помощью алгоритма экстремальной навигации по горизонтальным 2D-изображениям [1, 7], выделяемым из последовательности 3D-изображений, формируемых в процессе полета, с учетом текущего крена и тангажа. Однако, при таком подходе достичь приемлемую точность решения навигационной задачи возможно только при точных показаниях инерциальных датчиков, для получения которых требуется обеспечить плавность полета и периодическую коррекцию их показаний. В реальных же условиях полета БПЛА мультироторного типа плавность полета и коррекцию показаний инерциальных датчиков далеко не всегда возможно обеспечить. Кроме того, определение высоты через непосредственные измерения лидара с учетом даже точных углов крена и тангажа также не всегда возможно, так как на горизонтальных опорных поверхностях (дорогах, площадях, полах, ...) реальной индустриально-городской среды и помещений могут находиться, как возвышающиеся предметы (строения, машины, мебель, ...), так и углубления.

Для преодоления отмеченных недостатков и повышения точности и достоверности решения полной навигационной задачи в данных условиях перспективным является использование для определения высоты полета, крена и тангажа выделяемых в 3D-изображениях плоских горизонтальных и/или вертикальных объектов (дорог, стен, полов, потолков) [8, 9], которыми изобилуют индустриально-городские среды и помещения. В частности, если из облака точек в системе координат xuz , связанной с сенсором (рис. 1), выделена горизонтальная плоскость P_1 (например, пол или дорога) в нормальной форме $x\cos(\alpha_1)+y\cos(\beta_1)+z\cos(\gamma_1)=\rho_1$, то по свободному члену (перпендикуляр к плоскости P_1) определяется высота полета $H = \rho_1$.

Крен Θ и тангаж γ могут быть вычислены из вертикального единичного вектора $e_1 = \langle \cos(\alpha_1), \cos(\beta_1), \cos(\gamma_1) \rangle$, перпендикулярного к горизонтальной плоскости P_1 (рис. 1).

Кроме того, если из облака точек выделены две вертикальные плоскости P_2 и P_3 не параллельные друг другу (например, стены) в нормальной форме $x\cos(\alpha_2)+y\cos(\beta_2)+z\cos(\gamma_2)=\rho_2$ и $x\cos(\alpha_3)+y\cos(\beta_3)+z\cos(\gamma_3)=\rho_3$ (рис. 1), то векторное произведение двух горизонтальных единичных векторов $e_2 = \langle \cos(\alpha_2), \cos(\beta_2), \cos(\gamma_2) \rangle$ и $e_3 = \langle \cos(\alpha_3), \cos(\beta_3), \cos(\gamma_3) \rangle$, перпендикулярных к вертикальным плоскостям P_2 и P_3 , дает вертикальный вектор:

$$e_{23} = \overrightarrow{e_2 \times e_3},$$

что также позволяет вычислить крен и тангаж.

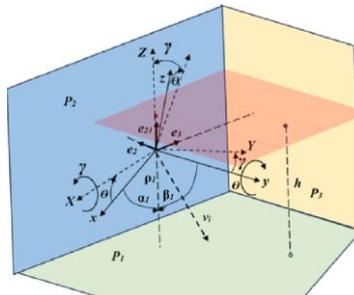


Рис. 1. Положение сенсора (объекта управления) и плоских объектов среды

Необходимо отметить, что плоские объекты выделяются в облаках точек даже при значительном количестве помех – затеняющих их предметов (например, для горизонтальной опорной поверхности – возвышающихся предметов и углублений), что повышает точность, достоверность и надежность определения координат H , Θ и γ по сравнению с подходом, предложенным в [2].

После определения углов крена и тангажа исходное облако точек ($w = \{v_i = \langle x_i, y_i, z_i \rangle\}, i=1, 2, \dots, n$) может быть преобразовано из подвижной системы координат xuz , жестко связанной с СТЗ (объектом управления), также в подвижную систему координат XYZ , но приведенную к местной вертикали в соответствии с принятой на рис. 1 последовательностью поворотов:

$$V_i = A_x(\gamma) \times A_y(\Theta) \times v_i, (i=1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

где $A_y(\Theta)$ и $A_x(\gamma)$ – матрицы поворота на углы крена Θ и тангажа γ вокруг соответствующих осей;

v_i – вектор i -й точки в системе координат сенсора xuz ;

V_i – вектор i -й точки, приведенный в систему координат с местной вертикалью XYZ ;

n – количество точек в облаке.

В облаке точек, приведенных к местной вертикали ($W = \{V_i = \langle X_i, Y_i, Z_i \rangle\}, i=1, 2, \dots, n$), при известной высоте полета $H = \rho_1$ можно выделить подмножество точек, принадлежащих горизонтальному сечению $G(h)$ на заданной высоте h над опорной горизонтальной поверхностью – плоскостью P_1 :

$$V_i \in G(h), \text{ если } Z_i = (h - \rho_1) \pm \delta. \quad (2)$$

где δ – интервал разброса измерений лидара, определяемый такими его характеристиками, как точность и подробность формируемых 3D-изображений.

Полная навигационная задача при перемещении БПЛА из положения O_1 в положение O_2 (рис. 2) при формировании в этих положениях облаков точек $w_1 = \{v_{1i}\}$ и $w_2 = \{v_{2i}\}$ ($i=1, 2, \dots, n$) в соответствии с вышеизложенным будет решаться следующим образом:

1) В облаках точек w_1 и w_2 выделяются уравнения $x \cos(\alpha_{11}) + y \cos(\beta_{11}) + z \cos(\gamma_{11}) = \rho_{11}$ и $x \cos(\alpha_{21}) + y \cos(\beta_{21}) + z \cos(\gamma_{21}) = \rho_{21}$ опорной горизонтальной плоскости P_1 , что позволяет определить высоты полета ($H_1 = \rho_{11}$ и $H_2 = \rho_{21}$) и вычислить крен и тангаж (Θ_1, γ_1 и Θ_2, γ_2) в 1-м и во 2-м положениях по углам α_{11}, β_{11} и α_{21}, β_{21} соответственно;

2) В соответствии с (1) облака точек w_1 и w_2 преобразуются в облака точек W_1 и W_2 в системе координат с местной вертикалью, что позволяет в соответствии с выражением (2) выделить из них горизонтальные сечения (горизонтальные 2D-изображения внешней среды) $G_1(h)$ и $G_2(h)$, расположенные на одной высоте h над опорной горизонтальной поверхностью (показаны на рис. 2 соответственно жирной непрерывной линией и жирным пунктиром);

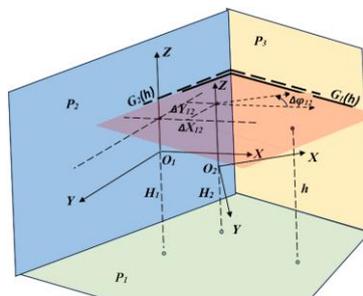


Рис. 2. Решение полной навигационной задачи БПЛА

3) С помощью алгоритма экстремальной навигации по горизонтальным 2D-изображениям внешней среды $G_1(h)$ и $G_2(h)$ вычисляются приращения ΔX_{12} , ΔY_{12} и $\Delta\varphi_{12}$ недостающих координат.

Теперь, зная ΔX_{12} , ΔY_{12} и $\Delta\varphi_{12}$, при условии того, что в 1-м положении в абсолютной (неподвижной) системе координат, связанной с внешней средой, известны X_1 , Y_1 и φ_1 , можно вычислить недостающие координаты во 2-м положении:

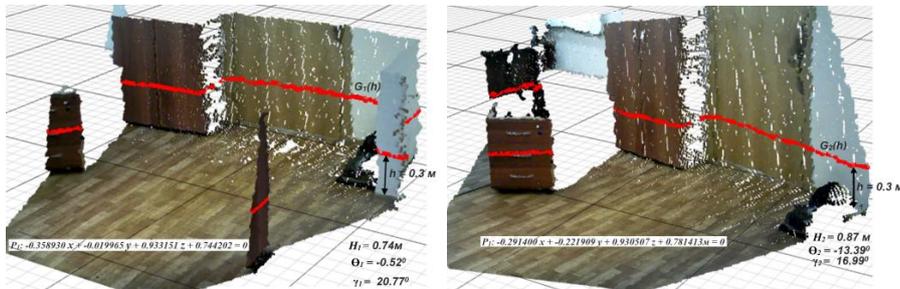
$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ \varphi_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta X_{12} \\ \Delta Y_{12} \end{pmatrix};$$

В общем случае на i -м шаге решения навигационной задачи:

$$\begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ \varphi_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ \varphi_0 \end{pmatrix} + \sum_{k=1}^i \begin{pmatrix} \cos(\varphi_{(k-1)}) & -\sin(\varphi_{(k-1)}) \\ \sin(\varphi_{(k-1)}) & \cos(\varphi_{(k-1)}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta X_{(k-1)k} \\ \Delta Y_{(k-1)k} \end{pmatrix}; \quad (3)$$

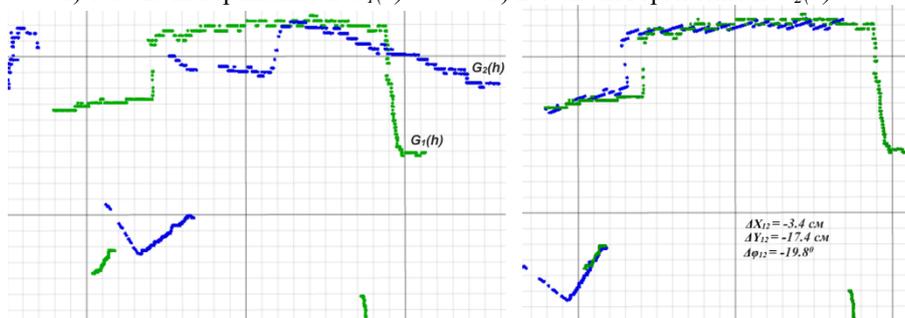
Зная координаты БПЛА в точке формирования облака точек (3), последнее может быть преобразовано в неподвижную систему координат, что позволяет формировать в процессе полета обобщенную геометрическую модель внешней среды в неподвижной системе координат, решая тем самым, так называемую, SLAM-задачу.

Результат обработки прикладным программным обеспечением двух 3D-изображений внешней среды, снятых камерой глубины Asus Xtion Pro из двух разных положений, при выделении горизонтальной опорной поверхности (P_1), по уравнению которой определяются высоты полета (H_1 и H_2), а также углы крена и тангажа (Θ_1, γ_1 и Θ_2, γ_2), и двух горизонтальных 2D-изображений $G_1(h)$ и $G_2(h)$, приведены на рис. 3, а, б, в, соответственно. Результат совмещения $G_1(h)$ и $G_2(h)$ с вычислением приращений координат ΔX_{12} , ΔY_{12} , $\Delta\varphi_{12}$ и совмещения двух 3D-изображений внешней среды в системе координат, приведенной к местной вертикали и связанной с первым положением, приведены на рис. 3, г, д.



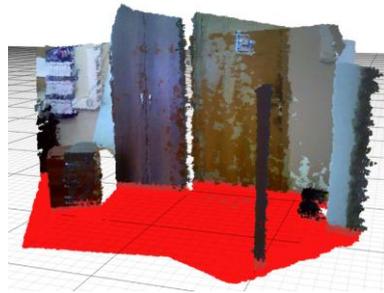
а) 1-е 3D-изображение и $G_1(h)$

б) 2-е 3D-изображение и $G_2(h)$



в) $G_1(h)$ и $G_2(h)$ в системе координат сенсора

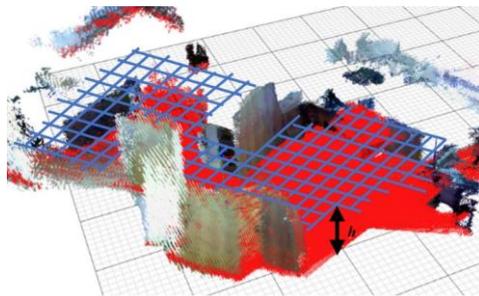
г) совмещение $G_1(h)$ и $G_2(h)$



д) совмещение 2-х 3D-изображений

Рис. 3. Результат работы прикладного программного обеспечения

Решение SLAM-задачи позволяет автоматизировать процессы формирования обобщенной геометрической модели внешней среды, а также планирования и отработки целенаправленных, безопасных траекторий полета БПЛА. Формирование обобщенной геометрической модели можно обеспечить путем задания множества целевых положений в плане рабочей зоны, которые должен посетить БПЛА в заданной последовательности (например, в последовательности с постепенным удалением от точки старта) и вернуться в точку старта. В процессе посещения достижимых целевых точек (или их локальной области) формируется обобщенная геометрическая модель внешней среды (рис. 4) и определяются текущие координаты БПЛА описанным выше способом.

Рис. 4. Обобщенная геометрическая модель внешней среды и плоский однородный граф в пространстве полета на высоте h

Обобщенная геометрическая модель внешней среды, дополненная в качестве опорных 2D-изображений [1, 7] горизонтальными сечениями $G_k(h)$ с координатами $(H_k, \Theta_k, \gamma_k, X_k, Y_k, \varphi_k)$ их формирования в каждом k -м цикле определения координат $(k=0, 1, \dots, K)$, представляет собой информационно-навигационное поле. Обобщенная геометрическая модель внешней среды позволяет определить область пространства, занятую препятствиями, и область пространства, свободную для полета. Представив последнюю в виде дискретной модели – однородных плоского (рис. 4) или трехмерного графа, можно, используя волновой алгоритм [10] спланировать траекторию между вершинами, соответствующими текущему (определяется по текущим координатам объекта управления) и целевому (задается в начале полета) положениям, как это предложено в [11–13] для планирования траекторий в двухмерных, трехмерных и многомерных пространствах положений. Знание текущих координат БПЛА, уточняемых по опорным изображениям, позволяет корректно отработать спланированную траекторию в сформированной модели внешней среды. Уточнение текущих

координат в данном случае происходит следующим образом. При достижении БПЛА локальной области опорного 2D-изображения $G_k(h)$, текущие координаты определяются не по предыдущему 2D-изображению, а по опорному. При представлении дискретной модели в виде плоского однородного графа, моделирующего пространство на какой-то одной высоте h , планирование и обработка траекторий полета будет происходить на этой одной высоте (рис. 4). Представление же дискретной модели в виде однородного трехмерного графа, объединяющего совокупность плоских однородных графов, моделирующих пространство полета на разных высотах, позволяет планировать и обрабатывать траектории полета на разных высотах (возможность при планировании траектории перемещений по высоте обеспечивается наличием вертикальных ребер между вершинами соседних плоских графов). Если плоские однородные графы представить в виде ортогонально-концентрических графов, то планируемые траектории совпадут с кратчайшими [11, 13].

Для снижения необходимых объемов памяти и вычислений и, следовательно, снижения требований к бортовому вычислителю, в качестве модели внешней среды можно использовать граф видимости [14], на котором методами динамического программирования (например, с помощью алгоритма Дейкстры [15]) находятся целенаправленные кратчайшие безопасные траектории полета БПЛА. Граф видимости строится следующим образом:

- ♦ в горизонтальной плоскости полета на одной высоте для всех выпуклых краев препятствий на некотором расстоянии, определяемом габаритами БПЛА, вводится вершина графа q_i ($i=1,2,\dots$) кроме того вводятся две вершины q_0 и q_n , соответствующие начальному и целевому положению РТК;

- ♦ между любой парой вершин q_i и q_j (включая вершины q_0 и q_n) вводится ребро с весом l_{ij} , равным расстоянию в плане между вершинами q_i и q_j , если между этими вершинами существует прямолинейный путь, не пересекающий препятствия.

Пример графа видимости для реальной внешней среды и найденной на нем траектории полета приведен на рис. 5.

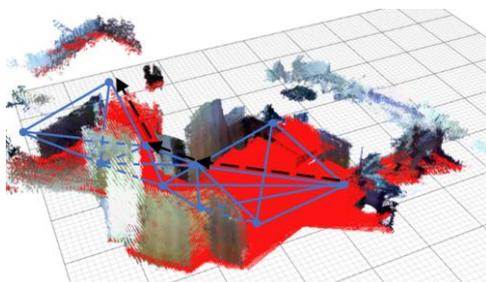


Рис. 5. Граф видимости и спланированная траектория полета

Использование нескольких графов видимости, соответствующих разным высотам полета, позволяет организовать полет на различных высотах.

Граф видимости описывается матрицей связности, которая не требует больших объемов памяти бортового вычислителя.

Навигация наземного РТК по данным БПЛА. Наземный РТК, также как и БПЛА в качестве СТЗ должен иметь лидар с телесным углом обзора, позволяющим формировать облака точек, пересекающиеся с облаками точек, формируемых БПЛА.

Как уже отмечалось выше, обобщенная геометрическая модель внешней среды в разведанной БПЛА рабочей зоне, может быть достаточно просто сформирована по результатам циклов навигации БПЛА в точках съема облаков точек, как объединение этих облаков в соответствии с их координатами съема (рис. 6).

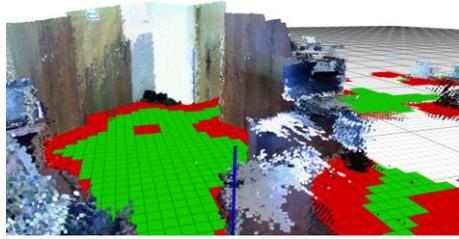


Рис. 6. Обобщенная геометрическая модель внешней среды с выделенной горизонтальной опорной поверхностью

Для построения модели внешней среды, в которой можно планировать траектории движения РТК, необходимо выделить из обобщенной геометрической модели, построенной БПЛА, опорную горизонтальную поверхность. В каждом k -м цикле навигации БПЛА ($k=0, 1, \dots, K$) формируется приведенное к местной вертикали облако точек $W_k = \{V_{ki} = \langle X_{ki}, Y_{ki}, Z_{ki} \rangle\}$ ($i=1, 2, \dots, n$), выделяются горизонтальная плоскость (P_l) опорной поверхности $x \cos(\alpha_{kl}) + y \cos(\beta_{kl}) + z \cos(\gamma_{kl}) = \rho_{kl}$, горизонтальное сечение $G_k(h)$ на высоте h от опорной поверхности и определяются координаты $\langle H_k, X_k, Y_k, \Theta_k, \gamma_k, \Phi_k \rangle$ БПЛА.

Выделим из W_k подмножество точек W_{0k} , принадлежащих опорной поверхности P_l :

$$V_{ki} \in W_{0k}, \text{ если } Z_{ki} = -H_k \pm \delta,$$

где δ – интервал разброса измерений лидара, определяемый такими его характеристиками, как точность и подробность формируемых 3D-изображений.

Тогда множество всех точек, принадлежащих горизонтальной плоскости опорной поверхности P_l , из всех облаков точек, сформированных в процессе полета БПЛА, будет равно $W_0 = \bigcup_{k=0}^K W_{0k}$. (показаны на рис. 6 красным и зеленым цветами).

Опорная горизонтальная поверхность может быть разбита на дискретные участки и представлена однородным плоским гафом. Вершины данного графа, соответствующие дискретные участки которых не содержат точки из W_0 , будут принадлежать зонам препятствий и неизвестности, а вершины, соответствующие участки которых содержат точки из W_0 и находятся на расстоянии от препятствий и зон неизвестности на расстоянии не менее половины корпуса РТК (препятствия и зоны неизвестности расширяются на половину корпуса РТК), образуют зону, разрешенную для движения (выделены на рис. 6 зеленым цветом). Построенная таким образом дискретная семантическая модель плоскости перемещений (каждому дискретному участку плоскости перемещения присвоен семантический признак “проходим”, “непроходим”) может быть использована для планирования целенаправленных безопасных траекторий РТК, например с использованием волнового алгоритма [10,11], при заданном целевом и известном текущем положениях. Текущее положение наземного РТК, перемещающегося по горизонтальной опорной поверхности, однозначно определяются двумя линейными координатами (X_r, Y_r) и одной угловой – курсом (φ_r), которые также могут определены с помощью алгоритма экстремальной навигации по горизонтальным 2D-изображениям внешней среды, выделяемым из облака точек, формируемых лидаром в процессе движения РТК. Для того, чтобы корректно определять текущие координаты РТК (в соответствии с сформированной по данным СТЗ БПЛА моделью) необходимо использовать горизонтальные сечения $G_k(h)$ с известными координатами $\langle X_k, Y_k, \Phi_k \rangle$ их формирования БПЛА как опорные [1, 7]. Тогда при достижении РТК локальной области опорного 2D-изображения $G_k(h)$, текущие координаты РТК определяются не по предыдущему 2D-изображению, сформированному по данным СТЗ РТК, а

по опорному, сформированному СТЗ БПЛА. В этом случае планирование траекторий и их отработка будут выполняться корректно с учетом ошибок сформированной по данным СТЗ БПЛА моделью, что обеспечит безопасное движение РТК. Таким образом, информационно-навигационное поле РТК, сформированное по данным СТЗ БПЛА, представляет собой дискретную семантическую модель плоскости перемещений и множество опорных горизонтальных 2D-изображений с координатами их формирования ($G_k(h), \langle X_k, Y_k, \varphi_k \rangle, k=0, 1, \dots, K$).

Для планирования и отработки траекторий РТК вместо дискретной семантической модели плоскости перемещений может быть использован также граф видимости. На рис. 7 показана траектория РТК, найденная на графе видимости (на рисунке показаны только вершины графа видимости), построенном по видеоданным БПЛА в реальной среде.

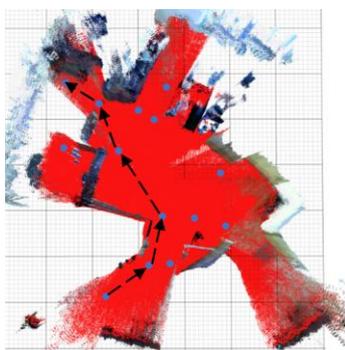


Рис. 7. Горизонтальная опорная поверхность и траектория РТК на графе видимости b

Использование графа видимости вместо дискретной семантической модели позволяет существенно сократить объем информации, передаваемой с БПЛА на РТК.

Заключение. Формирование информационно-навигационного поля (построение обобщенной модели внешней среды, дополненной опорными изображениями с координатами их получения) позволяет планировать и обрабатывать целенаправленные безопасные траектории полета БПЛА и движения наземных РТК с посещением заданного набора целевых точек и возвращением в точку старта. При этом формирование такого поля в индустриально-городской застройке на первоначальном этапе целесообразно выполнять с использованием разведывательных БПЛА мультироторного типа, которые должны входить в состав гетерогенной группы роботов, выполняющих специальную задачу. Использование единого информационно-навигационного поля, с одной стороны, существенно повышает автономность группы роботов за счет возможности самостоятельного планирования действий при выполнении сложных технологических операций, а с другой стороны, повышает ситуационную осведомленность операторов роботов, предоставляя в удобной форме информацию о месте проведения работ.

Такой сценарий использования автономных БПЛА и РТК позволяет решить широкий класс задач в экранированных зонах:

- ◆ разведки [16];
- ◆ транспортировки грузов и взятия образцов [17, 18];
- ◆ обеспечение радиосвязи [19];
- ◆ применение навесного оборудования (средств пожаротушения, обеззараживания, оружия) на заданных участках рабочей зоны [20];

♦ формирование визуально-подобной модели внешней среды для предварительного планирования и проигрывания различных сценариев будущих работ и операций с использованием живой силы и робототехнических средств, формирования маршрутного задания РТК и/или БПЛА с выполнением заданных действий в заданных точках маршрута и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лакота Н.А., Носков В.П., Рубцов И.В., Лундгрэн Я.-О., Моор Ф.* Опыт использования элементов искусственного интеллекта в системе управления цехового транспортного робота // *Мехатроника*. – 2000. – № 4. – С. 44-47.
2. *Загоруйко С.Н., Казьмин В.Н., Носков В.П.* Навигация БПЛА и 3D-реконструкция внешней среды по данным бортовой СТЗ // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2014. – № 8. – С. 62-68.
3. *Носков В.П., Рубцов И.В., Романов А.Ю.* Формирование объединенной модели внешней среды на основе информации видеокамеры и дальномера // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2007. – № 8. – С. 2-5.
4. *Yang J., Wen C.-K., Yang X., Xu J., Du T., and Jin S.* Multi-domain cooperative SLAM: The enabler for integrated sensing and communications // *IEEE Wireless Commun.* – Feb. 2023. – Vol. 30, No. 1. – P. 40-49.
5. *Saha A., Dhara B.C., Umer S., AlZubi A.A., Alanazi J.M., Yurii K.* CORB2I-SLAM: An Adaptive Collaborative Visual-Inertial SLAM for Multiple Robots // *Electronics*. – 2022. – 11, 2814.
6. *Sun Y. and Huang F. and Wen W. and Hsu L.-T. and Liu X.* Multi-Robot Cooperative Lidar Slam for Efficient Mapping in Urban Scenes // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2023. – Vol. XLVIII-1/W1-2023. – P. 473-478.
7. *Носков В.П., Носков А.В.* Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2005. – № 12. – С. 16-21.
8. *Казьмин В.Н., Носков В.П.* Выделение геометрических и семантических объектов в дальнометрических изображениях для навигации роботов и реконструкции внешней среды // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 10 (171). – С. 71-83.
9. *Носков В.П., Киселев И.О.* Выделение плоских объектов в линейно структурированных 3D-изображениях // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2018. – № 2 (19). – С. 31-38.
10. *Lee C.Y.* An Algorithm for Path Connections and Its Applications // *IRE Trans.* – 1961. – v EC-10, No. 3.
11. *Каляев А.В., Носков В.П., Чернухин Ю.В.* Алгоритм управляющей структуры транспортного робота // *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*. – 1980. – № 4. – С. 64-72.
12. *Каляев А.В., Носков В.П., Чернухин Ю.В.* Однородная управляющая структура адаптивного робота-манипулятора // *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*. – 1981. – № 6. – С. 121-126.
13. *Каляев А.В., Чернухин Ю.В., Носков В.П., Каляев И.А.* Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. – М.: Наука, 1990. – 147 с.
14. *Tomás Lozano-Pérez, Michael A. Wesley.* An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles // *Communications of the ACM*. – 1979. – Vol. 22, Issue 10. – P. 560-570.
15. *Dijkstra E.W.* A Note on two Problems in Connexion with Graphs // *Numerische Mathematik*. – 1959. – Vol. 1, Issue 1. – P. 269-271.
16. *Градецкий В.Г., Ермолов И.Л., Князьков М.М., Лалин Б.С., Семенов Е.А., Собольников С.А., Суханов А.Н.* Система группового транспортного управления мобильными наземными роботами на различных грунтах // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2020. – 8, 1. – С. 61-71.
17. *Градецкий В.Г., Ермолов И.Л., Князьков М.М., Семенов Е.А., Собольников С.А., Суханов А.Н.* О научных задачах выполнения транспортных операций группой мобильных роботов // *Робототехника и техническая кибернетика*. – 2016. – 3. – С. 57-62.
18. *Gradetsky Valery, Ermolov Ivan, Knyazkov Maxim, Semenov Eugeny, Sobolnikov Sergey and Sukhanov Artem.* Implementation of a Joint Transport Task by a Group of Robots. Smart Electromechanical Systems // *Studies in Systems, Decision and Control*. – Springer. – P. 203-214.
19. *Градецкий В.Г., Ермолов И.Л., Князьков М.М., Собольников С.А.* Построение подвижных коммуникационных сетей на базе наземных автономных мобильных роботов // *Мехатроника. Автоматизация. Управление*. – 2011. – № 11. – С. 27-32.

20. *Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Sobolnikov S.A., Sukhanov A.N., Usov V.M.* Position Control of Ugv Group for Covid (Virus Sars-Cov-2covid) Localization and Primary Treatment Within Indoor Environment // *Studies in Systems, Decision and Control.* – 2021. – Vol. 352. – P. 113-125.

REFERENCES

1. *Lakota N.A., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Lundgren Ya.-O., Moor F.* Opyt ispol'zovaniya elementov iskusstvennogo intellekta v sisteme upravleniya tsekhovogo transportnogo robota [The experience of using artificial intelligence elements in the control system of a shop transport robot], *Mekhatronika* [Mechatronics], 2000, No. 4, pp. 44-47.
2. *Zagoruyko S.N., Kaz'min V.N., Noskov V.P.* Navigatsiya BPLA i 3D-rekonstruktsiya vneshney sredy po dannym bortovoy STZ [UAV navigation and 3D reconstruction of the external environment based on on-board VS data], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2014, No. 8, pp. 62-68.
3. *Noskov V.P., Rubtsov I.V., Romanov A.Yu.* Formirovanie ob"edinennoy modeli vneshney sredy na osnove informatsii videokamery i dal'nomera [Formation of a combined model of the external environment based on information from a video camera and a rangefinder], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2007, No. 8, pp. 2-5.
4. *Yang J., Wen C.-K., Yang X., Xu J., Du T., and Jin S.* Multi-domain cooperative SLAM: The enabler for integrated sensing and communications, *IEEE Wireless Commun.*, Feb. 2023, Vol. 30, No. 1, pp. 40-49.
5. *Saha A., Dhara B.C., Umer S., AlZubi A.A., Alanazi J.M., Yurii K.* CORB2I-SLAM: An Adaptive Collaborative Visual-Inertial SLAM for Multiple Robots, *Electronics*, 2022, 11, 2814.
6. *Sun Y. and Huang F. and Wen W. and Hsu L.-T. and Liu X.* Multi-Robot Cooperative Lidar Slam for Efficient Mapping in Urban Scenes, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2023, Vol. XLVIII-1/W1-2023, pp. 473-478.
7. *Noskov V.P., Noskov A.V.* Navigatsiya mobil'nykh robotov po dal'nometricheskim izobrazheniyam [Navigation of mobile robots by rangefinder images], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2005, No. 12, pp. 16-21.
8. *Kaz'min V.N., Noskov V.P.* Vyделение geometricheskikh i semanticheskikh ob"ektov v dal'nometricheskikh izobrazheniyakh dlya navigatsii robotov i rekonstruktsii vneshney sredy [Selection of geometric and semantic objects in rangefinder images for robot navigation and reconstruction of the external environment], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 10 (171), pp. 71-83.
9. *Noskov V.P., Kiselev I.O.* Vyделение ploskikh ob"ektov v lineynno strukturirovannykh 3D-izobrazheniyakh [Extracting planar objects in linearly structured 3D images], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and technical cybernetics], 2018, No. 2 (19), pp. 31-38.
10. *Lee C.Y.* An Algorithm for Path Connections and Its Applications, *IRE Trans.*, 1961, v EC-10, No. 3.
11. *Kalyaev A.V., Noskov V.P., Chernukhin Yu.V.* Algoritm upravlyayushchey struktury transportnogo robota [The transport robot control structure algorithm], *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics], 1980, No. 4, pp. 64-72.
12. *Kalyaev A.V., Noskov V.P., Chernukhin Yu.V.* Odnorodnaya upravlyayushchaya struktura adaptivnogo robota-manipulyatora [Homogeneous control structure of an adaptive robot manipulator], *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics], 1981, No. 6, pp. 121-126.
13. *Kalyaev A.V., Chernukhin Yu.V., Noskov V.P., Kalyaev I.A.* Odnorodnye upravlyayushchie struktury adaptivnykh robotov [Homogeneous control structures of adaptive robots]. Moscow: Nauka, 1990, 147 p.
14. *Tomás Lozano-Pérez, Michael A. Wesley.* An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles, *Communications of the ACM*, 1979, Vol. 22, Issue 10, pp. 560-570.
15. *Dijkstra E.W.* A Note on two Problems in Connexion with Graphs, *Numerische Mathematik*, 1959, Vol. 1, Issue 1, pp. 269-271.
16. *Gradetskiy V.G., Ermolov I.L., Knyaz'kov M.M., Lapin B.S., Semenov E.A., Sobol'nikov S.A., Sukhanov A.N.* Sistema gruppovogo transportnogo upravleniya mobil'nymi nazemnymi robotami na razlichnykh gruntakh [Transport group control system of unmanned ground vehicles for various soils], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Engineering Cybernetics], 2020, 8, 1, pp. 61-71.

17. *Gradetskiy V.G., Ermolov I.L., Knyaz'kov M.M., Semenov E.A., Sobol'nikov S.A., Sukhanov A.N.* O nauchnykh zadachakh vypolneniya transportnykh operatsiy gruppy mobil'nykh robotov [Scientific tasks of implementing transportation tasks by groups of UGVs], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2016, 3, pp. 57-62.
18. *Gradetskiy Valery, Ermolov Ivan, Knyazkov Maxim, Semenov Eugeny, Sobolnikov Sergey and Sukhanov Artem.* Implementation of a Joint Transport Task by a Group of Robots. Smart Electromechanical Systems, *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, pp. 203-214.
19. *Gradetskiy V.G., Ermolov I.L., Knyaz'kov M.M., Sobol'nikov S.A.* Postroenie podvizhnykh kommunikatsionnykh setey na baze nazemnykh avtonomnykh mobil'nykh robotov [Design of moving communication network on the base of ground autonomous mobile robots], *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie* [Mechatronics. Automation. Control], 2011, No. 11, pp. 27-32.
20. *Ermolov I.L., Knyazkov M.M., Sobolnikov S.A., Sukhanov A.N., Usov V.M.* Position Control of Ugv Group for Covid (Virus Sars-Cov-2covid) Localization and Primary Treatment Within Indoor Environment, *Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, Vol. 352, pp. 113-125.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.Л. Ермолов.

Баричев Юрий Сергеевич – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; e-mail: ybarichev@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79191396529; техник научно-исследовательской лаборатории.

Гойдин Олег Петрович – e-mail: crer@vniia.ru; руководитель центра робототехники и аварийного реагирования.

Собольников Сергей Александрович – e-mail: sasobolnikov@vniia.ru; тел.: +79263879088; к.т.н.; начальник научно-исследовательской лаборатории.

Носков Владимир Петрович – НИИ Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79166766057. к.т.н.; зав. сектором.

Barichev Yury Sergeevich – FSUE "VNIIA"; e-mail: ybarichev@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79191396529; technician of the research laboratory.

Goydin Oleg Petrovich – e-mail: crer@vniia.ru; head of the Center for robotics and emergency response.

Sobolnikov Sergey Aleksandrovich – e-mail: sasobolnikov@vniia.ru; phone: +79263879088; cand. of eng. sc.; head of the research laboratory.

Noskov Vladimir Petrovich – Bauman Moscow State Technical University; e-mail: noskov_mstu@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79166766057; cand. of eng. sc.; sector head.

УДК 004.932.2

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-225-233

П.А. Гессен, А.И. Лизин, В.А. Павлова, В.Д. Саенко, В.А. Тупиков

ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ

Было произведено исследование в области систем технического зрения, а также подходов к решению задач обнаружения и сопровождения объектов интереса без априорного знания об их типе с учетом целевой платформы в виде встраиваемого вычислителя оптико-электронной системы. На основании полученных данных был произведен анализ сферы и предложен новый гибридный алгоритм сопровождения для встраиваемых систем. Он основан на сочетании нескольких типов алгоритмов сопровождения, с одним из них в качестве приоритетного, обеспечивающего основную работу, и нескольких вспомогательных для стабилизации и расширения функционала приоритетного. Они связаны внешним циклом обработки, который на основе консенсусного решения внутренних алгоритмов самостоятельно, принимает решение о положении целевого объекта в кадре и хранит в себе вспомогательную информацию для обеспечения корректной работы всего алгоритма, а также отвечающего за принятие решения о повторном обнаружении цели. Предложены две возможные реализации данного подхода,

используемые в зависимости от мощности доступных вычислительных ресурсов. Реализован вариант алгоритма для доступных вычислительных мощностей, проведены его полунатурные испытания на основании реальных видеопоследовательностей. Они представляют разные фоны и разные структурные объекты интереса с различной динамикой изменения с течением времени. Проведена оценка результатов работы предложенного алгоритма в задачах обнаружения и сопровождения объекта интереса в режиме реального времени на представленных видео при помощи программного комплекса автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения. По итогу алгоритм показал высокую эффективность в поставленных задачах, улучшив точностные показатели сопровождения, в сравнении с внутренними алгоритмами, которые работали по-отдельности, за счет добавления поворотной и масштабной инвариантности, а также значительно повысил способность к повторному обнаружению объекта после его потери. В заключении представлены предложения по дальнейшему развитию и внедрению во встраиваемые вычислители оптико-электронных систем.

Автоматическое обнаружение; автоматическое сопровождение; встраиваемые системы; консенсусное решение.

P.A. Gessen, A.I. Lizin, V.A. Pavlova, V.D. Saenko, V.A. Tupikov

HYBRID ALGORITHM OF AUTOMATIC TRACKING FOR EMBEDDED COMPUTERS OF OPTOELECTRONIC NAVIGATION AND GUIDANCE SYSTEMS

The authors of the work carried out research in the field of technical vision systems, as well as approaches to solving problems of detecting and tracking objects of interest without a priori knowledge of their type, taking into account the target platform in the form of an embedded optoelectronic system computer. Based on the data obtained, the sphere was analyzed and a new hybrid maintenance algorithm for embedded systems was proposed. It is based on a combination of several types of maintenance algorithms, with one of them as a priority, providing the main work, and several auxiliary ones to stabilize and expand the functionality of the priority one. They are connected by an external processing cycle, which, based on a consensus decision of internal algorithms, independently decides on the position of the target object in the frame and stores auxiliary information to ensure the correct operation of the entire algorithm, as well as responsible for making a decision on the re-detection of the target. The authors propose two possible implementations of this approach, used depending on the power of available computing resources. A variant of the algorithm has been implemented for the available computing power, and its semi-natural tests have been carried out based on real video sequences. They represent different backgrounds and different structural objects of interest with different dynamics of change over time. The evaluation of the results of the proposed algorithm in the tasks of detecting and tracking an object of interest in real time on the presented videos using a software package for automating testing of detection and tracking algorithms has been carried out. As a result, the algorithm showed high efficiency in the tasks set, improving the accuracy of tracking, in comparison with internal algorithms that worked separately, by adding rotary and scale invariances, and also significantly increased the ability to re-detect an object after its loss. In conclusion, the authors present proposals for the further development and implementation of optoelectronic systems into embedded computers.

Automatic detection; automatic tracking; embedded systems; consensus decision.

Введение. В современных оптико-электронных системах остро стоит проблема обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов. Данная задача является объектом интереса уже достаточно долгое время, и как итог, в научной литературе предложено уже множество вариантов решения. В последнее время тренд в разработке новых подходов перешел к использованию нейронных сетей и искусственного интеллекта. Построенные по такому принципу реализации показывают отличные показатели точности в задачах обнаружения и сопровождения, однако обладают общими особенностями: они требуют предварительного априорного знания о типе объекта интереса (обучающей выборки) [1–2] и/или имея высокую вычислительную сложность, требуют использования мощных вы-

числителей (например, графические ускорители уровня GeForce GTX Titan X) [3–5], что в условиях встраиваемых систем реального времени и необходимости обнаружения любого объекта и его сопровождения без априорного знания о нем, делает предлагаемые реализации слабо применимыми в поставленной среде. Проведя исследования предметной области, были выявлены общие подходы к решению заявленной проблемы без использования искусственных нейронных сетей [6–7], среди которых одним из перспективных был признан метод совмещения нескольких простых алгоритмов сопровождения и обнаружения для принятия консенсусного решения о положении цели в кадре [8–10].

На основании данного подхода, авторами статьи был предложен новый алгоритм сопровождения и обнаружения произвольных объектов без априорного знания об их типе для встраиваемых оптико-электронных систем на основе нескольких реализаций алгоритмов сопровождения и консенсусного принятия решения о положении цели.

Предлагаемый подход. В данной работе авторами предлагается новый алгоритм сопровождения объекта, сочетающий в себе несколько реализаций иных алгоритмов слежения и обнаружения объектов, объединенных в единую систему для повышения точностных показателей путем консенсусного принятия решения и нивелирования недостатков каждого алгоритма по-отдельности. Для упрощения понимания в дальнейшем изложении предлагаемый подход будет называться “внешний алгоритм”, а иные алгоритмы – “внутренние алгоритмы”.

Сопровождение. Предлагаемое решение основано на циклическом использовании различных методов обнаружения объектов для каждого кадра в видеопоследовательности: в момент инициализации программы создается структура, которая хранит в себе последовательность внутренних алгоритмов, при этом первый в списке принимается внешним алгоритмом как приоритетный и в дальнейшем валидация результатов остальных внутренних решений идет на основе приоритетного. После первичной инициализации, содержащей n внутренних алгоритмов, первые n кадров обрабатываются каждым методом отдельно и последовательно (то есть кадр 1 обрабатывается первым в контейнере алгоритмом, кадр 2 - вторым, и так далее), то есть на каждом кадре работает отдельная реализация, никак не связанная с другими. На данной стадии происходит сбор начальных данных для работы внешнего алгоритма, при этом сохраняется возможность сопровождения объекта. Далее выполняются действия внутри одного прохода по контейнеру с алгоритмами, начиная с первого:

1. Выбирается очередной внутренний алгоритм;
2. Производится проверка того, что выбранный алгоритм не выдал ошибку сопровождения в предыдущей итерации;
3. На вход подается текущий кадр и происходит его обработка с последующей выдачей результата в виде описывающего прямоугольника;
4. Если результат получен от приоритетного алгоритма, то происходит сохранение результата, если нет, то сначала вычисляется расстояние между выходными данными первого алгоритма и текущего, после чего идет сохранение результата в виде описывающего прямоугольника и дополнительной информации о статусе работы;
5. Происходит сглаженное перемещение центра общего результирующего прямоугольника в сторону текущего положения;

По достижении и обработки результатов последнего внутреннего алгоритма происходит обобщающий анализ полученных данных:

1. Выполняется проверка того, что все внутренние алгоритмы одновременно не выдали результаты, соответствующие ошибке. При неудачном прохождении внешний алгоритм принимает решение об остановке процесса сопровождения и выдаче информационного сообщения. При успешной проверке происходит переход на следующий пункт;

2. Выполняется проверка того, что все внутренние алгоритмы одновременно не выдали результаты, соответствующие потере объекта. При неудачном прохождении внешний алгоритм принимает решение о переключении в режим поиска объекта. При успешной проверке происходит переход на следующий пункт;
3. Вычисляется усредненный коэффициент уверенности сопровождения. Если коэффициент меньше заданного порога, то происходит переход в режим обнаружения объекта. При прохождении порога происходит переход на следующий пункт;
4. Проводится создание общего результирующего прямоугольника путем объединения и обработки каждого из результатов внутренних алгоритмов;
5. Осуществляется запоминание нового результата и принятие его в качестве эталона для следующего цикла.

Повторное обнаружение. Предлагаемый подход включает в себе возможность повторного обнаружения объекта при принятии решения о его потере только в том случае, если хотя бы из внутренних алгоритмов содержит в себе такую возможность, как в [11–12]. Если она не предусмотрена, как в [13], то переход в режим повторного обнаружения объекта приводит к принятию решения об окончательной потере объекта и процесс сопровождения останавливается. Если механизм повторного обнаружения присутствует, то переход внешнего алгоритма в режим обнаружения приводит к последовательному поиску каждым внутренним алгоритмом с возможностью обнаружения заданного объекта на кадрах по аналогии с алгоритмом, описанным выше. При нахождении объекта какой-либо внутренней реализацией, внешний алгоритм принимает решение о запуске процесса слежения по вышеописанным последовательностям.

Альтернативный предлагаемый подход. Вышеописанные алгоритмы и последовательности предполагают под собой использование малого количества вычислительных ресурсов или невысоких мощностей, вследствие чего для достижения достаточной скорости работы для поддержания режима реального времени необходимо использовать последовательный вызов внутренних реализаций и их последующий анализ. В случае, когда возможно использование больших вычислительных мощностей, предлагается использовать улучшенную версию внешнего алгоритма. Вместо последовательной обработки одним внутренним алгоритмом одного кадра, а затем обработки финальных результатов один раз в n кадров, можно выполнять операции обнаружения объекта на каждом кадре одновременно всеми методами, а потом анализировать их результат на каждом кадре при помощи многопоточного механизма [14]. Такой подход имеет как плюсы в виде большей точности работы и более плавного выдаваемого на выходе смещения результирующего прямоугольника, так и минусы в виде больших затрачиваемых ресурсов и необходимости тщательнее выбирать внутренние алгоритмы из-за их зависимости друг от друга в момент обработки.

Особенность. Особенностью предлагаемых подходов является то, что внутренние алгоритмы могут выбираться любые в зависимости от требований и не ограничены по количеству, т.е. при наличии большого количества реализаций можно увеличивать количество используемых методов для потенциального достижения большей уверенности в результате или же наоборот сокращать их количество при недостатке ресурсов.

Реализация. В соответствии с предлагаемым подходом (для систем с ограничением по используемым ресурсам) авторами статьи был разработан и реализован гибридный алгоритм автоматического сопровождения для встраиваемых систем. По результатам тестового моделирования на различных видеопоследовательностях с отличающимися представленными условиями было определено, что оптимальное количество внутренних алгоритмов равняется трем, а сами алгоритмы представлены следующими реализациями:

1. Корреляционный алгоритм – представляет собой стандартный корреляционный алгоритм [15] с добавлением расчета интегральных изображений и построения пирамиды изображения для улучшения качества сопровождения и масштабной инвариантности. Выступает в качестве приоритетного внутреннего алгоритма ввиду скорости, устойчивости к помехам и качества работы.

2. Многоагентный алгоритм – алгоритм основанный на сопоставлении ключевых точек с добавлением масштабной пирамиды изображения, подробное описание работы представлено в статье – [16]. Выступает в роли корректирующего элемента, так как значительно повышает поворотную инвариантность и хорошо обрабатывает перекрытия объекта.

3. Квадрантно-обучаемый алгоритм - алгоритм основанный на корреляции с последующим обучением для точности распознавания, подробное описание работы представлено в статье [17]. Выступает в роли корректирующего элемента и служит для стабилизации процесса сопровождения.

При использовании меньшего количества внутренних алгоритмов качественные и точностные результаты оказывались хуже, выражаясь в нестабильности, и расползании описывающего прямоугольника. При большем количестве реализаций проявлялось сильное отставание рамки сопровождения от текущего положения объекта и хуже обрабатывались ситуации резкого изменения положения объекта в кадре. При текущей конфигурации достигнуто плавное сопровождение с низкой разницей между центрами описывающей рамки и целевой сущности, качественно обрабатываются масштабные и поворотные изменения объекта, сохраняются возможность сопровождать объект при последовательном сильном изменении его представления с течением времени.

Результаты. Тестирование выполнялось при помощи полунатурного моделирования с использованием программного комплекса автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения, разработанного АО НПП «АМЭ» [18], и реальных видеозаписей, полученных в различных условиях наблюдения. Для тестирования были размечены видеопоследовательности, содержащие объекты интереса типа «Кунг», «Здание», «Мост» и др. размером от ~64x64 до ~256x256 пикселей.

Для наиболее полной оценки точности предлагаемого модуля, использовалась метрика IoU (Intersection over Union) [19]. Данная метрика подразумевает оценку отношения площадей пересечения описывающих прямоугольников к площади их объединения. Один из прямоугольников (S_1), определяющий истинное положение объекта в кадре, задается оператором при тестировании, второй (S_2) является результатом работы того или иного алгоритма сопровождения:

$$IoU = \frac{S_1 \cap S_2}{S_1 \cup S_2} \in [0; 1]$$

Чем ближе получаемое значение IoU к единице, тем более точное предсказание истинного положения объекта и его размеров даёт оцениваемый алгоритм.

В дополнение к IoU возможно добавить еще одну метрику. Анализ ошибки определения центра (средняя квадратическая ошибка, root mean square error [20]) объекта, позволяющие оценить отклонение между истинным положением отслеживаемого объекта и полученным положением в результате сопровождения объекта. Ниже представлена формула расчета среднеквадратичной ошибки отклонения центра по всей видеопоследовательности:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_1^N (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2},$$

где N – количество кадров в видеопоследовательности, x_1 и y_1 – координаты центра прямоугольника, предсказывающего положение объекта, от тестируемого алгоритма, x_2 и y_2 – координаты центра прямоугольника, описывающего истинное положение объекта.

Тестирование проводилось для каждого из вышеописанных внутренних алгоритмов и предлагаемого решения по следующей методике:

1. На интересующей видеозаписи в определенный момент выполнялся захват объекта на сопровождение;
2. На протяжении видеопоследовательности на каждом кадре собирались данные об отклике алгоритма сопровождения;
3. Полученные сведения сравнивались с заранее размеченными эталонными кадрами и вычислялись метрики.

Результаты экспериментов по данной методике представлены на рис. 1 и 2.

Из приведенных графиков видно, что в большинстве случаев предлагаемое решение показывает сильное улучшение результатов. На графиках, где происходит падение значений в 0, таким образом показывается ситуация потери алгоритмом слежения объекта и невозможности восстановления. Таким образом видно, что не только улучшаются точностные показатели как области пересечения, так и дистанции до истинного центра, но и не происходит ситуаций, в которых происходит окончательная потеря объекта.

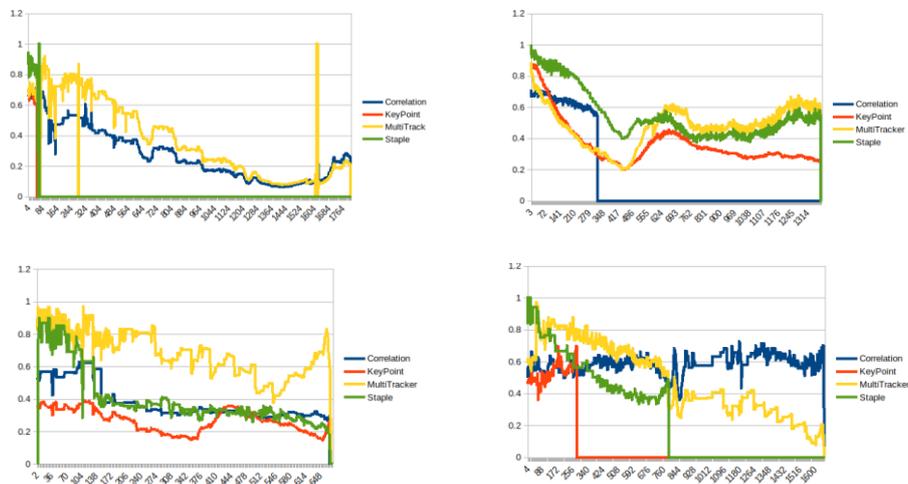


Рис. 1. Графики областей пересечения IoU

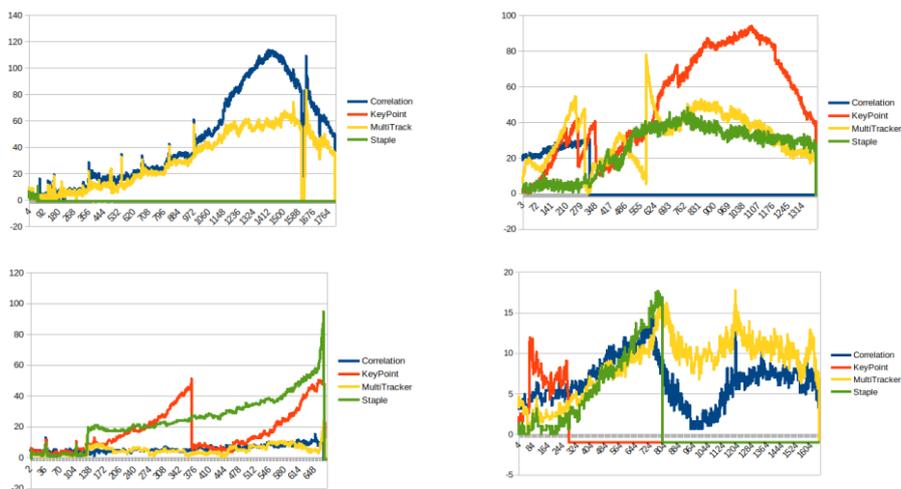


Рис. 2. Графики разницы расстояний центров RMSE

Заключение. По результатам полунатурного моделирования с использованием программного комплекса автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения использование предложенного алгоритма дало точность прироста охвата цели относительно других отдельных реализаций, на достаточно высокой скорости, что дает возможность использовать данный алгоритм, например, в составе специального программного обеспечения оптико-электронных систем беспилотных и пилотируемых летательных аппаратов.

На дальнейших этапах развития планируется внедрение данного алгоритма в оптико-электронную систему и проведение натурных испытаний для выявления возможных недостатков и их устранения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Dillon Reis, Jordan Kupec, Jacqueline Hong, Ahmad Daoudi.* Real-Time Flying Object Detection with YOLOv8 // ArXiv. – 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2305.09972.
2. *Wang, Chien-Yao & Bochkovskiy, Alexey & Liao, Hong-yuan.* YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors // arXiv. – 2022. – DOI: 10.48550/arXiv.2207.02696.
3. *Bertinetto L., Valmadre J., Henriques J.F., Vedaldi A., Torr P.H.S.* Fully-Convolutional Siamese Networks for Object Tracking / In: Hua G., Jégou H. (eds) // Computer Vision – ECCV 2016 Workshops. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9914. – Springer, Cham.
4. *Zhang Y., Wang L., Qi J., Wang D., Feng M., Lu H.* Structured Siamese Network for Real-Time Visual Tracking / In: Ferrari V., Hebert M., Sminchisescu C., Weiss Y. (eds) // Computer Vision – ECCV 2018. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science. – 2018. – Vol. 11213. – Springer, Cham.
5. *Li D., Yu Y. & Chen X.* Object tracking framework with Siamese network and re-detection mechanism // J Wireless Com Network. – 2019. – 261.
6. *Fei Chen, Xiaodong Wang, Yunxiang Zhao, Shaohu Lv, Xin Niu.* Visual object tracking: A survey // Computer Vision and Image Understanding. – 2022. – 222. – DOI: 10.1016/j.cviu.2022.103508.
7. *Zahra Soleimanitaleb, Mohammad Ali Keyvanrad.* Single Object Tracking: A Survey of Methods, Datasets, and Evaluation Metrics // ArXiv. – 2022. – DOI: 10.48550/arXiv.2201.13066.
8. *Nebehay G. and Pflugfelder R.* Consensus-based matching and tracking of keypoints for object tracking // IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Steamboat Springs, CO, USA, 2014. – P. 862-869. – DOI: 10.1109/WACV.2014.6836013.
9. *Qi Y., Zhang S., Qin L., Yao H., Huang Q., Lim J., and Yang M.H.* Hedged deep tracking // In CVPR. – IEEE, 2016. – P. 4303-4311.
10. *Wang N. and Yeung D.-Y.* Ensemble-Based Tracking: Aggregating Crowdsourced Structured Time Series Data // In ICML. – 2014.
11. *Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J.* Tracking-Learning-Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – Vol. 34, No. 7. – P. 1409-1422.
12. *Bertinetto L., Valmadre J., Golodetz S., Miksik O. and Torr P.H.S.* Staple: Complementary Learners for Real-Time Tracking // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016. – P. 1401-1409. – DOI: 10.1109/CVPR.2016.156.
13. *Henriques J.F., et al.* High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2015. – Vol. 37, No. 3. – P. 583-596.
14. *Tullsen D.M., Eggers S.J. and Levy H.M.* Simultaneous multithreading: Maximizing on-chip parallelism // Proceedings 22nd Annual International Symposium on Computer Architecture, Santa Margherita Ligure, Italy, 1995. – P. 392-403.
15. *Bolme David, Beveridge J., Draper Bruce, Lui Yui.* Visual object tracking using adaptive correlation filters // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2010. – P. 2544-2550. – DOI: 10.1109/CVPR.2010.5539960.
16. *Бондаренко В.А., Ельцова Д.К., Лизин А.И., Павлова В.А., Созинова М.В., Тушков В.А.* Многоагентный алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1 (211). – С. 218-232.
17. *Бондаренко В.А., Гагарина А.Ю., Павлова В.А., Тушков В.А.* Программный комплекс автоматизации тестирования алгоритмов обнаружения и сопровождения объектов на видеопоследова-

- тельность // Перспективные системы и задачи управления: Матер. XVI Всероссийской научно-практической конференции и XII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Таганрог: ИП Марук М.Р., 2021. – 355 с.
18. Гагарина А.Ю., Гессен П.А., Лизин А.И., Павлова В.А., Созинова М.В., Туников В.А. Квадратно-обучаемый алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения недетерминированных объектов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – 11. – С. 3-13.
 19. Rezatofighi H., Tsoi N., Gwak J., Sadeghian A., Reid I. Savarese S., Generalized Intersection Over Union: A Metric and a Loss for Bounding Box Regression // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019. – P. 658-666.
 20. Hodson T.O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not // Geoscientific Model Development. – 2022, – 15. – P. 5481-5487. – DOI: 10.5194/gmd-15-5481-2022.

REFERENCES

1. Dillon Reis, Jordan Kupec, Jacqueline Hong, Ahmad Daoudi. Real-Time Flying Object Detection with YOLOv8, *ArXiv*, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2305.09972.
2. Wang, Chien-Yao & Bochkovskiy, Alexey & Liao, Hong-yuan. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors, *arXiv*, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2207.02696.
3. Bertinetto L., Valmadre J., Henriques J.F., Vedaldi A., Torr P.H.S. Fully-Convolutional Siamese Networks for Object Tracking. In: Hua G., Jégou H. (eds), *Computer Vision – ECCV 2016 Workshops. ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science*, 2016, Vol. 9914. Springer, Cham.
4. Zhang Y., Wang L., Qi J., Wang D., Feng M., Lu H. Structured Siamese Network for Real-Time Visual Tracking. In: Ferrari V., Hebert M., Sminchisescu C., Weiss Y. (eds), *Computer Vision – ECCV 2018. ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science*, 2018, Vol. 11213. Springer, Cham.
5. Li D., Yu Y. & Chen X. Object tracking framework with Siamese network and re-detection mechanism, *J Wireless Com Network*, 2019, 261.
6. Fei Chen, Xiaodong Wang, Yunxiang Zhao, Shaohe Lv, Xin Niu. Visual object tracking: A survey, *Computer Vision and Image Understanding*, 2022, 222. DOI: 10.1016/j.cviu.2022.103508.
7. Zahra Soleimanitaleb, Mohammad Ali Keyvanrad. Single Object Tracking: A Survey of Methods, Datasets, and Evaluation Metrics, *ArXiv*, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2201.13066.
8. Nebehay G. and Pflugfelder R. Consensus-based matching and tracking of keypoints for object tracking, *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Steamboat Springs, CO, USA, 2014*, pp. 862-869. DOI: 10.1109/WACV.2014.6836013.
9. Qi Y., Zhang S., Qin L., Yao H., Huang Q., Lim J., and Yang M.H. Hedged deep tracking, *In CVPR. IEEE*, 2016, pp. 4303-4311.
10. Wang N. and Yeung D.-Y. Ensemble-Based Tracking: Aggregating Crowdsourced Structured Time Series Data, *In ICML*, 2014.
11. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-Learning-Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, Vol. 34, No. 7, pp. 1409-1422.
12. Bertinetto L., Valmadre J., Golodetz S., Miksik O. and Torr P.H.S. Staple: Complementary Learners for Real-Time Tracking, *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016*, pp. 1401-1409. DOI: 10.1109/CVPR.2016.156.
13. Henriques J.F., et al. High-Speed Tracking with Kernelized Correlation Filters, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, Vol. 37, No. 3, pp. 583-596.
14. Tullsen D.M., Eggers S.J. and Levy H.M. Simultaneous multithreading: Maximizing on-chip parallelism, *Proceedings 22nd Annual International Symposium on Computer Architecture, Santa Margherita Ligure, Italy, 1995*, pp. 392-403.
15. Bolme David, Beveridge J., Draper Bruce, Lui Yui. Visual object tracking using adaptive correlation filters, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2010, pp. 2544-2550. DOI: 10.1109/CVPR.2010.5539960.
16. Bondarenko V.A., El'tsova D.K., Lizin A.I., Pavlova V.A., Sozinova M.V., Tupikov V.A. Mnogoagentnyy algoritm avtomaticheskogo obnaruzheniya i soprovozhdeniya nedeterminirovannykh ob"ektov [Multi-agent algorithm for automatic detection and tracking of non-deterministic objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2020, No. 1 (211), pp. 218-232.

17. Bondarenko V.A., Gagarina A.Yu., Pavlova V.A., Tupikov V.A. Programmnyy kompleks avtomatizatsii testirovaniya algoritmov obnaruzheniya i soprovozhdeniya ob"ektov na videoposledovatel'nostyakh [Software package for testing algorithms for detecting and tracking objects on video sequences], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XVI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XII molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Promising management systems and tasks: materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference and the XII youth school seminar "Information Management and processing in technical systems"]. Taganrog: IP Maruk M.R., 2021, 355 p.
18. Gagarina A.Yu., Gessen P.A., Lizin A.I., Pavlova V.A., Sozinova M.V., Tupikov V.A. Kvadratno-obuchaemyy algoritm avtomaticheskogo obnaruzheniya i soprovozhdeniya nede-terminirovannykh ob"ektov [A square-trainable algorithm for automatic detection and tracking of non-deterministic objects], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical Sciences], 2022, 11, pp. 3-13.
19. Rezatofighi H., Tsoi N., Gwak J., Sadeghian A., Reid I. Savarese S., Generalized Intersection Over Union: A Metric and a Loss for Bounding Box Regression, *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019*, pp. 658-666.
20. Hodson T.O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not, *Geoscientific Model Development*, 2022, 15, pp. 5481-5487. DOI: 10.5194/gmd-15-5481-2022.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. П.К. Шульженко.

Тупиков Владимир Алексеевич – АО «Научно-производственное предприятие «Авиационная и морская электроника»; e-mail: tupikov@nppame.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88123274667; д.т.н.; профессор.; зам. ген. Директора; директор научно-производственного комплекса робототехнических систем специального назначения.

Павлова Валерия Анатольевна – e-mail: pavlova@nppame.ru; тел.: 88123274667; к.т.н.; зам. директора по НИОКР.

Лизин Алексей Игоревич – e-mail: lizin_a@nppame.ru; начальник центра средств интеллектуальной обработки изображений.

Гессен Павел Алексеевич – e-mail: gessen_pa@nppame.ru; зам. начальника центра средств интеллектуальной обработки изображений.

Саенко Владислав Дмитриевич – e-mail: eltova@nppame.ru; младший программист.

Tupikov Vladimir Alekseevich – SPE "Research and Production Enterprise "Air and Marine Electronics", e-mail: tupikov@nppame.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +78123274667; dr. of eng. sc.; professor; deputy director general; director of Research and production complex of special purpose robotic systems.

Pavlova Valeria Anatolyevna – e-mail: pavlova@nppame.ru; cand. of eng. sc.; deputy director of research at Research and production complex of special purpose robotic systems.

Lizin Aleksey Igorevich – e-mail: lizin_a@nppame.ru; chief of intellectual image processing center.

Gessen Pavel Alekseevich – e-mail: gessen_pa@nppame.ru; deputy chief of intellectual image processing center.

Saenko Vladislav Dmitrievich – e-mail: eltova@nppame.ru; junior programmer.

А.Е. Морозов, Н.Д. Богданов

АНАЛИЗ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАСС АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В АЛГОРИТМАХ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Представлен способ алгоритмической компенсации смещения центров чувствительных элементов акселерометров в составе высокоточной инерциальной навигационной системы. Ранее рассматриваемую компенсацию допускалось не применять, ввиду возможности минимизации ее влияния за счет конструктивных особенностей – максимально близкого расположения акселерометров друг к другу. С модернизацией комплектующих инерциальных датчиков влияние погрешности типа «size-effect» могло стать существенным по сравнению с погрешностями гироскопов и акселерометров. Целью данной работы является анализ влияния этой погрешности на решение навигационной задачи в условиях точностей современных инерциальных датчиков. В работе подробно изложена схема компенсации: отдельно рассматривается компенсация к произвольному центру инерциального измерительного блока, учитывающая эффект разнесения триады акселерометров, и к центру вращения транспортного средства, учитывающая место установки на объект эксплуатации. Дополнительно проанализированы конструкции расположения акселерометров на платформах блока датчиков высокоточной и малогабаритной инерциальных навигационных систем. С помощью серии вращений на наклонно поворотном столе проведен расчет разнесения акселерометров по методу наименьших квадратов относительно точки пересечения осей вращения используемого стенда. Получена оценка невязки вычисленных коэффициентов разнесения чувствительных элементов от их номинальных значений. На примере калибровочных вращений достигнуто уменьшение всех паразитных явлений в сигнале акселерометров, проявляемых в результате центростремительного и тангенциального ускорений. Аналитически выведено влияние паразитного сигнала акселерометров при курсовой качке изделия на исчисление координат и раскрыта зависимость исследуемой погрешности от времени работы изделия в условиях постоянной качки. С целью верификации проведены реальные испытания на наклонно-поворотном столе и изложены полученные результаты эффективности компенсации. Приведены результаты компенсации при летных испытаниях на двухместном вертолете вертикального взлета и посадки. Расчет летных испытаний производился путем натурного моделирования по записанным данным с учетом синхронизации используемых датчиков. Отдельно рассматривается компенсация в режиме сведения триады акселерометров к произвольной точке и в режиме сведения акселерометров к центру вращения транспортного средства.

Алгоритм компенсации; эффект разнесения чувствительных элементов; инерциальная навигация; методические погрешности БИНС; акселерометр; тангенциальное и центростремительное ускорения.

A.E. Morozov, N.D. Bogdanov

ANALYSIS OF THE RELATIVE PLACEMENT OF THE SENSITIVE MASSES OF ACCELEROMETERS IN ALGORITHMS FOR STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

The present study introduces a method for algorithmic compensation of the displacement of the centers of sensitive elements of accelerometers within a high-precision inertial navigation system. Previous considerations omitted this compensation due to the potential for minimizing its impact through structural features—specifically, the close proximity of accelerometers to each other. With the upgrading of components in the inertial sensors, the influence of size-effect errors could become significant compared to gyroscopes and accelerometers errors. This study aims to analyze the impact of these errors on solving navigation tasks under the precision conditions of modern inertial sensors. The compensation scheme is elaborated in detail: compensation to an

arbitrary center of the inertial measurement unit is separately discussed, considering the spreading effect of the accelerometer triad, and to the center of rotation of the vehicle, accounting for the installation location on the operational object. Additionally, designs of accelerometer placements on platforms of high-precision and compact inertial navigation system sensor blocks are analyzed. By conducting a series of rotations on an inclinable turntable, the spreading of accelerometers is calculated using the least squares method concerning the intersection point of the rotation axes of the stand used. An estimation of the discrepancy of the calculated spreading coefficients of sensitive elements from their nominal values is obtained. Through calibration rotations, the reduction of all parasitic phenomena in the accelerometer signal due to centripetal and tangential accelerations is achieved. The influence of parasitic accelerometer signals during the roll of the product on coordinate computation is analytically derived, revealing the dependency of the studied error on the product's operational time under constant rolling conditions. Real tests on the inclinable turntable were conducted for verification, and the obtained results of compensation effectiveness are presented. The compensation results from flight tests on a two-seat vertical takeoff and landing helicopter are provided. The flight test calculations were conducted through physical modeling based on recorded data with the synchronization of the employed sensors considered. Compensation in the mode of aligning the accelerometer triad to an arbitrary point and aligning accelerometers to the center of the vehicle's rotation is separately discussed.

Compensation algorithm; size-effect; inertial navigation; methodological errors INS; accelerometer; tangential and centripetal acceleration.

Введение. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) стали широко применяться для решения задач ориентации (определение углов курса, крена и тангажа) и навигации (расчет линейных скоростей и координат) различных подвижных объектов, обеспечивая надежность и автономность при требуемом уровне точности [1]. Принципиальной особенностью систем инерциальной навигации являются навигационные ошибки, накапливаемые вследствие наличия различного рода остаточных погрешностей после заводских регулировок и калибровок изделия. Работы, посвященные теме повышения точности БИНС направлены на снижение различного рода инструментальных и методических погрешностей [2–4].

За последние десятилетие точность чувствительных элементов (ЧЭ) существенно увеличилась [5, 6]: из линейки ПАО «ПНППК» уровень случайного блуждания угла (ARW) гироскопов снизился с $0,0012 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ до $0,00035 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, а гистерезис смещения нуля акселерометра снизился с 600 мкг до 85 мкг. Модернизация ЧЭ и снижение инструментальных погрешностей влекут за собой необходимость пересмотра принятых математических моделей в алгоритмах БИНС и учета новых поправок для снижения методических погрешностей. Одной из методических погрешностей является влияние «size-effect» (восприимчивость акселерометров к вращению) [7], оно возникает в следствии предположения о существовании материальной точки при расчете навигационного алгоритма, однако физически чувствительные элементы акселерометров разнесены друг от друга. Ранее влияние «size-effect» удавалось снизить путем максимально близкой установки чувствительных элементов друг к другу, что позволяло снизить данную погрешность до величин сопоставимых с уровнем шумовой составляющей инерциальных датчиков. После существенной модернизации БИНС дальнейшее снижение рассматриваемой погрешности невозможно ввиду ограничения конструктивного расположения акселерометров, но возможна алгоритмическая компенсация на бортовом вычислителе. Следует отметить, что для высокодинамичных подвижных объектов с небольшим временем работы более существенный эффект на величину навигационной ошибки оказывают погрешности именно акселерометров, а не гироскопов.

Цель данной работы – продемонстрировать влияние методической погрешности типа «size-effect» на исчисление навигационных параметров БИНС на современных чувствительных элементах производства ПАО «ПНППК». При этом большинство этапов решается в достаточно общем виде, что позволяет распространить основные ее подходы для широкого круга аналогичных систем.

Компенсационная схема. Общая компенсационная схема (рис. 1) состоит из блока расчета центробежных ускорений в зависимости от текущей угловой скорости $f(\vec{\omega})$ и тангенциальных ускорений в зависимости от текущего углового ускорения $f(\dot{\vec{\omega}})$. Стоит отметить, что для расчета вектора тангенциального ускорения необходимо, чтобы вектор угловых ускорений был наблюдаем и хорошо обусловлен. Так же важно учитывать синхронизацию используемых датчиков [8], так как компенсационный сигнал акселерометров формируется на основе показаний гироскопов, оба эти сигнала должны быть получены с достаточной синхронизацией.

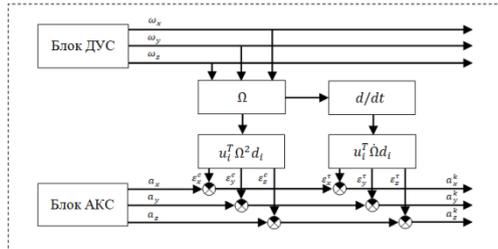


Рис. 1. Схема компенсации «size-effect»

В матричной форме уравнения компенсации представимы в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^c &= u_i^T \Omega^2 r_i, i = x, y, z \\ \varepsilon_i^t &= u_i^T \dot{\Omega} r_i, i = x, y, z \\ a_i^k &= a_i - \varepsilon_i^c - \varepsilon_i^t, i = x, y, z \end{aligned}$$

где a_i^k – компенсированное ускорение по i оси, a_i – измеренное ускорение по i оси, ε_i^c – центробежное ускорение по i оси, ε_i^t – тангенциальное ускорение по i оси, u_i – единичный вектор связывающий чувствительную ось гироскопа к соответствующей чувствительной оси акселерометра, Ω - кососимметричная матрица, составленная из проекций угловых скоростей, r_i – радиус вектор от принятого начала координат до центра ЧЭ акселерометра на i оси прибора.

Кососимметричная матрица угловых скоростей имеет вид:

$$\Omega = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix}.$$

В системе координат (СК), связанной с инерциальными датчиками, u_i будет определяться исходя из углов перекосов гироскопов и акселерометров, а в системе координат, связанной с прибором, при условии соосности гироскопов и акселерометров, данный вектор будет совпадать с осями координатных осей, в связи с чем удобнее всего проводить компенсацию в связанной с прибором системе координат. В таком случае, вектор u_i в связанной с прибором СК будет определяться следующим образом:

$$u_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; u_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}; u_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Анализ конструкции изделий. Принято [9] разделять погрешность типа «size-effect» на погрешности от триады акселерометров и от смещения установки БИНС. Таким образом, радиус-вектор раскладывается на общую и частные составляющие:

$$r_i = r + d_i, i = x, y, z,$$

где компоненты вектора r будут характеризовать погрешность от смещения установки БИНС, а d_i – от смещения акселерометров друг относительно друга.

Через любые три точки плоскости, не лежащие на одной прямой, можно провести единственную окружность. Как правило [10, 11], чувствительные массы акселерометров стараются притянуть в центр данной окружности. Однако, в данной работе используется точка пересечения двух или, по возможности, трех нормалей от центра ЧЭ акселерометров – точка С (рис. 2,а). Данный подход позволит снизить нагрузку на бортовой вычислитель из-за отсутствия необходимости умножения на нулевые элементы векторов dx, dy, dz при компенсации смещения триады акселерометров. Еще одним из способов может быть сведение материальной точки к одному из акселерометров, например, к оси X [12] – такой подход может быть более эффективен с некоторыми конструкциями, не имеющих общего пересечения трех нормалей от центра ЧЭ акселерометров.

Если у эксплуатируемого транспортного средства (ТС) центр вращения фиксирован, то вектор r заведомо известен (рис. 2,б). В таком случае, применима компенсация «size-effect» от смещения установки. Данная погрешность является обратимой, а это означает, что чистая навигационная ошибка равна нулю, когда начальная и конечная ориентация объекта совпадают. Физически ясно [13], что максимальная навигационная ошибка равна $2r$, т.е. удвоенному расстоянию между точками центра вращения ТС и центра сведения триады акселерометров.

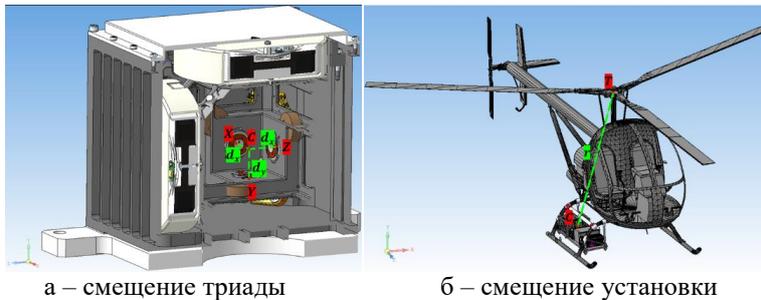


Рис. 2. Сведение центра чувствительных масс триады акселерометров

Коэффициенты векторов d_x, d_y, d_z определяются расстоянием между принятой точкой сведения триады акселерометров (точка С) к центру ЧЭ (маятника) каждого из акселерометров (точки X, Y, Z) с учетом их внутренней конструкции. Коэффициенты будут изменяться в зависимости от типов используемых акселерометров и их посадочными местами (платформой). На практике [14] этих коэффициентов оказывается достаточно для программного сведения центров ЧЭ акселерометров в одну материальную точку.

Второй тип компенсации «size-effect» возникающий от смещения оси вращения объекта до принятого центра триады акселерометров удобно разделить на временные составляющие: корпус изделия, переходную плиту и объект эксплуатации. Один и тот же блок акселерометров может использоваться в нескольких корпусах ввиду разных требований к габаритам изделия, особенно это актуально для малогабаритных изделий. Аналогично могут применяться несколько переходных плит, используемые для разного крепления на объектах или необходимые для дополнительной внешней амортизации изделия. И наконец, широкий спектр применимости изделий различного рода объектов: от наземного до воздушного транспорта – побуждает разложить общий вектор смещения установки на составляющие:

$$r = r_0 + r_n + r_T.$$

где r_0 – плечо до центра плоскости посадочного места изделия, r_n – плечо используемой переходной плиты для закрепления на объекте, r_T – плечо до центра вращения транспортного средства/испытательного оборудования.

Для сравнения на рис. 3 представлено сведение чувствительных осей акселерометров по сборочным чертежам в общую точку для систем высокоточной и малогабаритной БИНС. Расположение акселерометров у этих систем кардинально отличается, что необходимо учитывать при расчете компенсации.

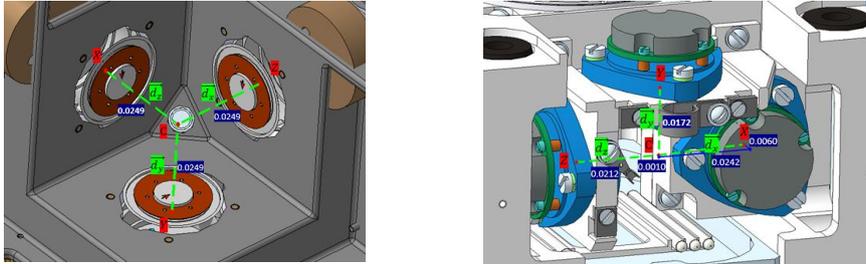


Рис. 3. Сведение триады акселерометров на примерах платформ высокоточной и малогабаритной БИНС

Номинальные значения для конструкции высокоточной БИНС, будут определяться следующими выражениями:

$$d_x[\text{м}] = \begin{pmatrix} 0.0249 \\ 0.0000 \\ 0.0000 \end{pmatrix}; d_y[\text{м}] = \begin{pmatrix} 0.0000 \\ 0.0249 \\ 0.0000 \end{pmatrix}; d_z[\text{м}] = \begin{pmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ 0.0249 \end{pmatrix}.$$

Номинальные значения для конструкции малогабаритной БИНС будут определяться следующими выражениями:

$$d_x[\text{м}] = \begin{pmatrix} 0.0060 \\ 0.0010 \\ 0.0242 \end{pmatrix}; d_y[\text{м}] = \begin{pmatrix} 0.0000 \\ -0.0172 \\ 0.0000 \end{pmatrix}; d_z[\text{м}] = \begin{pmatrix} 0.0000 \\ 0.0000 \\ -0.0212 \end{pmatrix}.$$

Эти величины соразмерны со значениями, рассмотренными в работе [13], где максимальное расстояние равняется 0.0282 м. Далее будет рассматриваться только высокоточная БИНС, так как все действия для малогабаритной будут аналогичными за исключение описанных выше коэффициентов.

Калибровка изделий. На практике, коэффициенты, для применения компенсации типа «size-effect», можно вычислить с помощью специальных вращений на наклонно-поворотном столе (НПС). Иногда эти коэффициенты определяют при калибровке изделия [15, 16] или на этапе выставки с помощью предварительных вращений на объекте [17–19].

В данной работе проведена серия из трех последовательных поворотов на трехосном НПС АС3367-ТСС вокруг каждой оси БИНС таким образом, что две перпендикулярные оси совершают движение в плоскости горизонта (рис. 4).

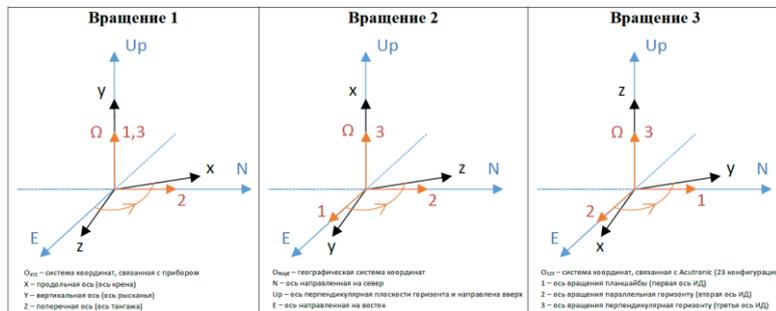


Рис. 4. Набор вращений для калибровки «size-effect»

Расчет разнесения чувствительных элементов акселерометра можно провести классическим методом наименьших квадратов (МНК) [20], тогда матрица состояния будет выглядеть следующим образом:

$$H = [1(t) \quad \omega_{x,y,z}^2(t) \quad \dot{\omega}_{x,y,z}(t)],$$

где $\omega_{x,y,z}^2$ – квадрат угловой скорости для оси, вдоль которой производится вращение $[(\text{рад}/\text{с})^2]$, $\dot{\omega}_{x,y,z}$ – производная (приращение) угловой скорости для оси, вдоль которой производится вращение $[\text{рад}/\text{с}^2]$, 1 – единичные показания.

Для случая вращения вокруг оси Y (Вращение 1) получаем:

$$\begin{pmatrix} \tau_x & \tau_z \\ r_x(1) & r_z(3) \\ -r_x(3) & r_z(1) \end{pmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T [a_x(t) \quad a_z(t)].$$

Для случая вращения вокруг оси X (Вращение 2) получаем:

$$\begin{pmatrix} \tau_y & \tau_z \\ r_y(2) & r_z(3) \\ r_y(3) & -r_z(2) \end{pmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T [a_y(t) \quad a_z(t)].$$

Для случая вращения вокруг оси Z (Вращение 3) получаем:

$$\begin{pmatrix} \tau_y & \tau_x \\ r_y(2) & r_x(1) \\ -r_y(1) & r_x(2) \end{pmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T [a_y(t) \quad a_x(t)].$$

где $a_{x,y,z}$ – показания акселерометра для соответствующей оси $[\text{м}/\text{с}^2]$, $r_{x,y,z} = d_{x,y,z} + r$ – общее плечо для соответствующей оси датчика, включающее разнесение чувствительных элементов внутри триады акселерометров и общее смещение до центра вращения НПС, $\tau_{x,y,z}$ – постоянная составляющая акселерометра для соответствующей оси, вызванная нестабильностью параметров (не используется в дальнейшем, необходима для адекватной оценки других параметров).

Помимо шумовых характеристик инерциальных датчиков, точность определения искомых коэффициентов по МНК в основном будет зависеть от длительности воздействия (вращения/углового ускорения) и величины этого воздействия. Чтобы получить удовлетворительную точность проводимых расчетов для испытаний на НПС, было выбрано вращение с угловой скоростью вращения $20^\circ/\text{с}$ и с переменным угловым ускорением $\pm 10^\circ/\text{с}^2$ как показано на рис. 5. Продолжительность испытания составляет две минуты (пять полных циклов поворота в положительную и отрицательную стороны). Для оценки фактической точности и повторяемости результатов каждое испытание дополнительно повторялось пять раз.

Среднеквадратическое отклонение по пяти повторам испытания при заданных воздействиях составило в среднем 0,04 мм и не более 0,12 мм. Расхождение средних значений, полученных по МНК, от их номиналов составляет в среднем 0,5 мм и не более 1.6 мм.

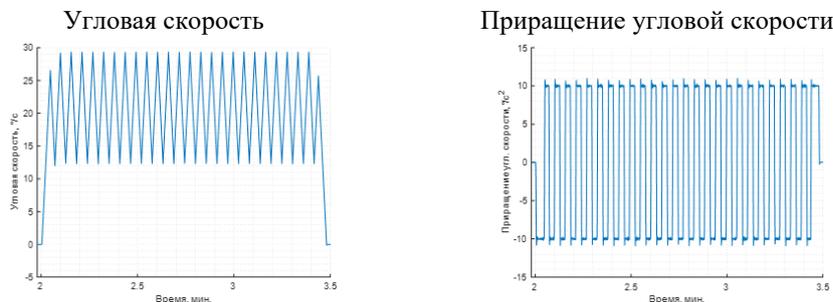


Рис. 5. Профиль вращений изделия на НПС

Разница определения коэффициентов «size-effect» по МНК от их номиналов:

$$\Delta r_x[\text{м}] = \begin{pmatrix} 0.0007 \\ 0.0000 \\ -0.0009 \end{pmatrix}; \Delta r_y[\text{м}] = \begin{pmatrix} -0.0016 \\ 0.0000 \\ -0.0011 \end{pmatrix}; \Delta r_z[\text{м}] = \begin{pmatrix} -0.0005 \\ 0.0000 \\ -0.0008 \end{pmatrix}.$$

Среднеквадратическое отклонение коэффициентов «size-effect», определенных по МНК, составило:

$$\sigma(r_x)[\text{м}] = \begin{pmatrix} 0.000118 \\ 0.000011 \\ 0.000059 \end{pmatrix}; \sigma(r_y)[\text{м}] = \begin{pmatrix} 0.000014 \\ 0.000025 \\ 0.000035 \end{pmatrix}; \sigma(r_z)[\text{м}] = \begin{pmatrix} 0.000047 \\ 0.000011 \\ 0.000071 \end{pmatrix}.$$

Результаты компенсации по калибровочным вращениям изображены на рис. 6. Проекция горизонтальных акселерометров смещены для наглядности от нуля на ± 100 мкг. После компенсации все паразитные явления от центростремительного и тангенциального ускорений устраняются, оставив только осцилляции, вызванные перекосами осей НПС от плоскости горизонта. Перекосы НПС составляют -11 и -6 угловых секунд (эквивалентно -53 мкг и -29 мкг) в северном и восточных направлениях соответственно, и компенсации не подлежат ввиду того, что являются частью полезного сигнала (фактическое измерение плоскости горизонта изделия). Каждое вращение проведено в положительную и отрицательную стороны.

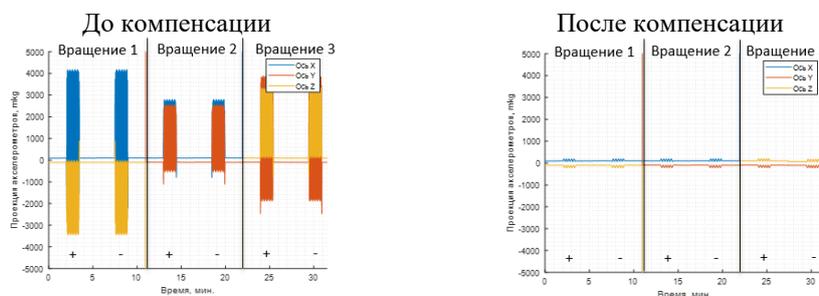


Рис. 6. Эффективность компенсации «size-effect» при вращениях

Применение компенсации при качке. Одним из испытаний наиболее чувствительным к исследуемому типу погрешности является испытание на качку изделия [21]. При данных воздействиях постоянно присутствует угловая скорость и угловое ускорение объекта, изменяющиеся по гармоническому закону. Эти проверки в зависимости от условий эксплуатации закладывает заказчик на приемосдаточные испытания.

Рассмотрим в аналитическом виде чувствительность счисления координат на гармоническое воздействие с амплитудой A и частотой f вдоль курсовой оси БИНС.

Вектор угловой скорости и кососимметричная матрица примут вид:

$$\vec{\omega}(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ A \cos(2\pi ft) \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \Omega(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & A \cos(2\pi ft) \\ 0 & 0 & 0 \\ -A \cos(2\pi ft) & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Рассчитаем матрицу квадрата угловой скорости и применим формулу понижения степени (половинного угла):

$$\Omega^2(t) = \begin{pmatrix} -A^2 \frac{1+\cos(4\pi ft)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -A^2 \frac{1+\cos(4\pi ft)}{2} \end{pmatrix}.$$

Матрицу углового ускорения получим из производной по угловой скорости:

$$\dot{\Omega}(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -2\pi f A \sin(2\pi ft) \\ 0 & 0 & 0 \\ 2\pi f A \sin(2\pi ft) & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Тогда компенсационный сигнал по линейному ускорению будет составлять:

$$a^k(t) = \begin{pmatrix} u_x^T \Omega^2 r_x + u_x^T \dot{\Omega} r_x \\ u_y^T \Omega^2 r_y + u_y^T \dot{\Omega} r_y \\ u_z^T \Omega^2 r_z + u_z^T \dot{\Omega} r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_x(1) * A^2 \frac{1+\cos(4\pi ft)}{2} - r_x(3) * 2\pi f \text{Asin}(2\pi ft) \\ 0 \\ -r_z(3) * A^2 \frac{1+\cos(4\pi ft)}{2} + r_z(1) * 2\pi f \text{Asin}(2\pi ft) \end{pmatrix}$$

Дважды интегрируя, получим ошибку счисления инерциальных координат:

$$\iint a^k(t) = \begin{pmatrix} r_x(3) * \frac{\text{Asin}(2\pi ft)}{2\pi f} - r_x(1) * \frac{A^2}{2} \left[\frac{t^2}{2} - \frac{\cos(4\pi ft)}{(4\pi f)^2} \right] \\ 0 \\ -r_z(1) * \frac{\text{Asin}(2\pi ft)}{2\pi f} - r_z(3) * \frac{A^2}{2} \left[\frac{t^2}{2} - \frac{\cos(4\pi ft)}{(4\pi f)^2} \right] \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} -r_x(1) * \frac{A^2}{4} t^2 \\ 0 \\ -r_z(3) * \frac{A^2}{4} t^2 \end{pmatrix}$$

Составляющими с тригонометрическими функциями можно пренебречь ввиду того, что при постоянной частоте качки погрешность через эти функции не накапливается со временем. Основная погрешность на инерциальные координаты накапливается пропорционально квадрату времени и возникает из-за влияния центробежного ускорения на объект. Исходя из аналитического расчета, тангенциальное ускорение не оказывает существенной погрешности на исчисление инерциальных координат. С целью снижения вычислительной нагрузки и уменьшения влияния от шумовой характеристики ВОГ в некоторых случаях компенсацией от углового ускорения можно пренебречь.

Рассмотрим фактическую чувствительность счисления координат на гармоническое воздействие вдоль курсовой оси. Подадим воздействие с одной частотой и различной амплитудой после 10 минутной стоянки (режим выставки):

$$\omega_k = A \sin(2\pi t) \begin{cases} \text{при } 10 \text{ мин} < t < 20 \text{ мин} & A = 10^\circ \\ \text{при } 20 \text{ мин} < t < 30 \text{ мин} & A = 20^\circ \\ \text{при } 30 \text{ мин} < t < 40 \text{ мин} & A = 30^\circ \end{cases}$$

Фактические показания акселерометров (рис. 7) подтверждают аналитический вывод – при воздействии качки в сигнале ускорений присутствует смещение и гармонические составляющие, зависящие от амплитуды воздействия. При априорной информации о центре вращения системы возможно применение компенсации в реальном времени, которое практически полностью списывает явления от центробежного и тангенциального ускорений. Однако для навигационного алгоритма, критически важно сведение чувствительных масс в единую точку, так как кинематические уравнения движения построены на предположении о существовании материальной точки [22].

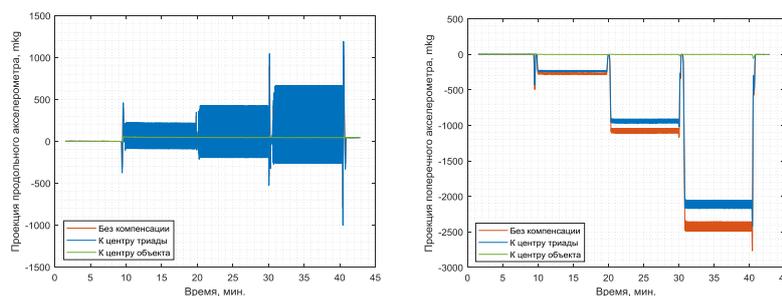


Рис. 7. Показания акселерометров при воздействии курсовой качки

При расчете навигационных параметров при качке изделия по углу курса, нет принципиальной разницы между сведением к центру триады или к центру вращения объекта (рис. 8) ввиду того, что изделие всегда возвращается в начальное положение. По характеру накопления ошибки заметно, что при использовании ком-

пенсаций линейные скорости принимают вид колебаний с амплитудой Шулера и не зависят от амплитуды воздействия качки – что является эталоном эффективности компенсации «size-effect». Компенсация по северной составляющей линейной скорости больше восточной составляющей ввиду наличия большего плеча от центра вращения НПС в данной проекции.

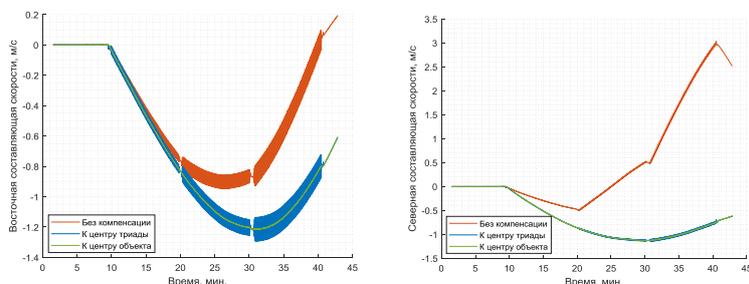


Рис. 8. Проекция линейных скоростей при воздействии качки

В навигационном режиме пройденный путь практически не меняется с применением компенсации, однако фактические координаты расходятся на 3,0 км. Это происходит из-за того, что «size-effect» в основном оказывает влияние на углы ориентации, а вследствие неправильной ориентации искажается траектория движения (рис. 9). Траектория с компенсацией к центру объекта полностью совпадает со сведением только триады акселерометров.

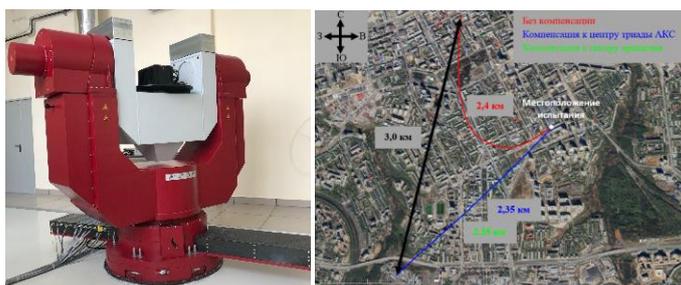


Рис. 9. Удержание координат при качке по углу курса на 3х-осном НПС

Летные испытания. Объектом эксплуатации для летных испытаний выбран двухместный вертолет АК1-3 производства компании ООО «КБ Аэрокоптер». Испытания проводились 19.09.2022 с аэродрома «Луговское» (точка старта $\varphi_0 = 57.9825$, $\lambda_0 = 55.7089$). Продолжительность испытаний составила 1,8 часа и представляет из себя прямолинейный полет с разворотом и возвратом на точку старта. Во время полета производилась запись телеметрии с частотой съёма сигнала 1600 Гц, все дальнейшие расчеты алгоритмической компенсации и навигационного решения проводились натурным моделированием по полученной телеметрии. Ошибка инерциальной навигационной системы оценивается относительно показаний со спутниковой навигационной системы.

По результатам летных испытаний компенсация позволила снизить ошибку на 1,1 км (0,3 морских миль за час), а путевая скорость снизилась на 0,828 м/с. Однако это составляет незначительную часть на фоне погрешности накопленной по прилету. Ошибки в инерциальном режиме связаны с неэффективно подобранной системой амортизации – заранее не были неизвестны вибровоздействия на вертолете. Компенсация со сведением к центру вращения вертолета значительного уве-

личения к точности не обеспечивает, а со сведением всех акселерометров в общую произвольную точку может быть полезным при текущих достижимых погрешностях БИНС в две морские мили и ниже.

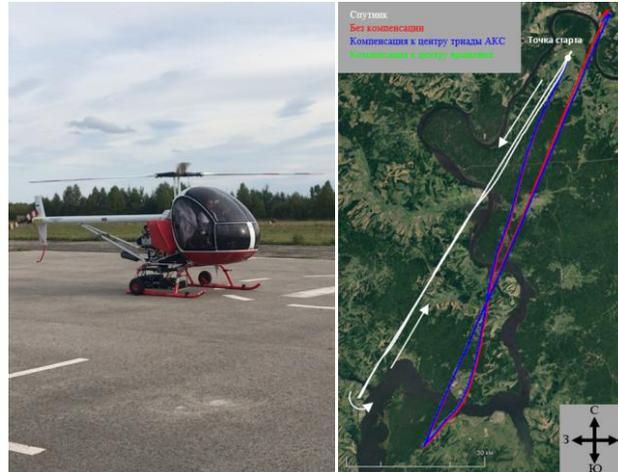


Рис. 10. Инерциальное навигационное решение на летных испытаниях

Заключение. При длительной эксплуатации на высокоманевренных или подверженных качке объектах в инерциальном режиме «size-effect» должен быть учтен в уравнениях движения бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Основную погрешность на определение координат при частом маневрировании вносит центростремительное ускорение.

Коэффициенты компенсации «size-effect» зависят от конструкции изделия и не нуждаются в постоянной калибровке. Оценки коэффициентов, определенные по калибровочным вращениям, не значительно отличаются от номинальных значений, определенных по сборочному чертежу.

По текущему состоянию разработок БИНС в случае удачного расположения акселерометров погрешностью типа «size-effect» можно пренебречь [23], однако при достижении высоких точностей с погрешностью БИНС примерно в две морские мили за час и ниже, необходимо брать во внимание разнесение чувствительных элементов акселерометров относительно друг друга. Величиной погрешности от разнесения акселерометров от центра вращения объекта можно пренебречь ввиду очень малого влияния и сложности настраивания коэффициентов под конкретные объекты эксплуатации. К данному типу методической погрешности следует вернуться при достижении погрешностей БИНС на порядок ниже имеющихся на текущий день, либо для применения в специфичных и узкоспециализированных задачах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения БИНС. – ГНЦ РФ «Концерн ЦНИИ Электроприбор», 2009. – 280 с.
2. Белоусов М.А., Зобачев Д.Ю. Верификация модели волоконно-оптического гироскопа с различной глубиной модуляции // Навигация, наведение и управление летательными аппаратами: Тезисы докладов. – М., 2019. – С. 94-96.
3. Трухова Н.А., Белоусов М.А., Ременникова М.В. Исследование влияния выходных характеристик суперлюминисцентного волоконного источника на точностные параметры волоконно-оптического гироскопа // XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации»: Сб. трудов. – Тамбов, 2019. – С. 70.

4. *Tarasenko A.B.* Создание и исследование высокоточной навигационной системы на основе лазерных гироскопов с виброподставкой: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2021. – 94 с.
5. *Belousov M.A., Krivosheev A.I.* Compensation of Excess Intensity Noise of a Light Source in a Fiber-Optic Gyroscope // 30th Saint Petersburg ICINS. – Saint Petersburg, May 2023. – P. 245-246.
6. *Минкин А.М.* Технология изготовления чувствительного элемента кварцевого акселерометра методом объемной микрообработки // Прикладная фотоника. – 2019. – Т. 6, № 3-4. – С. 147-159.
7. *Jiang Q., Tang J. and Han S.* Analysis and compensation for size effect error of laser gyro Strapdown Inertial Navigation System // Infrared and Laser Engineering. – 2015. – 44 (4). – P. 1110-1114.
8. *Morozov A.E., Belousov M.A., Zobachev D.Yu.* Methodology for Determining the Delays in Sensor Measurements in Navigation Systems // 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – Saint Petersburg, 2023. – P. 280-281.
9. *Slobodan J.* Size effect of the inertial measurement unit and inside IMU accelerometers on aircraft position error, *Vojnitechnicki glasnik*. – Beograd, 2003. – P. 171-181.
10. *Ren L., Du J. and Wang M.* Error Analysis and Compensation of Size Effect in INS with IMU Rotation // Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. – 2013. – 34(6) – P. 1424-1435.
11. *Xie B., Qin Y., Wan Y. and Shi. W.* Analysis and compensation for size effect of strapdown inertial navigation system // Journal of Chinese Inertial Technology. – 2012. – 20 (4). – P. 414-420.
12. *Драницына Е.В.* Калибровка измерительного модуля прецизионной БИНС на волоконно-оптических гироскопах: дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2016. – 89 с.
13. *Hung J.C., Hunter J.S., Stripling W.W., White H.V.* Size-effect on navigation using a strapdown IMU // Guidance and Control Directorate Technology Laboratory. – Redstone Arsenal, Alabama, 1979. – P. 29.
14. *You J., Qin Y., Yang P. and Yan G.* Modeling and Calibration of the Accelerometer Size Effect Error of the SINS // Journal of Astronautics. – 2012. – 33 (3). – P. 311-317.
15. *Козлов А.В., Шаймарданов И.Х.* Калибровка внутреннего разнесения чувствительных масс акселерометров БИНС-РТ // XXXI конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. – СПб., 2018. – С. 25-34.
16. *Zhou G., Xu W. and Ye P.* Lever-Arm Calibration Method of Fiber Strapdown Inertial Navigation System Accelerometer // Piezoelectrics & Acousto-optics. – 2015. – 37 (6). – P. 945-949.
17. *Gao P., Li K., Wang L., Liu Z.* A self-calibration method for tri-axis rotational inertial navigation system // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – United States, 2018. – Vol. 65, Issue 2. – P. 1655-1664.
18. *Вязьмин В.С., Голован А.А., Говоров А.Д.* Начальная и конечная выставки бескарданного аэрогравиметра с определением смещений нулевых сигналов акселерометров // Гироскопия и навигация. – 2023. – Т. 31, № 1 (120). – С. 76-88.
19. *Chang Z., Zhang Z., Zhou Z., Xu Z., Guo Q.* Initial Alignment for Rotating SINS Based on Online Compensation of Size Effect // Acta Armamentarii. – 2020. – 41 (10). – P. 2016-2022.
20. *Sharon E.* A Least Squares Approach to Size Effect in Inertial Navigation // IEEE Proceedings of Position Location and Navigation Symposium. – Monterey, United States, 2014. – P. 721-732.
21. *Poletti L., Sendra D. Sanchis, Siryani R.* A direct approach for high-quality MEMS based IMU/INS production // Inertial Sensors and Systems. – Braunschweig, Germany, 2020. – 19 p.
22. *Salychev O.S.*, Verified approaches to inertial navigation. – Moscow: The Bauman Moscow State Technical University, Russia, 2017. – 368 p.
23. *Тарасенко А.Б., Фомичев А.А., Ларионов П.В., Колчев А.Б., Филатов П.А., Миликов Э.А.* Разработка, настройка и испытания новой малогабаритной инерциально-спутниковой навигационной системы // Сб. трудов XXVIII Санкт-петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб., 2023. – С. 151-157.

REFERENCES

1. *Matveev V.V., Raspopov V.Ya.* Osnovy postroeniya BINS [Basics of building SINS]. GNTS RF «Kontsern TSNII Elektropribor», 2009, 280 p.
2. *Belousov M.A., Zobachev D.Yu.* Verifikatsiya modeli volokonno-opticheskogo giroskopa s razlichnoy glubinoj modulyatsii [Verification of a fiber-optic gyroscope model with different modulation depths], *Navigatsiya, navedenie i upravlenie letatel'nyimi apparatami: Tezisy dokladov* [Navigation, guidance and control of aircraft: Abstracts of reports]. Moscow, 2019, pp. 94-96.

3. *Trukhova N.A., Belousov M.A., Remennikova M.V.* Issledovanie vliyaniya vykhodnykh kharakteristik superlyuminiscentnogo volokonnoogo istochnika na tochnostnye parametry volokonno-opticheskogo giroskopa [Study of the influence of the output characteristics of a superluminescent fiber source on the accuracy parameters of a fiber-optic gyroscope], *XXVIII Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii»: Cb. trudov* [XXVIII International scientific and technical conference «Modern technologies in control, automation and information processing tasks»: Collection of works]. Tambov, 2019, pp. 70.
4. *Tarasenko A.B.* Sozdanie i issledovanie vysokotochnoy navigatsionnoy sistemy na osnove lazernykh giroskopov s vibropodstavkoy: diss. ... kand. tekhn. nauk [Creation and research of a high-precision navigation system based on laser gyroscopes with a vibration support: cand. of eng. sc. diss. Moscow, 2021, 94 p.
5. *Belousov M.A., Krivosheev A.I.* Compensation of Excess Intensity Noise of a Light Source in a Fiber-Optic Gyroscope, *30th Saint Petersburg ICINS*. Saint Petersburg, May 2023, pp. 245-246.
6. *Minkin A.M.* Tekhnologiya izgotovleniya chuvstvitel'nogo elementa kvartsevogo akselerometra metodom ob'emnoy mikroobrabotki [Technology for manufacturing the sensitive element of a quartz accelerometer using volumetric micromachining], *Prikladnaya fotonika* [Applied Photonics], 2019, Vol. 6, No. 3-4, pp. 147-159.
7. *Jiang Q., Tang J. and Han S.* Analysis and compensation for size effect error of laser gyro Strapdown Inertial Navigation System, *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (4), pp. 1110-1114.
8. *Morozov A.E., Belousov M.A., Zobachev D.Yu.* Methodology for determining the delays in sensor measurements in navigation systems, *30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. Saint Petersburg, 2023, pp. 280-281.
9. *Slobodan J.* Size effect of the inertial measurement unit and inside IMU accelerometers on aircraft position error, *Vojnitechnicki glasnik*. Beograd, 2003, pp. 171-181.
10. *Ren L., Du J. and Wang M.* Error analysis and compensation of size effect in INS with IMU rotation, *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34 (6), pp. 1424-1435.
11. *Xie B., Qin Y., Wan Y. and Shi. W.* Analysis and compensation for size effect of strapdown inertial navigation system, *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2012, 20 (4), pp. 414-420.
12. *Dranitsyna E.V.* Kalibrovka izmeritel'nogo modulya pretsizionnoy BINS na volokonno-opticheskikh giroskopakh: diss. ... kand. tekhn. nauk [Calibration of the precision SINS measuring module on fiber-optic gyroscopes: cand. of eng. sc. diss.]. Saint Petersburg., 2016, 89 p.
13. *Hung J.C., Hunter J.S., Stripling W.W., White H.V.* Size-effect on navigation using a strapdown IMU, *Guidance and Control Directorate Technology Laboratory*. Redstone Arsenal, Alabama, 1979, pp. 29.
14. *You J., Qin Y., Yang P. and Yan G.* Modeling and calibration of the accelerometer size effect error of the SINS, *Journal of Astronautics*, 2012, 33 (3), pp. 311-317.
15. *Kozlov A.V., Shaymardanov I.Kh.* Kalibrovka vnutrennego razneseniya chuvstvitel'nykh mass akselerometrov BINS-RT [Calibration of internal separation of sensitive masses of BINS-RT accelerometers], *XXXI konferentsiya pamyati vydayushchegosya konstruktora giroskopicheskikh priborov N.N. Ostryakova* [XXXI conference in memory of the outstanding designer of gyroscopic devices N.N. Ostryakova]. Saint Petersburg, 2018, pp. 25-34.
16. *Zhou G., Xu W. and Ye P.* Lever-Arm Calibration Method of Fiber Strapdown Inertial Navigation System Accelerometer, *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2015, 37 (6), pp. 945-949.
17. *Gao P., Li K., Wang L., Liu Z.* A self-calibration method for tri-axis rotational inertial navigation system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. United States, 2018, Vol. 65, Issue 2, pp. 1655-1664.
18. *Vyaz'min V.S., Golovan A.A., Govorov A.D.* Nachal'naya i konechnaya vystavki beskardannogo aerogravimetra s opredeleniem smeshcheniy nulevykh signalov akselerometrov [Initial and final alignments of a gimballess aerogravimeter with determination of the offsets of accelerometer zero signals], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2023, Vol. 31, No. 1 (120), pp. 76-88.
19. *Chang Z., Zhang Z., Zhou Z., Xu Z., Guo Q.* Initial Alignment for Rotating SINS Based on Online Compensation of Size Effect, *Acta Armamentarii*, 2020, 41 (10), pp. 2016-2022.
20. *Sharon E.* A Least Squares Approach to Size Effect in Inertial Navigation, *IEEE Proceedings of Position Location and Navigation Symposium*. Monterey, United States, 2014, pp. 721-732.

21. *Poletti L., Sendra D. Sanchis, Siryani R.* A direct approach for high-quality MEMS based IMU/INS production, *Inertial Sensors and Systems*, 2020, 19 p.
22. *Salychev O.S.*, Verified approaches to inertial navigation,. – Moscow: The Bauman Moscow State Technical University, Russia, 2017, 368 p.
23. *Tarasenko A.B., Fomichev A.A., Larionov P.V., Kolchev A.B., Filatov P.A., Milikov E.A.* Razrabotka, nastroyka i ispytaniya novoy malogabaritnoy inertsiyal'no-sputnikovoy navigatsionnoy sistemy [Development, configuration and testing of a new small-sized inertial satellite navigation system], *Sb. trudov XXVIII Sankt-peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam* [collection of works XXVIII Saint Petersburg ICINS]. Saint Petersburg, 2023, pp. 151-157.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.П. Колеватов.

Морозов Андрей Евгеньевич – Публичное акционерное общество «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»; e-mail: Morozov@pnppk.ru; тел.: +79236188385; г. Пермь, Россия; инженер-конструктор.

Богданов Никита Денисович – e-mail: BogdanovND@pnppk.ru; тел.: +79504494427; инженер-конструктор.

Morozov Andrei Evgenevich – Public joint stock company «Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company»; e-mail: Morozov@pnppk.ru; phone:+79236188385; Perm, Russia; design engineer.

Bogdanov Nikita Denisovich – e-mail: BogdanovND@pnppk.ru; phone: +79504494427; design engineer.

Раздел IV. Техническое зрение

УДК 004.853

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-247-257

А.Е. Архипов, И.С. Фомин, В.Д. Матвеев

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СЕГМЕНТАЦИИ, СОПРОВОЖДЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИДЕОАНАЛИТИКИ

Комплексирование нескольких моделей в одну систему технического зрения позволит решать более сложные и комплексные задачи. В частности, для мобильной робототехники и беспилотных летательных аппаратов (БЛА) является актуальной проблемой отсутствие наборов данных для различных условий. В работе в качестве решения данной проблемы предлагается комплексирование нескольких моделей: сегментации, сопровождения и классификации. Это позволит значительно повысить качество решения сложных задач без дополнительного обучения. Модель сегментации позволяет выделять произвольные объекты из кадров, поэтому ее можно использовать в недетерминированных и динамических средах. Модель классификации позволяет определить необходимые для навигации объекты, которые затем сопровождают с помощью третьей модели. В работе подробно описан алгоритм комплексирования моделей. Ключевым элементом в алгоритме является коррекция предсказаний моделей, позволяющая достаточно надежно сегментировать и сопровождать различные объекты. Процедура коррекции предсказаний моделей решает следующие задачи: добавление новых объектов для сопровождения, валидация сегментированных масок объектов и уточнение сопровождаемых масок. Универсальность данного решения подтверждается работой в сложных условиях, на которых не обучали модели, например, подводная съемка или изображения с БЛА. Проведено экспериментальное исследование каждой из моделей в условиях открытой местности и в помещении. Наборы данных включали сцены актуальные для мобильной робототехники. В частности, в сценах присутствовали движущиеся объекты (человек, автомобиль) и возможные преграды на пути робота. Для большинства классов метрики качества сегментации превышали 80%. Основные ошибки связаны с размерами объектов. Проведенные эксперименты наглядно демонстрируют универсальность данного решения без дополнительного обучения моделей. Дополнительно проведено исследование быстродействия на персональном компьютере с различными входными параметрами и разрешением. Увеличение количества моделей значительно повышает вычислительную нагрузку и не достигает реального времени. Поэтому одним из направлений дальнейших исследований является повышение быстродействия системы.

Нейронные сети; сегментация; сопровождения; классификация; видеоаналитика; системы технического зрения.

A.E. Arkhipov, I.S. Fomin, V.D. Matveev

INTEGRATION OF SEGMENTATION, TRACKING AND CLASSIFICATION MODELS TO SOLVE VIDEO ANALYTICS PROBLEMS

The integration of several models into one technical vision system will allow solving more complex tasks. In particular, for mobile robotics and unmanned aerial vehicles (UAVs), the lack of data sets for various conditions is an urgent problem. In the work, the integration of several models is proposed as a solution to this problem: segmentation, maintenance and classification. The segmentation model allows you to select arbitrary objects from frames, which allows it to be used in non-deterministic and dynamic environments. The classification model allows you to determine the ob-

jects necessary for navigation or other use, which are then accompanied by a third model. The paper describes an algorithm for model aggregation. In addition to models, the key element is the correction of model predictions, which allows you to segment and accompany various objects reliably enough. The procedure for correcting model predictions solves the following tasks: adding new objects to accompany, validating segmented object masks and clarifying the associated masks. The versatility of this solution is confirmed by working in difficult conditions, for example, underwater photography or images from UAVs. An experimental study of each of the models was carried out in an open area and indoors. The data sets used make it possible to assess the applicability of models for mobile robotics tasks, that is, to identify possible obstacles in the robot's path, for example, a curb, as well as moving objects such as a person or a car. They demonstrated a sufficiently high quality of work. For most classes, the indicators exceeded 80% by various metrics. The main errors are related to the size of the objects. The conducted experiments clearly demonstrate the versatility of this solution without additional training of models. Additionally, a study of performance on a personal computer with various input parameters and resolution was conducted. Increasing the number of models significantly increases the computational load and does not reach real time. Therefore, one of the directions of further research is to increase the speed of the system.

Neural networks; segmentation; tracking; classification; video analytics; computer vision.

Введение. Основным препятствием на пути повсеместного использования нейронных сетей для обработки видеопотока является отсутствие или неполнота обучающих наборов данных. Эта проблема достаточно сильно ограничивает развитие автономности у мобильных роботов и беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Для ее решения необходимо создавать новые принципы обработки видеопотока и обучения нейронных сетей. Повышения качества систем технического зрения (СТЗ) можно добиться за счет объединения нескольких моделей глубокого обучения, каждая из которых решает локальную задачу, но на достаточно высоком уровне. Это в свою очередь неизбежно увеличивает вычислительную нагрузку на обработку отдельного кадра видеопотока. При этом позволяет повысить эффективность СТЗ за счет обучения каждой отдельной модели на большом количестве примеров. При решении комплексных задач дорого и сложно формировать обучающие наборы данных, поэтому неизбежно будут возникать ошибки при распознавании кадров. Другое преимущество объединения нескольких моделей в одну систему заключается в возможности регулирования и настройки отдельных шагов обработки видеопотока. Комплексирование предсказаний позволит значительно повысить эффективность и интерпретируемость СТЗ.

В работах [1–4] уже предлагались механизмы комплексирования нескольких моделей. Чаще всего работы направлены на сопровождение одного конкретного объекта, либо же его части. В работе [5] предложен механизм комплексирования сегментации и сопровождения множества объектов, однако он имеет множество недостатков, связанных с некачественным выделением объектов и накоплением ошибки при сопровождении. На практике его сложно интегрировать для СТЗ мобильных роботов.

В настоящей работе основной упор при разработке механизма комплексирования ставился на повышение эффективности СТЗ за счет сопоставления предсказаний моделей, а также валидации предсказаний.

Универсальная модель сегментации. Сегментация изображений на отдельные объекты позволяет извлекать необходимую информацию для реализации систем управления мобильными роботами и БЛА. Наибольшую точность на сегодняшний день продемонстрировала модель универсальной сегментации SAM (Segment Anything Model) [6]. Ее ключевая особенность заключается в том, что при сегментации она не привязана к конкретным классам объектов. Ее обучали общему представлению, что такое объекты, поэтому ее можно применять для любых типов объектов и изображений без дополнительного обучения, что раньше не представлялось возможным. Авто-

ры данной модели собрали самый большой на сегодняшний день набор данных для сегментации, состоящий из 11 млн изображений и более 1 млрд масок. Преимущество рассматриваемой модели особенно актуально при работе в недетерминированной среде с заранее неопределенным набором объектов.

Принцип функционирования модели следующий. На изображение накладывается равномерная сетка из точек, для каждой из которой затем предсказывается маска объекта, на который попала данная точка. При этом обработка производится на уровне признаков изображений. Если задана одна точка – сеть вернет область в окрестности этой точки. Если две в различных частях кадра – на выходе будут две автономные области. При подаче двух и более точек, которые принадлежат одной области кадра, метод произведет операцию подавления немаксимумов, где останется одна точка, принадлежащая области, а остальные, принадлежащие той же области, но меньшие по показателю уверенности, подавляются, результатом будет одна область, которая назначается для всех переданных точек.

Еще одна особенность такого подхода заключается в возможном пересечении или наложении масок объектов. Например, при выделении на изображении здания и окон в случае семантической сегментации окна не будут являться частью здания, а будут выделены отдельной маской. В случае с SAM маска для окон будет выделена как отдельный объект «окно», и включена в маску «здания». Таким образом сеть лучше определяет семантику объектов во время обучения. Такой подход впервые использовался в работе [7], где наглядно продемонстрировали, что рассмотрение задачи семантической сегментации как попиксельной классификации не является эффективным способом обучения сети.

Архитектура SAM состоит из двух энкодеров и одного декодера. Энкодер в общем случае – это нейронная сеть, которая переводит изображение, текст или иные данные в сжатый вектор представлений, который обычно представляет из себя вектор чисел заданной длины. Первый энкодер выделяет вектор признаков из входного изображения. После обучения данный вектор признаков для каждого изображения несет некоторую высокоуровневую обобщенную информацию. Вторым энкодером отвечает за извлечение признаков промпта (prompt – подсказка, запрос) – это запрос, подсказка, или инструкция для нейронной сети, которая обычно задается в текстовой форме. В сети SAM запрос может быть представлен координатами точки или прямоугольником, бинарной маской или текстовым описанием. Для каждой пары признаков промпта и изображения генерируется с помощью декодера бинарная маска, в которой 1 означает наличие объекта, соответствующего подсказке, а 0 его отсутствие. Для каждого промпта генерируется собственная бинарная маска. Во время обработки видеопотока с помощью SAM необходимо сопоставлять объекты на соседних кадрах последовательности для обеспечения согласованности между объектами.

Модель сопровождения. Задача сопровождения масок сегментации в видеопотоке появилась не так давно, что связано в первую очередь со сложностью формирования наборов данных для видео. Подразумевается, что на вход модели поступает кадр и соответствующая для него маска сегментации объектов. Модель выполняет сопровождение выделенных объектов на последующих кадрах, то есть для каждого изображения модель выдает маску сегментации. Такой подход может быть достаточно эффективен при сегментации первого кадра с помощью SAM с последующим сопровождением полученных масок объектов. Наибольшие показатели метрик подремонтровала модель для сопровождения множества объектов DeAOT (Decoupling Features in Association Objects with vision Transformers, разделение признаков, объединенное с визуальными трансформерами) [8, 9] ориентированная на иерархическое распространение результатов полуавтоматической разметки объектов для задачи сегментации объектов на видео. Модель имеет кратковременную и долговременную память. Отличие между ними состоит в количестве охватываемых кадров для запоминания. Основным ограничением при запоминании является память вычислительного устройства.

С практической точки зрения взаимодействие с методом выглядит следующим образом. На вход алгоритма подаются полученные тем или иным способом маски объектов (для каждого пикселя изображения задано значение класса объекта в диапазоне от 1 до 255, 0 – отсутствие объекта, фон). Далее нейронная сеть для последующих кадров видео самостоятельно выделит эти объекты за счет сопоставления признаков объектов на изображении с масками. Новая маска показывает, куда переместились на кадре соответствующие объекты. В силу правил кодирования, всего за один запуск на одном видео или на одной группе изображений может присутствовать не более 255 различных объектов, что накладывает некоторые ограничения, поэтому требуется предвзительно обрабатывать данные сегментации так, чтобы не превысить это число.

Визуально-языковая модель. Для классификации отдельных объектов, выделенных с помощью универсальной модели сегментации может быть использована визуально-языковая модель. Особенность данного класса моделей состоит в мультимодальности представления данных, то есть они могут сопоставлять текстовые описания с изображениями. На сегодняшний день выложено в открытой доступ уже множество подобных моделей [10-12]. В работе используется модель CLIP [13], первая из класса визуально-языковых моделей. Принцип работы сети заключается в следующем. Она состоит из двух энкодеров, обученных на большом количестве примеров. Первый обрабатывает изображение и преобразовывает его в вектор признаков, размером 512 элементов. Вектора для похожих изображений ложатся в близкие области пространства признаков, вектора для разных изображений ложатся в далекие области пространства признаков. Вторым энкодер принимает на вход короткий текст, одно или несколько слов, описывающих объект или понятие, а на выходе возвращает вектор той же размерности. Аналогично, вектора, соответствующие семантически близким понятиям, ложатся в пространстве признаков близко друг от друга, далекие понятия – далеко друг от друга. Пространства признаков для обеих сетей напрямую связаны между собой, то есть вектор для текстового описания объекта будет в пространстве признаков расположен близко к вектору для изображения этого объекта.

Исходя из этого предлагается следующий вариант реализации классификации областей с использованием модели CLIP. На вход поступает изображение с размеченным рассмотренными выше средствами набором областей. Каждая область извлекается из RGB-изображения стандартными средствами, и обрабатывается сетью, отвечающей за извлечение вектора признаков из изображений. Для всех понятий (объектов), которые должны распознаваться алгоритмом, а также ряда синонимов заранее построены вектора в пространстве признаков с помощью текстовой части сети. Далее для изображений каждого объекта извлекаются признаки и оценивается схожесть с признаками текстовых описаний.

Комплексирование нескольких моделей. Некоторые задачи, являются достаточно сложными, например, сопровождение масок сегментации в видеопоследовательности. Для таких задач дорого размечать большие наборы данных, поэтому сегодня они небольшие в сравнении с наборами, предназначенными для обработки отдельных изображений. Набор данных напрямую влияет возможность модели работать с новыми данными и новыми условиями съемки. Чаще всего при наличии малых наборов данных нейронных сети обладают низким качеством работы. Однако счет комплексирования моделей, обученных на больших наборах данных, можно решать сложные задачи без дополнительного обучения моделей. Разработанная система объединяет три ранее рассмотренные модели: SAM для выделения объектов, DeAOT для сопровождения, CLIP для анализа объектов. На рис. 1 приведена краткая схема комплексирования моделей. В момент инициализации SAM сегментирует объекты в первом кадре, затем с помощью модели CLIP определяются необходимые для сопровождения объекты. Они идентифицируются, то есть им присваивается уникальный ID для сопровождения. В рассмотренном примере выделены дорога, как зона для возможного перемещения и бордюр с газоном, как

потенциальная преграда на пути мобильного робота. Далее выделенные объекты сопровождаются с помощью DeAOT, который сегментирует объекты на последующих кадрах. Каждый N кадр (в текущей реализации N = 10) дополнительно обрабатывается с помощью SAM для коррекции предсказаний.

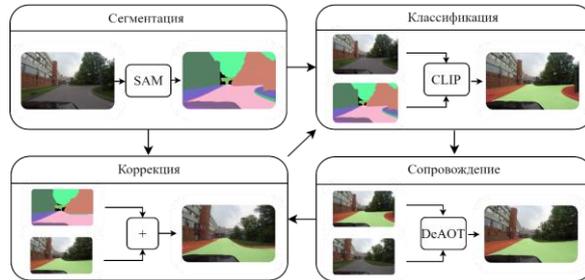


Рис. 1. Схема комплексирования нескольких моделей

Процедура коррекции решает следующие задачи: добавление новых объектов для сопровождения, валидация сегментированных масок объектов и уточнение сопровождаемых масок. Регулярно возникает ситуация, когда объекты на краях изображений некорректно сегментированы. Только при появлении большей части объекта на кадре удается понять границы его масок. Для решения этой проблемы реализован механизм валидации масок сегментации за счет сопровождения объектов в обратной последовательности. Если объект устойчиво сопровождается на нескольких кадрах, то, вероятно, он выделен корректно.

Выделение объектов из фона является достаточно простой операцией, поэтому детально не описывается. Если сегментированный SAM объект находится большей частью на фоне и не перекрывает другие объекты, то он идентифицируется и сопровождается на последующих кадрах как отдельный объект. Выделение новых объектов среди сопровождаемых является достаточно сложной задачей. Зачастую могут быть две крайности, когда несколько объектов выделены одной маской и когда один объект разделяется на несколько небольших областей. Реализованы определенные эвристические правила по выделению объектов на основе IoU (Intersection over Union) между масками сегментации и сопровождения. На рис. 2 приведен алгоритм сопоставления масок сегментации и сопровождения.

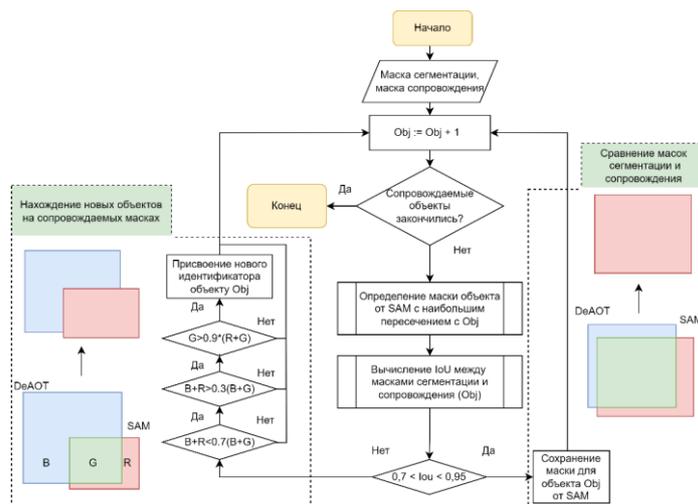


Рис. 2. Алгоритм сопоставления масок сегментации и сопровождения

Кроме того, SAM гораздо точнее определяет границы объектов в сравнении с DeAOT, поэтому при небольших различиях в предсказаниях масок одних и тех же объектов необходимо делать выбор в пользу масок SAM. Для этого реализован механизм сравнения масок при комплексировании объектов. Если значение IoU высоко, то маска корректируется в пользу сегментации SAM, который гораздо надежнее выделяет границы объектов.

Как упоминалось выше наиболее сложными задачами являются те, для которых нет репрезентативных наборов данных. Среди них можно выделить подводную съемку и изображение с камеры БЛА. На рис. 3 приведен пример работы разработанного алгоритма комплексирования моделей под водой для выделения протяженного объекта, а также с камеры БЛА, следующего за автомобилем [14]. Для БЛА с помощью CLIP среди всех масок определены дорога и автомобиль.

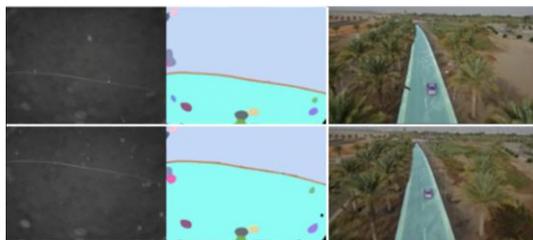


Рис. 3. Пример сегментации и сопровождения объектов

Проводить исследования на данных задачах достаточно сложно, так как отсутствует репрезентативное количество размеченных данных. Поэтому в настоящей работе эксперименты проводятся на видеороликах, сформированных для СТЗ мобильного робота.

Наборы данных. Для исследования эффективности и оценки качества работы моделей использовались наборы данных, полученные в условиях открытой местности и помещения. Для тестирования системы технического зрения в условиях открытой местности использовался обучающий набор данных для семантической сегментации. Разметка данных для семантической сегментации подразумевает установление каждому пикселю его класса. Как правило, для каждого класса объектов выделяется определенная интенсивность изображения. Все пиксели изображения приписываются к конкретному классу объектов. Разметка данных для семантической сегментации занимает большое количество времени. Для разметки использовался автоматизированный метод разметки для семантической сегментации [15, 16]. Он основан на нейросетевых моделях. Данный метод позволяет получить область, содержащую объект, используя лишь информацию о нажатиях по изображению. Пользователь предоставляет ввод в виде положительных и отрицательных нажатий. Обозначенные человеком точки с помощью предобученной модели возвращаются в виде размеченной маски, которую можно уточнить последующими нажатиями.

Участок, по которому мобильный робот может перемещаться, выделен в отдельный класс «дорога». Как правило, на данном участке в качестве перемещающихся преград выступают автомобили и люди, для которых также выделены отдельные классы «машина» и «человек» соответственно. Класс «инфраструктура» содержит небольшие объекты, например – клумбы, столбы. Для мобильного робота бордюр будет являться непреодолимой преградой, поэтому для него выделен отдельный класс «бордюр». Также существуют участки территории, которые похожи на дорогу, однако доступ к ним невозможен, например, если они расположены на уровне с бордюром, на который робот не сможет подняться. Для них также выделен отдельный класс под названием «пешеходная зона». Здания, деревья, га-

зон, небо выделены в соответствующие классы «здание», «дерево», «трава», «небо». Размеченный набор данных составил 172 изображения, которые получены в различное время года. Этот набор данных исследовался в задаче навигации мобильного робота в работе [17] с использованием семантической сегментации.

Для исследования качества моделей в помещении использованы 6 видеозаписей из набора данных VSPW [18], которые описаны в табл. 1.

Таблица 1

Описание набора данных в помещении

ID	Количество объектов	Описание сцены	Движение камеры
72	7	Картинная галерея с людьми	Вращение и перемещение
84	14	Гостиничный холл без людей	Вращение и перемещение
132	11	Аудитория в школе с детьми и учителем	Камера статична
1151	23	Перемещение с камерой по комнате	Вращение и перемещение
1153	20	Перемещение с камерой по комнате с человеком	Вращение и перемещение
1410	8	Человек в библиотеке	Камера статична

Для каждого кадра из видеопоследовательности имеется разметка для семантической сегментации. Стоит отметить, что в большинстве видеороликов производится перемещение и вращение камеры. Каждый видеоролик обладает своим набором классов, они варьируются от 7 до 23. Большинство сцен содержат перемещающихся людей, что усложняет работу модели сопровождения.

Экспериментальное исследование моделей. Особенность сегментации методом SAM заключается в достаточно большом количестве получаемых масок, которые могут разделять один объект на составные элементы. При ручной разметке объектов автомобиль выделяется одной маской. Для возможности сопоставления масок, полученных с помощью SAM и размеченных вручную, реализован алгоритм сопоставления масок, суть которого состоит в автоматическом слиянии масок, находящихся в пределах одного размеченного объекта. На рис. 4 приведен пример слияния масок, полученных с помощью SAM. Также для сравнения приведена ручная разметка.

После слияния масок можно рассчитать метрики качества сегментации. В качестве метрик использовались IoU и Dice. Для каждого класса значение вычисленных метрик для оценки качества сегментации в условиях открытой местности приведено в табл. 2. Из данной таблицы видно, что качество сегментации достаточно высокое.

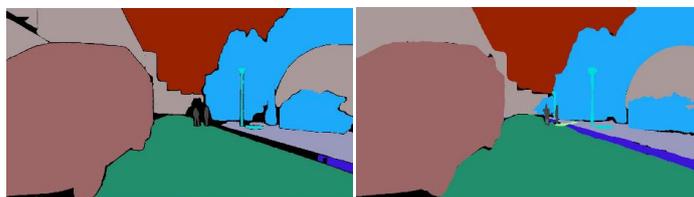


Рис. 4. Сравнение сегментации SAM (слева) с ручной разметкой (справа) после слияния масок

Наибольшее количество ошибок замечено у объектов малых размеров. В частности, на людях и объектах инфраструктуры, таких как фонарные столбы, клумбы или бордюры. При увеличении размеров объектов в кадре, например, при приближении человека к камере, качество сегментации резко возрастает. Это связано с тем фактом, что

разметка SAM (генерация областей сегментации) производится не по всему кадру, а от заданных исходных точек, которые располагаются в области кадра равномерной сеткой 20 на 20 точек. Если точка попала в малый объект, то он будет обнаружен.

Таблица 2

Результат сегментации и сопровождения на открытой местности

Наименование класса	Сегментация		Сопровождение	
	Dice, %	IoU, %	Dice, %	IoU, %
человек	35,02	23,01	31,69	21,08
дорога	97,9	95,95	96,36	94,6
трава	87,99	81,76	86,87	79,68
здание	94,59	90,2	89,46	83,17
небо	92,91	89,36	77,32	73,05
дерево	90,1	84,03	90,73	85,51
инфраструктура	72,45	62,32	57,5	47,12
машина	88,62	85,4	84,58	81,62
пешеходная зона	79,79	77,17	78,54	75,15
бордюр	77,43	67,34	77,43	67,34

Для видеопоследовательностей в помещении количество классов достаточно велико, поэтому в табл. 3 приведены усредненные по классам значения для каждой видеопоследовательности. Как и в случае с сегментацией на открытой местности, основную сложность представляют объекты небольшого размера. Общее качество сегментации с помощью SAM высокое, поэтому он может быть применен в рамках поставленной задачи.

Таблица 3

Результат сегментации и сопровождения в помещении

Идентификатор	Сегментация		Сопровождение	
	Dice, %	IoU, %	Dice, %	IoU, %
72	89,71	84,77	93,9	92,33
84	86,7	80,45	94,62	92,35
132	83,92	74,91	95,1	91,8
1151	84,8	82,09	88,79	87,3
1153	84,78	82,59	86,3	84,86
1410	81,47	73,98	97,65	95,48

Достаточно сложно полноценно оценить качество работы модели сопровождения на всей видеопоследовательности, так как набор данных сформирован не для видео, а для отдельных кадров. Чтобы решить данную проблему использовался следующий прием. Бралась пара размеченных кадров с близким расположением камеры. Затем один использовался в качестве размеченного, а на другом происходило сопровождение и подсчет метрики, затем процедура повторялась в обратном порядке. После этого полученный результат проверялся. Таким образом было выбрано и обработано 50 пар, то есть 100 изображений, для которых был выполнен подсчет метрик. В табл. 2 приведены рассчитанные метрики Dice и IoU. Для большинства классов были получены достаточно высокие значения, от 70% до 80% точности. Выделяются только два класса, «человек» и «инфраструктура». Первый содержит пиксели для людей, второй небольшие бетонные клумбы вдоль дороги, а также осветительные столбы. Их низкий результат связан с тем, что в силу правил подсчета метрик для каждого класса цена ошибки тем выше, чем его площадь на изображении ниже. Люди и инфраструктурные объекты занимают на изображениях настолько малую площадь, что очень небольшие ошибки приводят к существенному падению точности.

Видеозаписи в помещении имеют разметку для каждого кадра. Основная проблема состоит в том, что при перемещении камеры неизбежно появляются новые объекты, о которых модель ничего не знает, но которые будут вносить ошибку при пря-

мом сравнении с разметкой по соответствующим метрикам. Их необходимо как-то отслеживать. Чтобы модель могла их отслеживать, при их первом появлении в кадре (при изменении состава объектов в кадре) необходимо переинициализироваться этим кадром, и на его основе происходит сопровождение последующих кадров. Результаты расчета соответствующих метрик приведены в табл. 3. Для всех последовательностей выбранного набора данных DeAOT показал очень высокие показатели, что демонстрирует его применимость для решения задач как снаружи, так и внутри помещений.

Классификация объектов. Каждый отдельный объект вырезается по ограниченному прямоугольнику и классифицируется с помощью CLIP. Однако, при этом на полученном изображении не гарантирована единственность объекта. На рис. 5 слева вверху приведен пример, на котором видно, что вместе со зданием в кадре также сохранились дорога, небо и трава, которые могут повлиять на результат классификации. Чтобы явным образом обеспечить наличие только одного объекта, в работе рассмотрено несколько способов подавления фона: размытые, обнуление, заливка белым цветом. На рис. 5 приведен пример обработки каждым из способов: слева вверху исходное изображение, справа вверху размытие, слева внизу обнуление, справа внизу заливка белым цветом. Сравнение результатов обработки приведено в табл. 4.



Рис. 5. Иллюстрация различных способов предобработки изображений

Из табл. 4 видно, что наибольшая точность классификации достигается при использовании размытия фона, поэтому при комплексировании используется данный метод предобработки данных.

Таблица 4

Результаты классификации объектов с различными способами предобработки изображений

Способ предобработки	Точность, %
Без предобработки	83,27
Размытие фона	88,61
Обнуление фона	75,98
Заливка белым цветом	76,33

Для классификации изображений при помощи CLIP необходимо составить словарь синонимов. Одно слово на класс может быть недостаточно, так как оно может не совсем точно описывать конкретный объект. Дополнительная проблема состоит в том, что заранее неизвестен набор данных, с помощью которого обучался CLIP. Поэтому узнать на каких именно словах обучалась модель (и какие позволят получить наилучшие результаты) невозможно. Для каждого из набора данных составлен словарь синонимов для каждого класса, содержащий по 5-10 понятий. Качество классификации при этом составляет выше 90% для большинства объектов. Основные ошибки при классификации составляют по-прежнему объекты малого размера.

Быстродействие. Поскольку разработанное решение содержит в себе сразу 3 модели, то вопрос вычислительной нагрузки стоит остро. При этом на практике ее можно регулировать в зависимости от поставленной задачи. Например, можно менять количество и положение точек для сегментации в SAM или разрешение изображений. Измерение быстродействия производилось с помощью усреднения времени обработки 50 кадров, так как сегментация обрабатывала только каждый 10 кадр, а остальные сопровождалась. Все вычисления производились на ПК с GPU GeForce RTX 2080Ti. Результаты измерений только для сопровождения и быстродействия приведены в табл. 5. Процедура классификации масок не приводится, так как зависит от изначальной постановки задачи и вычислителя.

Таблица 5

Быстродействие сегментации и сопровождения

Разрешение	Количество точек на сторону	Потребляемая память, ГБ	Время на обработку кадра, с
1280 x 720	20	7,4	5,36
	10	6,8	3,96
	5	5,3	2,46
640 x 360	20	5	0,86
	10	4	0,7
	5	2,3	0,62

Можно заметить, что разработанное решение не позволяет обрабатывать видео в реальном времени. В текущей реализации модели достаточно сложно развернуть на встраиваемом вычислителе. Однако сегодня существует уже несколько научных публикаций по оптимизации вычисления SAM [19, 20].

Заключение. По результатам работы можно сделать следующие выводы. Предложенный в работе алгоритм комплексирования позволяет объединять предсказания нескольких моделей для решения более сложных задач СТЗ. Основная особенность предложенного решения заключается в необязательности обучения и как следствие использование СТЗ в не детерминируемых условиях. Подсчитаны метрики при решении задач: сегментации, сопровождении, классификации. Результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность моделей. При их комплексировании удается получать эффективную СТЗ для решения различных более сложных задач. Основным направлением дальнейших исследований является ускорение быстродействий для достижения обработки в реальном времени.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №075-00697-24-00 от 27.12.2023 «Исследование методов создания самообучающихся систем видеонаблюдения и видеоаналитики на базе комплексирования технологий пространственно-временной фильтрации видеопотока и нейронных сетей» (FNRG 2022 0015 1021060307687-9-1.2.1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yang J., et al. Track anything: Segment anything meets videos, *CoRR*, 2023, Vol. abs/2304.11968. Available at: <http://arxiv.org/abs/2304.11968>.
2. Cheng H.K., et al. Tracking anything with decoupled video segmentation, *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2023, pp. 1316-1326.
3. Zhu J., et al. Tracking anything in high quality, *CoRR*, 2023, Vol. abs/2307.13974. Available at: <http://arxiv.org/abs/2307.13974>.
4. Liu Y., et al. MobileSAM-Track: Lightweight One-Shot Tracking and Segmentation of Small Objects on Edge Devices, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, No. 24, pp. 5665.
5. Cheng Y., et al. Segment and track anything, *CoRR*, 2023, Vol. abs/2305.06558. Available at: <http://arxiv.org/abs/2305.06558>.
6. Kirillov A., et al. Segment anything, *CoRR*, 2023, Vol. abs/2304.02643. Available at: <http://arxiv.org/abs/2304.02643>.

7. Cheng B., Schwing A., Kirillov A. Per-pixel classification is not all you need for semantic segmentation, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2021, Vol. 34, pp. 17864-17875.
8. Yang Z., Yang Y. Decoupling features in hierarchical propagation for video object segmentation, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2022, Vol. 35, pp. 36324-36336.
9. Yang Z., Wei Y., Yang Y. Associating objects with transformers for video object segmentation, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2021, Vol. 34, pp. 2491-2502.
10. Cherti M., et al. Reproducible scaling laws for contrastive language-image learning, *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2023, pp. 2818-2829.
11. Awadalla A., et al. Openflamingo: An open-source framework for training large autoregressive vision-language models, *CoRR*, 2023, Vol. abs/2308.01390. Available at: <http://arxiv.org/abs/2308.01390>.
12. Li J., Li D., Xiong C., Hoi S. Blip: Bootstrapping language-image pre-training for unified vision-language understanding and generation, *International Conference on Machine Learning*, 2022, pp. 12888-12900.
13. Radford A., et al. Learning transferable visual models from natural language supervision, *International conference on machine learning*, 2021, pp. 8748-8763.
14. Mueller M., Smith N., Ghanem B. A benchmark and simulator for uav tracking // *Computer Vision—ECCV 2016: 14th European Conference*. 2016. – P. 445-461.
15. Github: fbrs_interactive_segmentation. Available at: https://github.com/SamsungLabs/fbrs_interactive_segmentation.
16. Sofiiuk K., Petrov I., Barinova O., Konushin A. F-BRS: Rethinking Backpropagating Refinement for Interactive Segmentation, *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2020, pp. 8623-8632.
17. Fomin I., Arhipov A. Selection of Neural Network Algorithms for the Semantic Analysis of Local Industrial Area, *International Russian Automation Conference*, 2021, pp. 380-385.
18. Miao J., et al. VSPW: A Large-scale Dataset for Video Scene Parsing in the Wild, *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2021, pp. 4133-4143.
19. Zhang C., et al. Faster Segment Anything: Towards Lightweight SAM for Mobile Applications, *CoRR*, 2023, Vol. abs/2306.14289. Available at: <http://arxiv.org/abs/2306.14289>.
20. Wang A., et al. RepViT-SAM: Towards Real-Time Segmenting Anything, *CoRR*, 2023, Vol. abs/2312.05760 Available at: <http://arxiv.org/abs/2312.05760>.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. Л.А. Станкевич.

Архипов Андрей Евгеньевич – Государственный научный центр РФ – Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики»; e-mail: a.arkhipov@rtc.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78125523351; м.н.с.

Фомин Иван Сергеевич – e-mail: i.fomin@rtc.ru; м.н.с.

Матвеев Виктор Дмитриевич – e-mail: v.matveev@rtc.ru; инженер.

Arkhipov Andrey Evgenievich – Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC); e-mail: a.arkhipov@rtc.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78125523351; junior researcher.

Fomin Ivan Sergeevich – e-mail: i.fomin@rtc.ru; junior researcher.

Matveev Victor Dmitrievich – e-mail: v.matveev@rtc.ru; engineer.

УДК 004.383

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-257-267

Н.А. Бочаров, И.Н. Бычков, П.В. Коренев, Н.Б. Парамонов

ЖИВУЧЕСТЬ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Исследования в области создания специализированных вычислительных комплексов для робототехнических комплексов (РТК) ведутся во многих мировых научных центрах и в том числе в нашей стране. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной нави-

гации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать бортовые вычислительные комплексы, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. Важной, но нерешенной проблемой остается оснащение таких вычислительных комплексов микропроцессорами отечественного производства. Актуальным направлением развития перспективных систем управления РТК является разработка производительных бортовых вычислительных систем (БВС), обладающих свойством живучести. Существенным, но нерешенным вопросом остается оснащение таких БВС средствами вычислительной техники отечественной разработки. Появление современных отечественных микропроцессоров Эльбрус-2С3 и Эльбрус-8СВ открывает новые возможности перед разработчиками РТК. Появление таких аппаратных технологий, как сторожевой таймер и модуль привязки времени, позволяет создавать БВС, обладающие высокой живучестью в условиях боевых действий. Для РТК специального назначения, можно разделить период нормальной эксплуатации робота на сегменты по аналогии со степенями боевой готовности вооруженных сил, для каждого из которых РТК будет работать в специальном режиме. Режимы характеризуются согласно сложившейся обстановке и соответствующим потоком отказов. В работе представлена модель угроз для самого жесткого из режимов работы. В данной работе представлен метод обеспечения живучести БВС РТК за счет использования адаптивного резервирования. Метод заключается в переключении между схемами резервирования для обеспечения высокой производительности при сохранении достаточной надежности в зависимости от текущего уровня потока отказов. С использованием разработанной авторами модели проведено экспериментальное исследование по оценке эффективности разработанного метода при работе на отечественном БВС на базе микропроцессора «Эльбрус». Использование разработанного метода позволило увеличить среднюю функциональность РТК на 23-43% по сравнению с режимом с постоянным резервированием.

Бортовые вычислители; бортовые вычислительные системы; робототехника; живучесть; адаптивное резервирование; Эльбрус.

N.A. Bocharov, I.N. Bychkov, P.V. Korenev, N.B. Paramonov

SURVIVABILITY OF ONBOARD COMPUTERS OF GROUND ROBOTS

Research in the field of creating specialized computing systems for robots is conducted in many world scientific centers, including our country. The development of capabilities of sensor systems, global navigation systems, growth of computing power and improvement of algorithms allow creating onboard computing systems with broad intellectual capabilities. An important, but unsolved problem remains in the equipping of such computing systems with domestically produced microprocessors. An urgent direction in the development of prospective robot control systems is the development of high-performance on-board computers with the property of survivability. A significant but unresolved issue remains in the equipping of such computers with computer equipment of domestic development. The appearance of modern domestic microprocessors Elbrus-2S3 and Elbrus-8SV opens up new opportunities for robot developers. The emergence of hardware technologies such as a watchdog timer and a time-binding module makes it possible to create robots with high survivability in combat conditions. For special purpose robots, it is possible to divide the period of normal operation of the robot into modes by analogy with the degrees of combat readiness of the armed forces, for each of which the robot will operate in a special mode. The modes are characterized according to the prevailing situation and the corresponding failure rate. The paper presents a threat model for the harshest of the operating modes. This paper presents a method for ensuring the survivability of onboard robot computers by using adaptive redundancy to ensure the survivability of on-board computers. The method consists in switching between redundancy schemes to ensure high performance while maintaining sufficient reliability, depending on the current level of failure flow. Using the model developed by the authors, an experimental study was conducted to evaluate the effectiveness of the developed method when working with a domestic onboard computer based on the Elbrus microprocessor. Using the developed method made it possible to increase the average functionality of the robot by 23-43% compared to the mode with constant redundancy.

Onboard computers; robotics; survivability; adaptive redundancy; Elbrus.

Введение. Управление современными автономными робототехническими комплексами (РТК) осуществляются с помощью специализированных бортовых вычислительных систем [1]. Развитие возможностей сенсорных систем, систем

глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать бортовые вычислительные системы, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. В процессе перевооружения Вооруженных сил Российской Федерации все большее внимание уделяется оснащению РТК различного функционального назначения.

Такие РТК требуют наличия развитых систем управления с распределенной архитектурой, включающих уровни планирования и управления движением, управления подсистемами обработки и комплексирования сенсорной информации, исполнительными механизмами, управления энергообеспечением, управления полезной нагрузкой, средствами безопасности. В этой связи актуальным направлением развития перспективных систем управления РТК является разработка производительных бортовых вычислительных систем (БВС), обладающих свойством живучести.

Появление современных отечественных микропроцессоров Эльбрус-2СЗ [2, 3] Эльбрус-8СВ [4] открывает новые возможности перед разработчиками РТК. Появление таких аппаратных технологий, как сторожевой таймер и модуль привязки времени позволяет создавать БВС [5-7], обладающих высокой живучестью в условиях боевых действий.

В данной работе представлен метод обеспечения живучести БВС РТК за счет использования адаптивного резервирования для обеспечения живучести бортовых вычислителей. Приведены результаты моделирования разработанного метода на отечественных БВС РТК на базе отечественных микропроцессоров Эльбрус.

Особенности работы РТК. При решении задачи обеспечения живучести в условиях рассматриваемой модели необходимо учитывать, что помимо основного (естественного) потока отказов, которые являются следствием ошибок, сбоев и т.д., есть поток отказов, вызванный целенаправленными попытками нанести повреждения роботу. Такие отказы могут быть, например, результатом выстрела в робота или тарана. Будем называть этот поток – потоком преднамеренных отказов. В дальнейшем будем обозначать λ_1 – интенсивность потока естественных отказов, а λ_2 – интенсивность потока преднамеренных отказов. Таким образом, общий поток отказов для робота и, в частности, бортового вычислительного комплекса будет определяться суммой этих двух потоков:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2.$$

Интенсивность потока естественных отказов λ_1 определяется техническими условиями на изделие, в рамках данной работы для определенности примем, что средняя наработка на отказ робота составляет 1000 часов, интенсивность потока естественных отказов составляет $\lambda_1 \in [10^{-7}; 10^{-5}]$ 1/час, а λ_2 зависит от режима работы робота.

Применительно к рассматриваемой предметной области, а именно РТК специального назначения, можно разделить период нормальной эксплуатации робота на сегменты по аналогии со степенями боевой готовности вооруженных сил, для каждого из которых РТК будет работать в специальном режиме. Режимы характеризуются согласно сложившейся обстановке и соответствующим потоком отказов. В рамках данной работы выделим три режима, в которых могут функционировать РТК:

◆ Режим подготовки. Робот движется к назначенной цели, ведет активную работу с системами технического зрения, строит подробные карты проходимости и т.д. В этом режиме поток преднамеренных отказов находится на практически нулевом уровне, т.е. $\lambda_2 \approx 0$, а поток естественных отказов находится на обычном уровне. Риск получения физического урона или несанкционированного доступа в систему управления минимален. Обеспечение живучести в таком режиме работы тривиально.

◆ Режим повышенной боевой готовности. Робот находится близко к зоне боевых действий и должен быть готов к переходу в режим боевых действий. В этом режиме уровень потока преднамеренных отказов растет, поэтому должны быть применены соответствующие методы, обеспечивающие своевременное переключение в режим боевых действий при возросшей угрозе возникновения предна-

меренных отказов. Риск получить физический урон минимален, риск несанкционированного доступа в систему управления возрастает, по сравнению с режимом подготовки. Будем считать, что в таком режиме $\lambda_2 \in [1 \cdot 10^{-5}; 1 \cdot 10^{-1}]$ 1/час

◆ Режим боевых действий. Роботу непосредственно угрожает противоборствующие элементы, велик риск получения серьезного физического урона или несанкционированного доступа в систему управления. В данном режиме показатель потока преднамеренных отказов λ_2 возрастает до своего максимального значения и становится много больше потока естественных отказов ($\lambda_2 \gg \lambda_1$). Будем считать, что в таком режиме $\lambda_2 \in [1 \cdot 10^{-1}; 5 \cdot 10^{-1}]$ 1/час

Модель угроз БВС РТК. К характеристикам БВС РТК, обуславливающим возникновение угроз безопасности можно отнести категорию и объем обрабатываемых в системе данных, структуру системы, наличие подключений системы к сетям связи, местонахождение и условия размещения технических средств системы.

Свойства среды (пути) распространения информативных сигналов, содержащих защищаемую информацию, характеризуются видом физической среды, в которой распространяются данные, и определяются при оценке возможности реализации угроз безопасности данным.

Возникновение угрозы безопасности вычислительной системы является следствием наличия определенных уязвимостей в системе [8]. Уязвимости могут возникать еще на этапе проектирования, например, из-за принятых ограничений функционирования, особенностей архитектуры, выбранных протоколов передачи данных и интерфейсов, используемого в системе программного обеспечения, условий эксплуатации и пр. Поскольку угрозы безопасности и причины их возникновения (уязвимости) неразрывны, каждой угрозе можно сопоставить множество уязвимостей.

Модель угроз расширяется в зависимости от режима работы робота и достигает полноты для самого жесткого режима – режима боевых действий. При работе этом режиме модель угроз расширяется рядом преднамеренных внешних угроз, заключающихся в основном в том, что становится вероятным физическое воздействие на робота и его компоненты:

- ◆ Преднамеренные угрозы
 - Внешние угрозы
 - Электромагнитное воздействие по сетям питания, проводным линиям связи, эфиру [9–11];
 - Информационные разрушающие воздействия, проникающие через каналы данных [12–15];
 - Физическое воздействие на компоненты РТК;
 - Порча СВТ и вспомогательного оборудования.
 - ◆ Непреднамеренные угрозы
 - Внутренние угрозы
 - Ошибки в данных (входных, управляющих, выходных);
 - Отказ ПО [16];
 - Отказ средств обработки данных;
 - Отказ вспомогательного оборудования;
 - Отказ сетей связи [17].
 - Внешние угрозы
 - Аварийные ситуации;
 - Ошибочные действия оператора;
 - Воздействия окружающей среды.

Последствиями перечисленных угроз для вычислительного комплекса РТК могут быть:

- ◆ Потеря связи между вычислительными машинами;
- ◆ Выход из строя одной или нескольких вычислительных машин;
- ◆ Сбой в работе одной или нескольких вычислительных машин;

- ◆ Потеря связи в РТК;
- ◆ Выход из строя внешних датчиков или потеря связи с ними.

Резервирование для обеспечения живучести. Одним из основных методов обеспечения дополнительной надежности объекта является резервирование. Метод реализуется благодаря использованию дополнительных средств и возможностей, которые являются избыточными к минимально необходимым для выполнения требуемых функций. Наиболее частой реализацией метода резервирования является включение параллельно объекту резервирования дополнительных средств, которые полностью или частично дублируют его функции, и способны взять на себя его задачи при возникновении отказа.

В БВС РТК могут применяться следующие основные виды резервирования:

- ◆ аппаратное (схемное, структурное);
- ◆ временное;
- ◆ информационное;
- ◆ функциональное;
- ◆ нагрузочное.

При реализации аппаратного резервирования предполагается применение резервных элементов вычислительного комплекса, в виде отдельных блоков или целой дублирующей вычислительной машины, которые включаются в процесс управления робототехническим комплексом автоматически или вручную, при возникновении отказа в основной управляющей вычислительной машине, и способны поддерживать функционирование робототехнического комплекса. При этом операция замены отказавшего элемента на резервный не прерывает функционирования совсем или прерывает его на незначительный период времени, необходимый для определения отказа и переключения на резервные элементы.

Реализация временного резервирования предполагает использование резерва времени при работе устройства. Для робототехнического комплекса это связано с добавлением избытка времени выполнения вычислений в бортовом вычислительном комплексе.

При использовании информационного резервирования повышение надежности процесса управления робототехническим комплексом происходит за счет применения избытка бортовых аппаратных, вычислительных и программных средств для решения взаимосвязанных задач.

Функциональное резервирование может повысить надежность системы в случае, если элементы системы могут решать дополнительные задачи, помимо выполнения основной функции при нормальной эксплуатации. Например, использование высокоэнергетической линии связи для отправки управляющих команд в случае отказа в энергоскрытой системе связи, или использование системы стереозрения для определения расстояния до препятствий при отказе в системе дальномеров.

Повышение надежности системы с использованием нагрузочного резервирования происходит благодаря способности системы воспринимать дополнительные нагрузки. Источником резерва в данном случае является запас вычислительной мощности или электрической прочности в радиотехнических элементах или устройствах.

Одновременное применение двух и более видов резервирования является предпочтительным, так как обеспечивает больший эффект в повышении надежности. Но основной вклад сохраняет за собой аппаратное резервирование, и оно должно реализовываться в первую очередь.

При реализованном резервировании отказ системы управления робототехнического комплекса в целом наступает только после отказа в основной вычислительной машине и во всех резервных. Основной вычислительной машиной при этом считается та машина, которая необходима для выполнения требуемых функций без использования резерва.

Адаптивное резервирование. Использование адаптивного резервирования для вычислительных машин предполагает смену схемы резервирования в зависимости от режима функционирования робота. Режим функционирования робота определяется интенсивностью потока преднамеренных отказов и характеризуется решаемыми задачами и временем реакции на отказ. Таким образом выбор схемы резервирования можно описать функцией r , зависящей от режима функционирования робота m .

$$r(m) = \{...\}.$$

Работа в режиме подготовки предполагает низкий уровень потока отказов, сравнимый с естественным уровнем, то есть отказ вычислительных машин маловероятен. Также, работа в режиме подготовки характеризуется активной работой сенсоров робота, связанной с накоплением информации. Активно функционирует система стереозрения, проводится сканирование пространства с лидара и дальнометров. Такой высокий поток данных приводит к необходимости использования всех имеющихся вычислительных ресурсов. Поскольку риск отказа вычислительных машин минимален, можно использовать все резервные вычислительные машины в качестве дополнительных устройств для вычислений, а задаче резервирования основной вычислительной машины поставить минимальный приоритет. Резервирование данных проводится регулярно, но с меньшей частотой по сравнению с другими режимами, для сохранения полученных результатов. В случае отказа основной вычислительной машины переключение на резервный произойдет не моментально, но оно в любом случае произойдет с восстановлением данных с контрольной точки. Таким образом можно использовать схему с теплым резервом без ограничений по времени.

Работа в режиме повышенной боевой готовности характеризуется повышением уровня потока преднамеренных отказов, вследствие чего повышается вероятность выхода из строя вычислительных машин. Также, критически важным моментом работы в данном режиме является скорость реакции на возникновение риска угроз и переключения в режим боевых действий. Этой задаче отдается большое количество вычислительных ресурсов, распределяемых между основной и резервными вычислительными машинами. Репликации данных дается более высокий приоритет, она проводится с большей частотой. Переключение на резервную вычислительную машину в случае отказа основной будет являться наиболее приоритетной задачей и должно осуществляться в режиме реального времени. Время реакции устанавливается ТУ на устройство. Из вышеперечисленного видим, что для данного режима необходимо использовать схему с теплым резервом с ограничениями по времени.

Работа в режиме боевых действий характеризуется чрезвычайно высоким уровнем потока отказов. Критически важной задачей становится сохранение работоспособности робота при возникновении преднамеренного отказа в любых его компонентах. Репликация данных проводится максимально часто. Переключение на резервную вычислительную машину при возникновении отказа в основной должно происходить максимально быстро. Поскольку активного накопления данных в данном режиме не происходит, свободные вычислительные ресурсы пускаются на сохранение данных и максимально быстрое переключение при отказе основного элемента. Согласно проведенным исследованиям, достаточным для РТК специального назначения является время обнаружения отказа не более 0.1 секунды. Ввиду вышесказанного для данного режима подходит схема с горячим резервом с ограничениями по времени.

Систематизируя вышесказанное, опишем выбор схемы резервирования следующими уравнениями:

$r(m1) \rightarrow (\lambda = \lambda_{\min}; V = V_{\max}) = \text{теплый резерв, } t_{\pi} \gg 0;$
 $r(m2) \rightarrow (\lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max}; V < V_{\max}) = \text{горячий резерв, } t_{\pi} < 1 \text{ с};$
 $r(m3) \rightarrow (\lambda = \lambda_{\max}; V = V_{\max}/n) = \text{горячий резерв, } t_{\pi} < 0.1 \text{ с};$

где $m1$ – режим подготовки, $m2$ – режим повышенной боевой готовности, $m3$ – режим боевых действий, t_{π} – время на переключение с основной вычислительной машины на резервную, V – объем используемых вычислительных ресурсов на работу с датчиками, V_{\max} – максимальный доступный объем вычислительных ресурсов на всех вычислительных машинах, n – количество вычислительных машин.

Блок схема общего алгоритма переключения между режимами представлена на рис. 1.

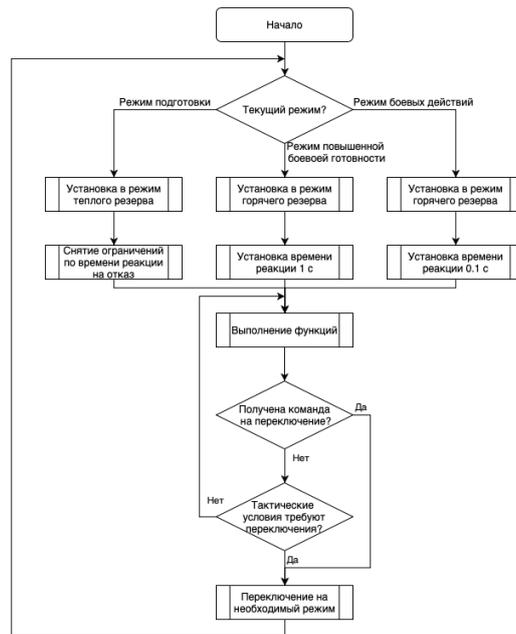


Рис. 1. Общий алгоритм переключения между режимами

Поскольку параметр потока интенсивности преднамеренных отказов не поддается контролю, то параметры вычислительных ресурсов и времени реакции на отказ являются ключевыми для реализации метода адаптивного резервирования. Программно-аппаратное обеспечение РТК должно иметь возможности по установке указанных выше параметров. Переключение между схемами резервирования происходит либо по сигналу оператора, либо в результате изменения значения оценочной функции, которая определяет на основе тактических данных наиболее подходящий режим работы

Моделирование работы адаптивного резервирования. Для оценки разработанного метода разработаны программы на языке Java с использованием средств ОПО и СПО «Эльбрус», объединенные в программную модель, в которой есть возможности для проведения экспериментов по оценке функциональности РТК по критерию функциональности [8, 9]. В качестве протокола обмена сообщениями «я живой» между вычислительными машинами программой использовались средства Socket API и аппаратное устройство МПВ. С использованием данной программы могут быть решены следующие задачи:

- ♦ моделирование многомашинного вычислительного комплекса, работающего по схеме Ведущий-Ведомый;

- ♦ работа с устройством МПВ;
- ♦ оценка времени реакции на одиночные отказы.

Программа для реализации метода реконфигурации вычислительных комплексов РТК использует сторожевой таймер ОС «Эльбрус», который производит попытку перезапуска отказавшей вычислительной машины. При невозможности перезапуска задачи отказавшей вычислительной машины распределяются по другим вычислительным машинам в комплексе.

Для моделирования уровней загрузки вычислительных машин в вычислительных комплексах РТК использовались разработанные модели системы стереозрения, поиска пути роботом и поиска пути группой роботов [10].

На рис. 2 представлен скриншот окна программы с результатами эксперимента.

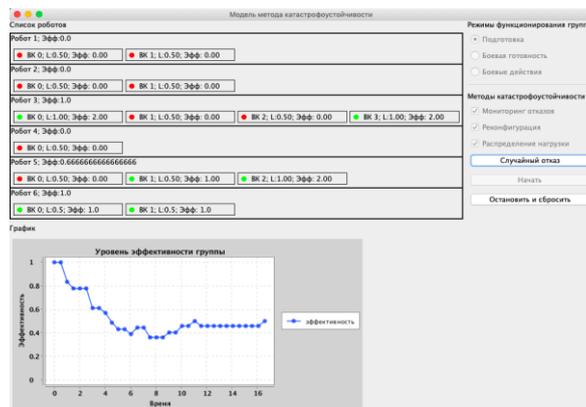


Рис. 2. Окно программы

С использованием разработанной модели проведено экспериментальное исследование по оценке функциональности РТК в зависимости от использования разработанного метода адаптивного резервирования БВС РТК. Исследованием показано повышение средней функциональности на 23-43% по сравнению с режимом работы с постоянным резервированием.

Заключение. В статье представлен метод адаптивного резервирования БВС РТК для повышения живучести. Метод заключается в переключении между схемами резервирования для обеспечения высокой производительности при сохранении достаточной надежности в зависимости от текущего уровня потока отказов.

С использованием разработанной авторами модели проведено экспериментальное исследование по оценке эффективности разработанного метода при работе на отечественной БВС на базе микропроцессора «Эльбрус». Использование разработанного метода позволило увеличить среднюю функциональность РТК на 23-43% по сравнению с режимом с постоянным резервированием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Ч. 3. Экстремальная робототехника // Российский технологический журнал. – 2020. – Т. 8, № 3 (35). – С. 14-32. – DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32.
2. Чучко П.А., Бычков И.Н., Панченко Е.Г. Проблема унификации модулей на основе процессора "Эльбрус-2С3" // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14, № S7(107). – С. 96-97. – DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.96.97.
3. Nedbailo Y.A., Bychkov I.N., Slesarev M.V. [et al.]. Elbrus-2C3: A Dual-Core VLIW Processor with Integrated Graphics // 2021 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T 2021, Dolgoprudny, 24–25 ноября 2021 года. – Dolgoprudny: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. – DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681771.

4. Дружинина О.В., Корепанов Э.Р., Белоусов В.В. [и др.]. Развитие инструментального обеспечения отечественной вычислительной платформы "Эльбрус 801-PC" в задачах нейросетевого моделирования нелинейных динамических систем // *Нелинейный мир*. – 2021. – Т. 19, № 1. – С. 15-28. – DOI: 10.18127/j20700970-202101-02.
5. Бычков И.Н., Лобанов И.Н., Молчанов И.А. Решения по включению средств защиты информации в вычислительные комплексы на основе платформы "Эльбрус" // *Наноиндустрия*. – 2020. – Т. 13, № S4 (99). – С. 103-104. – DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.103.104.
6. Фельдман В.М., Зуев А.Г., Дорофеев А.И. [и др.]. Особенности конструирования переносных вычислительных устройств в защищенном исполнении // *Приборы*. – 2023. – № 5 (275). – С. 24-33.
7. Тачков А.А., Козов А.В., Вуколов А.Ю. Особенности портирования Robot Operating System на программно-аппаратную платформу "Эльбрус" // *Программные продукты и системы*. – 2019. – № 4. – С. 655-664. – EDN TVJSXJ.
8. Абрамов Н.С., Фраленко В.П. Угрозы безопасности вычислительных комплексов: классификация, источники возникновения и методы противодействия // *Программные системы: теория и приложения*. – 2015. – № 2 (25). – С. 63-83.
9. Sands T. Countering the Deleterious Effects of Electromagnetic Pulse // *Frontiers in Electronics*. – 2021. – Vol. 2. – P. 727994.
10. Kim S., Jeong I. Vulnerability assessment of Korean electric power systems to late-time (E3) high-altitude electromagnetic pulses // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, No. 17. – P. 3335.
11. Dayanikli G.Y. Electromagnetic Interference Attacks on Cyber-Physical Systems: Theory, Demonstration, and Defense: дисс. – Virginia Tech, 2021.
12. Mayoral-Vilches V. Robot cybersecurity, a review // *International Journal of Cyber Forensics and Advanced Threat Investigations*. – 2022.
13. Yaacoub J.P. A. et al. Robotics cyber security: Vulnerabilities, attacks, countermeasures, and recommendations // *International Journal of Information Security*. – 2022. – P. 1-44.
14. Zhu Q. et al. Cybersecurity in robotics: Challenges, quantitative modeling, and practice // *Foundations and Trends® in Robotics*. – 2021. – Vol. 9, No. 1. – P. 1-129.
15. Theron P. et al. Reference architecture of an autonomous agent for cyber defense of complex military systems // *Adaptive autonomous secure cyber systems*. – 2020. – P. 1-21.
16. Afzal A. et al. A study on challenges of testing robotic systems // *2020 IEEE 13th International Conference on Software Testing, Validation and Verification (ICST)*. – IEEE, 2020. – P. 96-107.
17. Huang H. et al. Disturbance observer-based fault-tolerant control for robotic systems with guaranteed prescribed performance // *IEEE transactions on cybernetics*. – 2020. – Vol. 52, No. 2. – P. 772-783.
18. Бочаров Н.А. Моделирование алгоритмов катастрофоустойчивости групп роботов на программно-аппаратной платформе "Эльбрус" // *Радиопромышленность*. – 2019. – № 3. – С. 8-14. – DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.
19. Бочаров Н.А. Модель обеспечения катастрофоустойчивости бортовых вычислительных комплексов на базе аппаратно-программной платформы «Эльбрус». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019616256 от 30.04.2019.
20. Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Сапачев И.Д. Реализация алгоритмов группового управления на языке Java в среде ОС «Эльбрус» // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. – 2016. – № 1. – С. 108-115.

REFERENCES

1. Romanov A.M. Obzor apparatno-programmnogo obespecheniya sistem upravleniya robotov razlichnogo masshtaba i naznacheniya. Ch. 3. Ekstremal'naya robototekhnika [A review on control systems hardware and software for robots of various scale and purpose. Part 3. Extreme robotics], *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal], 2020, Vol. 8, No. 3 (35), pp. 14-32. DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32.
2. Chuchko P.A., Bychkov I.N., Panchenko E.G. Problema unifikatsii moduley na osnove protsessora "El'brus-2S3" [The problem of unification of modules based on the processor "El-brus-2C3"], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2021, Vol. 14, No. S7(107), pp. 96-97. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.96.97.
3. Nedbailo Y.A., Bychkov I.N., Slesarev M.V. [et al.]. Elbrus-2C3: A Dual-Core VLIW Processor with Integrated Graphics, *2021 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T 2021, Dolgoprudny, 24–25 ноября 2021 года*. Dolgoprudny: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. DOI: 10.1109/EnT50460.2021.9681771.

4. Druzhinina O.V., Korepanov E.R., Belousov V.V. [i dr.]. Razvitie instrumental'nogo obespecheniya otechestvennoy vychislitel'noy platformy "El'brus 801-PC" v zadachakh neyrosetevogo modelirovaniya nelineynykh dinamicheskikh sistem [Development of instrumental support for the domestic computing platform "Elbrus 801-PC" in problems of neural network modeling of nonlinear dynamic systems], *Nelineynyy mir* [Nonlinear World], 2021, Vol. 19, No. 1, pp. 15-28. DOI: 10.18127/j20700970-202101-02.
5. Bychkov I.N., Lobanov I.N., Molchanov I.A. Resheniya po vklyucheniyu sredstv zashchity informatsii v vychislitel'nye komplekсы na osnove platformy "El'brus" [Solutions for the inclusion of information security tools in computing systems based on the Elbrus platform], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2020, Vol. 13, No. S4 (99), pp. 103-104. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.103.104.
6. Fel'dman V.M., Zuev A.G., Dorofeev A.I. [i dr.]. Osobennosti konstruirovaniya perenosnykh vychislitel'nykh ustroystv v zashchishchennom ispolnenii [Features of the design of portable computing devices in a protected design], *Pribory* [Devices], 2023, No. 5 (275), pp. 24-33.
7. Tachkov A.A., Kozov A.V., Vukolov A.Yu. Osobennosti portirovaniya Robot Operating System na programmno-apparatnuyu platformu "El'brus" [Features of porting the Robot Operating System to the Elbrus software and hardware platform], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2019, No. 4, pp. 655-664. EDN TVJSXJ.
8. Abramov N.S., Fralenko V.P. Ugrozy bezopasnosti vychislitel'nykh komplekсов: klassifikatsiya, istochniki vozniknoveniya i metody protivodeystviya [Threats to the security of computing systems: classification, sources of occurrence and countermeasures], *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya* [Software systems: theory and applications], 2015, No. 2 (25), pp. 63-83.
9. Sands T. Countering the Deleterious Effects of Electromagnetic Pulse, *Frontiers in Electronics*, 2021, Vol. 2, pp. 727994.
10. Kim S., Jeong I. Vulnerability assessment of Korean electric power systems to late-time (E3) high-altitude electromagnetic pulses, *Energies*, 2019, Vol. 12, No. 17, pp. 3335.
11. Dayanikli G.Y. Electromagnetic Interference Attacks on Cyber-Physical Systems: Theory, Demonstration, and Defense: дисс. Virginia Tech, 2021.
12. Mayoral-Vilches V. Robot cybersecurity, a review, *International Journal of Cyber Forensics and Advanced Threat Investigations*, 2022.
13. Yaacoub J.P. A. et al. Robotics cyber security: Vulnerabilities, attacks, countermeasures, and recommendations, *International Journal of Information Security*, 2022, pp. 1-44.
14. Zhu Q. et al. Cybersecurity in robotics: Challenges, quantitative modeling, and practice, *Foundations and Trends® in Robotics*, 2021, Vol. 9, No. 1, pp. 1-129.
15. Theron P. et al. Reference architecture of an autonomous agent for cyber defense of complex military systems, *Adaptive autonomous secure cyber systems*, 2020, pp. 1-21.
16. Afzal A. et al. A study on challenges of testing robotic systems, *2020 IEEE 13th International Conference on Software Testing, Validation and Verification (ICST)*. IEEE, 2020, pp. 96-107.
17. Huang H. et al. Disturbance observer-based fault-tolerant control for robotic systems with guaranteed prescribed performance, *IEEE transactions on cybernetics*, 2020, Vol. 52, No. 2, pp. 772-783.
18. Bocharov N.A. Modelirovanie algoritmov katastrofoustoychivosti grupp robotov na programmno-apparatnoy platforme "El'brus" [Modeling algorithms for disaster resistance of groups of robots on the Elbrus software and hardware platform], *Radiopromyshlennost'* [Radio industry], 2019, No. 3, pp. 8-14. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.
19. Bocharov N.A. Model' obespecheniya katastrofoustoychivosti bortovykh vychislitel'nykh komplekсов na baze apparatno-programmnoy platformy «El'brus». Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2019616256 ot 30.04.2019 [A model for ensuring disaster resistance of on-board computing systems based on the Elbrus hardware and software platform. Certificate of state registration of a computer program No. 2019616256 dated 04/30/2019].
20. Bocharov N.A., Paramonov N.B., Sapachev I.D. Realizatsiya algoritmov gruppovogo upravleniya na yazyke Java v srede OS «El'brus» [Implementation of group control algorithms in Java in the Elbrus OS environment], *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern information technologies and IT education], 2016, No. 1, pp. 108-115.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.М. Фельдман.

Бочаров Никита Алексеевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; г. Москва, Россия, тел.: +79167346437; к.т.н.; зам. руководителя управления; г.н.с.

Бычков Игнат Николаевич – e-mail: ignat_b@ineum.ru, тел.: +74991353321; д.т.н.; зам. генерального директора.

Корнев Павел Валерьевич – e-mail: ineum@ineum.ru; тел.: +74991353321; соискатель.

Парамонов Николай Борисович – e-mail: paramonov_n_b@mail.ru; тел.: +74991355336; д.т.н.; профессор; руководитель управления; г.н.с.

Bocharov Nikita Alexeevich – JSC «INEUM»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Moscow, Russia; phone: +79167346437; cand. of eng. sc.; deputy head of department; chief scientific officer.

Bychkov Ignat Nikolaevich – e-mail: ignat_b@ineum.ru; phone: +74991353321; dr. of eng. sc.; deputy general director.

Korenev Pavel Valerievich – e-mail: ineum@ineum.ru; phone: +74991353321; candidate.

Paramonov Nikolay Borisovich – e-mail: paramonov_n_b@mail.ru; phone: +74991355336; dr. of eng. sc.; head of department; chief scientific officer.

УДК 004.89

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-267-276

В.В. Ковалев, Н.Е. Сергеев

РАСШИРЕНИЕ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА В ЗАДАЧЕ ПОИСКА И РАСПОЗНАВАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Одним из актуальных направлений при создании систем раннего обнаружения объектов является разработка алгоритмов поиска и распознавания малоразмерных объектов на изображениях. В задаче раннего обнаружения приходится распознавать объекты на дальних расстояниях от места их фиксации камерой. Образ на изображении таких объектов представлен малой компактной группой пикселей, которая претерпевает пространственные и яркостные изменения от кадра к кадру. Для успешного решения этой задачи целевые объекты реального мира должны иметь большие физические размеры. Кроме физических размеров объекта на образ объекта на изображении влияют большое количество факторов: разрешение матрицы камеры, фокусное расстояние объектива, светочувствительность матрицы и др. Вектор решения такой задачи направлен в сторону сверточных нейронных сетей. Однако, даже у передовых архитектур сверточных нейронных сетей поиск и распознавание малоразмерных объектов на изображениях вызывает трудности. Эта проблема напрямую связана с эффектом переобучения модели нейронной сети. Переобучение модели нейронной сети можно оценить на основе анализа кривых обучения. Для снижения вероятности переобучения применяют специальные методы, которые объединяет термин регуляризация. Однако, в распознавании малоразмерных объектов существующих методов регуляризации бывает недостаточно. В работе произведено исследование разработанного алгоритма предварительной обработки последовательности видеок кадров, увеличивающего исходное пространство признаков новым независимым признаком движения в кадре. Алгоритм предварительной обработки основан на пространственно-временной фильтрации последовательности видеок кадров, применение которого распространяется на широкий спектр архитектур сверточных нейронных сетей. Для исследования характеристик точности и распознавания сверточных нейронных сетей сформированы датасеты изображений в градациях серого и изображений с признаком движения на основе среды разработки 3D графики Unreal Engine 5. В работе приведен критерий малоразмерности объектов на изображениях. Произведено обучение и оценка характеристик точности тестовой модели сверточной нейронной сети и анализ динамики кривых обучения тестовой модели. Показано положительное влияние предложенного алгоритма предварительной обработки последовательности видеок кадров на интегральную точность обнаружения малоразмерных объектов.

Обнаружение малоразмерных объектов; сверточные нейронные сети; подвижные объекты; переобучение нейронных сетей.

V.V. Kovalev, N.E. Sergeev

EXPANSION OF THE FEATURE SPACE IN THE TASK OF SMALL OBJECT DETECTION IN IMAGES

One of the current trends in creating early object detection systems is the development of algorithms for searching and recognizing small objects in images. In the early detection task, it is necessary to recognize objects at long distances from the place where they were recorded by the camera. The image in the image of such objects is represented by a small compact group of pixels, which undergoes spatial and brightness changes from frame to frame. To successfully solve this problem, real-world target objects must have large physical dimensions. In addition to the physical dimensions of the object, the image of the object in the image is influenced by a large number of factors: the resolution of the camera matrix, the focal length of the lens, the photosensitivity of the matrix, etc. The vector for solving this problem is directed towards convolutional neural networks. However, even advanced convolutional neural network architectures face challenges in finding and recognizing small objects in images. This problem is directly related to the effect of overtraining the neural network model. Retraining of a neural network model can be assessed based on learning curve analysis. To reduce the likelihood of overfitting, special methods are used, which are united by the term regularization. However, in recognizing small-sized objects, existing regularization methods are not enough. The work examines the developed algorithm for preprocessing a sequence of video frames, which increases the original feature space with a new independent feature of movement in the frame. The preprocessing algorithm is based on spatiotemporal filtering of a sequence of video frames, the application of which extends to a wide range of convolutional neural network architectures. To study the characteristics of accuracy and recognition of convolutional neural networks, datasets of grayscale images and images with a sign of motion were generated based on the 3D graphics development environment Unreal Engine 5. The work presents a criterion for the small size of objects in images. The accuracy characteristics of the test model of the convolutional neural network were trained and assessed, and the dynamics of the learning curves of the test model were analyzed. The positive influence of the proposed algorithm for preprocessing a sequence of video frames on the integral accuracy of detection of small-sized objects is shown.

Small objects detection; convolutional neural networks; moving objects; retraining of neural networks.

Введение. В настоящее время одним из активно развивающихся направлений является разработка бортовых систем обнаружения объектов, предназначенных для установки на автономные носители. Такие системы требуют раннего обнаружения объектов. Раннее обнаружение подразумевает обнаружение объектов на дальних расстояниях от места их фиксации камерой. Объекты на дальних расстояниях представлены малой группой пикселей на цифровых изображениях. Размер объекта на изображении зависит от многих факторов: разрешение матрицы камеры, фокусное расстояние объектива, дальность до объекта, физические размеры объекта и др.

Типовыми алгоритмами, позволяющими решать задачу поиска и распознавания малоразмерных объектов на изображениях, являются сверточные нейронные сети (СНС). СНС условно можно разделить на одноэтапные и двухэтапные подходы. Двухэтапные СНС обеспечивают большую точность распознавания по сравнению с одноэтапными, но проигрывают в вычислительной сложности. Как правило, поиск и распознавание малоразмерных объектов осуществляется на изображениях в градациях серого или цветных изображениях в пространстве Red Green Blue (RGB). Стоит отметить, что даже у передовых архитектур СНС обнаружение малоразмерных объектов на изображениях вызывает трудности. Это связано с проблемой переобучения модели СНС. *Переобучение* – это негативный эффект, возникающий, когда алгоритм в процессе обучения формирует решающее правило слишком близко соответствующее тренировочному набору данных. Переобученная модель нейронной сети (НС) хорошо работает на данных, которые входили в тренировочную выборку, а на тестовых данных, которые модель НС никогда «не видела» показывает отрицательный результат. Это связано с тем, что объем при-

знакового пространства, характеризующий малоразмерные объекты на изображении, мал относительно вычислительной сложности модели НС. К тому же, современные архитектуры СНС содержат миллионы обучаемых параметров и с каждым годом вычислительные сложности алгоритмов продолжают расти в угоду более точным алгоритмам, что увеличивает вероятность переобучения моделей СНС.

Большое количество работ, посвященных проблеме поиска и распознавания малоразмерных объектов на изображениях, говорит об актуальности исследования данного направления. В 2016 году авторы Chen C., Liu M.-Y., Tuzel O., Xiao J. опубликовали одну из первых работ [1] посвященную поиску и распознаванию малоразмерных объектов на изображениях. В качестве алгоритма распознавания используется двухэтапная СНС R-CNN для предсказания ограничивающих рамок [2]. Увеличение точности нейросетевого алгоритма достигается за счет аугментации данных, применения контекстной информации и модификации архитектуры СНС. Последующие работы [3–8], посвященные распознаванию малоразмерных объектов на изображениях, используют подходы для увеличения точности распознавания объектов, в основе которых лежит парадигма подходов статьи [4].

Спектр применения двухэтапных СНС значительно уже одноэтапных СНС из-за высокой вычислительной сложности, особенно в автономных бортовых системах раннего обнаружения. Поэтому применяют одноэтапные СНС, среди которых можно выделить зарекомендованные архитектуры: You only look once (YOLO) [9], Single shot multibox detector (SSD) [10], CenterNet [11] и др. Так 2022 году авторы Akyon F. C., Onur Altinuc S., Temizel A. предложили алгоритм Slicing Aided Hyper Inference (SAHI) [12], который позволяет увеличить интегральную точность обнаружения малоразмерных объектов на изображениях. Фреймворк основан на базе одноэтапной СНС Fully convolutional one-stage object detection (FCOS) [13]. Алгоритм разбивает входное изображение на количество n подизображений с перекрытием. Каждое подизображение анализируется на наличие объектов интереса. Интегральное увеличение точности обеспечивается за счет аугментации данных и тонкой настройки (fine-tuning) модели СНС. Алгоритм SAHI подразумевает последовательную обработку изображений, что требует меньше ресурсов памяти вычислительной аппаратуры по сравнению с обработкой всего изображения. Но с другой стороны увеличивается время выполнения алгоритма. Применение SAHI целесообразно в обработке крупномасштабных изображений, где нет существенных ограничений, связанных со временем выполнения. В бортовых системах раннего обнаружения применение такого алгоритма не целесообразно.

Снижение вероятности переобучения за счет слияния мультиспектральных изображений [14, 15, 16], полученных с различных сенсорных датчиков является новым актуальным направлением регуляризации. Слияние изображений осуществляется различными способами: поканальное слияние на уровне пикселей, методом главных компонент, дискретным вейвлет преобразованием и др. Однако, не все бортовые системы оснащены необходимыми сенсорами.

Другим способом снижения вероятности переобучения СНС является увеличение признакового пространства за счет оценки последовательности видеок кадров рекурсивными алгоритмами Long Short-Term Memory (LSTM). С одной стороны, применение LSTM учитывает признаки, характеризующие временную зависимость, но с другой применение LSTM увеличивает вычислительную сложность СНС, обладают более сложной процедурой обучения и порой, могут выдавать непредсказуемый результат из-за своей рекурсивной природы.

Стоит отметить, что в рассмотренных работах не поднимается вопрос переобучения СНС и отсутствует причинно-следственная связь между переобучением модели СНС и неудовлетворительной точностью распознавания малоразмерных объектов на изображениях.

С учетом данных замечаний в настоящей статье предложен подход снижения вероятности переобучения СНС в задаче поиска и распознавания малоразмерных объектов, в основе которого лежит алгоритм предварительной обработки последовательности видеок кадров. Алгоритм увеличивает исходное признаковое пространство новыми признаками движения для двух моментов времени. Применение разработанного алгоритма распространяется на широкий спектр архитектур СНС при этом, несущественно увеличивая вычислительную сложность архитектуры СНС.

Проблемы обучения сверточных нейронных сетей. Обучение СНС базируется на методе обратного распространения ошибки, в основе которого лежит градиентный спуск. Обучение алгоритма происходит итеративным способом, который формально можно описать следующим образом:

- 1) из обучающей выборки случайным образом выбирается партия (батч) изображений, которая пропускается через СНС;
- 2) на основе полученного решения СНС и эталонного значения вычисляется значение ошибки, по формуле выбранной разработчиком;
- 3) методом обратного распространения ошибки вычисляются и применяются поправки к весовым коэффициентам СНС;
- 4) процесс обучения продолжается до тех пор, пока значение ошибки достигнет некоторого порогового значения.

На рис. 1 приведена возможная реализация зависимости значений ошибки НС от эпох обучения на тренировочном и тестовом выборках.

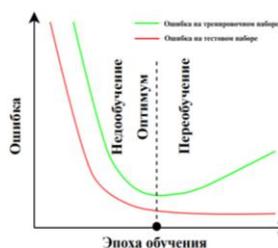


Рис. 1. Иллюстрация процесса обучения модели нейронной сети

Красная кривая иллюстрирует значение ошибки обучения НС на тренировочной выборке, а зеленая кривая значение ошибки обучения НС на тестовой выборке. До определенного момента обучения значения ошибки на тренировочной и тестовой выборке падают. На этом этапе модель НС находится в состоянии недообучения. После определенного момента ошибка обучения на тестовой выборке начинает увеличиваться. В этот момент модель НС начинает переобучаться. Модель НС в момент смены градиента направленности кривой ошибки на тестовой выборке имеет лучшее решающее правило в заданных рамках.

На рис. 2 приведена иллюстрация решающего правила (синяя кривая) модели НС на разных этапах обучения в двумерном пространстве признаков. На рис. 2 синяя кривая отображают решающие правила СНС, красные и зеленые окружности — признаки двух классов в двумерном пространстве.

Вероятность переобучиться модели СНС в задаче поиска и распознавания малоразмерных образов на изображениях больше, нежели для больших объектов. Это связано с тем, что малоразмерные объекты представлены малым количественным описанием на изображении. Для снижения вероятности переобучения применяют специальные подходы, которые объединяют термин *регуляризация*.

Для пояснения концепции предлагаемого алгоритма предварительной обработки приведем пример. На рис. 3 представлен случай отображения объектов двух классов в двумерном и трехмерном признаковом пространстве (рис. 3,а,б соответственно). Попытка построения классификатора в двумерном пространстве

неизбежно приведет к неоправданному увеличению сложности решающего правила, что тождественно переобучению, как было показано на рис. 3,а (синяя кривая D). При этом, добавление нового признака (рис. 3,б) позволяет получить более простое решающее правило (синяя плоскость D), однозначно разделяющее объекты двух классов B_1, B_2 .

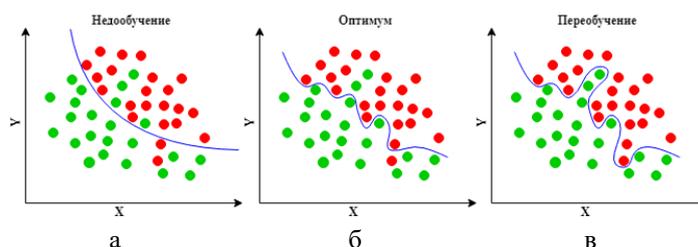


Рис. 2. Иллюстрация модели нейронной сети на разных этапах обучения

Таким образом, увеличение признакового пространства новым независимым признаком движения может снизить вероятность переобучения и повысить надежность классификации

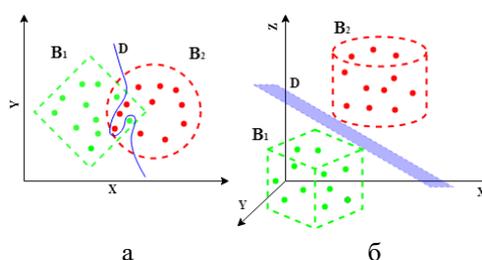


Рис. 3. Отображение множества объектов в виде точек

Алгоритм поиска и распознавания малоразмерных объектов на изображениях. Формально алгоритм поиска и распознавания малоразмерных объектов на изображениях можно представить в виде структурной схемы, представленной на рис. 4. Последовательное во времени изображение обрабатывается алгоритмом предварительной обработки, где формируется изображение с признаком движения. Извлечение семантических представлений высокого уровня происходит в экстракторе признаков MobileNet V2. Далее в агрегаторе признаков происходит объединение семантических представлений с разных масштабов пирамиды признаков методом Feature Pyramid Net (FPN) [17]. Декодирование зашифрованной информации по плотной сетке координат осуществляется с помощью алгоритма YOLO. Предсказанные ограничивающие рамки фильтруются алгоритмом неадекватного подавления Non Maximum Suppression (NMS) [18].

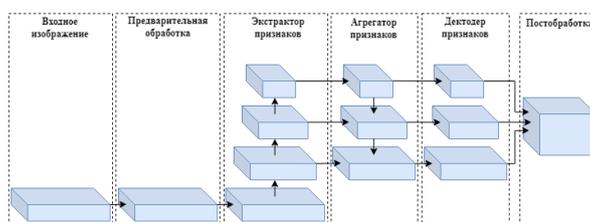


Рис. 4. Структурная схема алгоритма поиска и распознавания объектов на изображениях

В последнее время большое внимание уделяется методам регуляризации, основанных на изменении данных за счет алгоритмов предварительной обработки изображений. Вся совокупность алгоритмов предварительной обработки изображений условно можно разделить на категории, рассмотренные в [19].

Разработка алгоритма предварительной обработки. В данном разделе рассмотрен разработанный алгоритм предварительной обработки изображений, формирующий псевдоцветное изображение с признаком движения. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 5 [20].

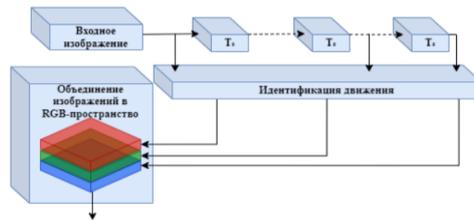


Рис. 5. Структурная схема алгоритма слияния последовательности изображений, T_0 – период появления изображений камерой

На вход алгоритма поступают последовательные во времени изображения, где накапливаются в линии задержки с отводами. Далее три изображения, полученные в различные моменты времени: настоящий момент времени, T_0 и $3T_0$ поступают в блок идентификации движения. Временная задержка T_0 определяется частотой выдачи кадров камерой. Блок идентификации движения формирует два разностных изображения:

$$d_{ij}(x, y) = |f(x, y, t_i) - f(x, y, t_j)|, \quad (1)$$

$$d_{ik}(x, y) = |f(x, y, t_i) - f(x, y, t_k)|, \quad (2)$$

где $f(x, y, t_i)$, $f(x, y, t_j)$, $f(x, y, t_k)$ – дискретные изображения, полученные в моменты времени t_i , t_j , t_k ; x , y – пространственные координаты. Изображение, полученное в момент времени t_i , является опорным изображением. Разностные изображения d_{ij} , d_{ik} формируются путем сравнения опорного изображения с изображениями, полученными в моменты времени $t_j = T_0$, $t_l = 3T_0$. Таким образом, d_{ij} , d_{ik} характеризуют медленное и быстрое наличие движения. Алгоритм идентификации движения разработан с целью достижения компромисса между вычислительной сложностью и точностью идентификации движения. Подразумевается, что алгоритм предварительной обработки использует изображения со статичным фоном. Подвижность фона можно компенсировать применением стабилизационного алгоритма. Применение алгоритма предварительной обработки распространяется на широкий спектр СНС. Новизной предложенного алгоритма является использование двух разностных изображений

Экспериментальное исследование динамики обучения сверточных нейронных сетей. В экспериментальной части работы произведено исследование характеристик обучения, а также оценка характеристик точности поиска и распознавания малоразмерных объектов на изображениях тестовой модели СНС на основе критерия Mean Average Precision (mAP) [21], который характеризует интегральную точность обнаружения по всем классам:

$$mAP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AP_i, \quad (3)$$

где AP - Average Precision критерий, характеризующий среднюю точность поиска и распознавания объектов на изображениях одного класса. В свою очередь AP есть площадь под кривой точность-полнота (precision-recall).

Для проведения данного эксперимента сформирован датасет для задачи поиска и распознавания малоразмерных объектов. Датасет состоит из синтетических изображений, сформированных с помощью среды разработки 3D графики Unreal Engine 5. Сгенерировано 80000 изображений из 80 видеосюжетов с различными фонами и присутствием на них объектов малых размеров. Весь датасет разбит на тренировочную и тестовую выборки в процентном соотношении 70° к 30° соответственно. Для достижения релевантности экспериментальных результатов изображения в тренировочной и тестовой выборках имеют различные фона. Изображения характерны статичным задним фоном и наличием малоразмерных объектов пяти шести техники. Изображения представлены в градациях серого от 0 до 255 градаций яркости и имеют разрешение 640 на 640 элементов яркости с частотой появления 25 кадр/с. Критерий малоразмерности объектов на изображениях сформулирован следующим образом:

- 1) физический размер объектов реального мира не превышает 6 м;
- 2) отношение площади рамки, обрамляющей объект, и площади видеокадра находится в пределах от 0.08 до 0.58.

На основе исходных видеосюжетов получены тестовые и тренировочные выборки псевдоцветных изображений с признаком движения. Изображения в датасетах получены для того момента времени.

В экспериментальном исследовании используется тестовая модель СНС с вычислительной сложностью $5.934 \cdot 10^9$ FLOPS. СНС была обучена на исходных и псевдоцветных тренировочных выборках изображений. Кривые ошибок обучения тестовой модели на тренировочном и тестовом датасетах от эпох обучения приведены на рис. 6.

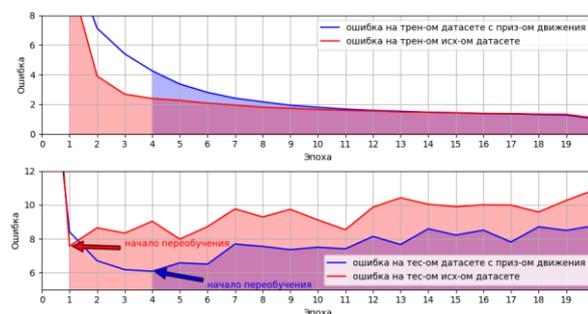


Рис. 6. Зависимости значения ошибок обучения тестовой модели СНС от эпох обучения

Из полученных зависимостей видно, что после определенной эпохи обучения кривые ошибок обучения на тренировочной и тестовой выборках начинают расходиться. В момент расхождения кривых СНС начинает переобучаться. Момент расхождения кривых для СНС, обученных на выборке псевдоцветных изображений начинается с пятой эпохи обучения, в то время как обучение СНС на исходной выборке изображений начинается со второй эпохи обучения. Это замечание говорит о том, что добавление признака движения позволяет снизить вероятность переобучения. Оценка точности тестовой модели СНС MobileNetV2-YOLO представлена на рис. 7.

Полученные оценки характеристик точности тестовой модели СНС MobileNetV2-YOLO не противоречат теоретическим предположениям: «увеличение p34-признакового пространства малоразмерных объектов снижает вероятность переобучения», что позволило увеличить интегральную точность обнаружения малоразмерных объектов на 23,65% mAP.

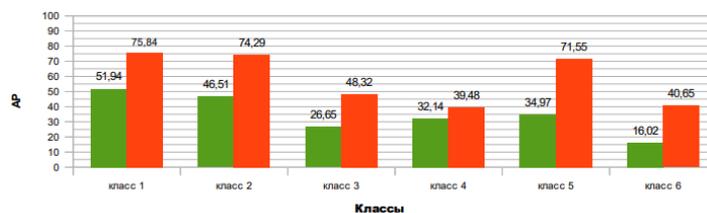


Рис. 7. Оценки AP архитектур СНС MobileNetV2-YOLO
зеленый цвет – СНС обученная на изображениях в градациях серого; красный
цвет – СНС обученная на псевдоцветных изображениях

Заключение. Разработан алгоритм предварительной обработки последовательности видеок кадров, который позволил снизить вероятность переобучения за счет увеличения исходного пространства признаков новыми независимыми признаками движения. Применение разработанного алгоритма позволило увеличить интегральную точность поиска и распознавания малоразмерных объектов на изображениях тестовой модели сверточной нейронной сети на 23,65% Mean Average Precision.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chen C., Liu M.-Y., Tuzel O., Xiao J. R-CNN for small object detection // Asian Conference on Computer Vision, Springer, Taipei, Taiwan, November, 2016. – P. 214-230.
2. Bochkovskiy A., Wang C.-Y., Mark Liao H.-Y. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection // arXiv. – 2020. – Available at: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.
3. Hu G., Yang Z., Hu L., Huang L., Han J. Small Object Detection with Multiscale Features // International Journal of Digital Multimedia Broadcasting. – 2018.
4. Nguyen N.-D., Do T., Ngo T. D., Le D.-D. An evaluation of deep learning methods for small object detection // Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2020.
5. Feng J. et al. Small Object Detection in Optical Remote Sensing Video with Motion Guided R-CNN // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA, 2020. – P. 272-275.
6. Cao G., Xie X., Yang W., Liao Q., Shi G., Wu J. Feature-fused SSD: fast detection for small objects // Ninth International Conference on Graphic and Image Processing (ICGIP 2017). – 2018.
7. Zhang X., Izquierdo E., Chandramouli K. Dense and Small Object Detection in UAV Vision Based on Cascade Network // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW), Seoul, Korea (South), 2019. – P. 118-126.
8. Kisantal M., Wojna Z., Murawski J., Naruniec J., Cho K. Augmentation for small object detection // arXiv. – 2019. – Available at: 1902.07296.
9. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An incremental improvement // arXiv. – 2018. – Available at: <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1>.
10. Liu W., Anguelov D., Erhan D. et al. SSD: single shot multibox detector // European Conference on Computer Vision, vol. 9905 of Lecture Notes in Computer Science. – Springer, Cham, Switzerland, 2016. – P. 21-37.
11. Zhou X., Wang D. Objects as Points // arXiv. – 2019. – Available at: ArXiv, abs/1904.07850.
12. Akyon F.C., Onur Altinuc S., Temizel A. Slicing Aided Hyper Inference and Fine-Tuning for Small Object Detection // IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Bordeaux, France, 2022. – P. 966-970.
13. Zhi T., Chunhua S., Hao C., Tong H. FCOS: Fully convolutional one-stage object detection // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2019. – P. 9627-9636.
14. Smeelen M., Schwering P., Toet A., Loog M. Semi-hidden target recognition in gated viewer images fused with thermal IR images // Inf. Fusion. – 2014. – P. 131-147.
15. Niu Y., Xu S., Wu L., et al. Airborne infrared and visible image fusion for target perception based on target region segmentation and discrete wavelet transform[J] // Mathematical Problems in Engineering. – 2012.
16. Liu S., Liu Z. Multi-Channel CNN-based Object Detection for Enhanced Situation Awareness // arXiv. – 2020. – Available at: <https://arxiv.org/abs/1712.00075>.

17. Lin T.-Y., Dollár P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature pyramid networks for object detection // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – 2017. – P. 2117-2125.
18. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – 2014. – P. 580-587.
19. Верхаген К., Дейн Р., Грун Ф. и др. Распознавание образов. Состояние и перспективы. – М.: Радио и связь, 1985. – 104 с.
20. Ковалев В.В. Сергеев Н.Е. Методы решения проблемы переобучения нейронных сетей в задаче обнаружения малоразмерных объектов на изображениях // *Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'23»*. – 2023. – № 1. – С. 38-45.
21. Padilla R., Netto S.L., Silva E.A.B. A Survey on Performance Metrics for Object-Detection Algorithms // *2020 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, Niteroi, Brazil, 2020. – P. 237-242.

REFERENCES

1. Chen C., Liu M.-Y., Tuzel O., Xiao J. R-CNN for small object detection, *Asian Conference on Computer Vision, Springer, Taipei, Taiwan, November, 2016*, pp. 214-230.
2. Bochkovskiy A., Wang C.-Y., Mark Liao H.-Y. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection, *arXiv*, 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.
3. Hu G., Yang Z., Hu L., Huang L., Han J. Small Object Detection with Multiscale Features, *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, 2018.
4. Nguyen N.-D., Do T., Ngo T. D., Le D.-D. An evaluation of deep learning methods for small object detection, *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020.
5. Feng J. et al. Small Object Detection in Optical Remote Sensing Video with Motion Guided R-CNN, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA, 2020*, pp. 272-275.
6. Cao G., Xie X., Yang W., Liao Q., Shi G., Wu J. Feature-fused SSD: fast detection for small objects, *Ninth International Conference on Graphic and Image Processing (ICGIP 2017)*, 2018.
7. Zhang X., Izquierdo E., Chandramouli K. Dense and Small Object Detection in UAV Vision Based on Cascade Network, *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW)*, Seoul, Korea (South), 2019, pp. 118-126.
8. Kisantal M., Wojna Z., Murawski J., Naruniec J., Cho K. Augmentation for small object detection, *arXiv*, 2019. Available at: 1902.07296.
9. Redmon J., Farhadi A. YOLOv3: An incremental improvement, *arXiv*, 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1804.02767v1>.
10. Liu W., Anguelov D., Erhan D. et al. SSD: single shot multibox detector, *European Conference on Computer Vision, vol. 9905 of Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham, Switzerland, 2016, pp. 21-37.
11. Zhou X., Wang D. Objects as Points // *arXiv*. – 2019. – Available at: [ArXiv, abs/1904.07850](https://arxiv.org/abs/1904.07850).
12. Akyon F.C., Onur Altinuc S., Temizel A. Slicing Aided Hyper Inference and Fine-Tuning for Small Object Detection, *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Bordeaux, France, 2022, pp. 966-970.
13. Zhi T., Chunhua S., Hao C., Tong H. FCOS: Fully convolutional one-stage object detection, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2019, pp. 9627-9636.
14. Smeelen M., Schwering P., Toet A., Loog M. Semi-hidden target recognition in gated viewer images fused with thermal IR images, *Inf. Fusion*, 2014, pp. 131-147.
15. Niu Y., Xu S., Wu L., et al. Airborne infrared and visible image fusion for target perception based on target region segmentation and discrete wavelet transform[J], *Mathematical Problems in Engineering*, 2012.
16. Liu S., Liu Z. Multi-Channel CNN-based Object Detection for Enhanced Situation Awareness, *arXiv*, 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/1712.00075>.
17. Lin T.-Y., Dollár P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature pyramid networks for object detection, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 2117-2125.
18. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2014, pp. 580-587.

19. Verkhagen K., Deyn R., Grun F. i dr. Raspoznavanie obrazov. Sostoyanie i perspektivy [Pattern recognition. State and prospects]. Moscow: Radio i svyaz', 1985, 104 p.
20. Kovalev V.V. Sergeev N.E. Metody resheniya problemy pereobucheniya neyronnykh setey v zadache obnaruzheniya malorazmernykh ob'ektov na izobrazheniyakh [Methods for solving the problem of re-training neural networks in the task of detecting small-sized objects in images], *Mezhdunarodnyy kongress po intellektual'nym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam «IS&IT'23»* [International Congress on Intelligent Systems and Information Technologies "IS&IT'23"], 2023, No. 1, pp. 38-45.
21. Padilla R., Netto S.L., Silva E.A.B. A Survey on Performance Metrics for Object-Detection Algorithms, *2020 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, Niteroi, Brazil, 2020, pp. 237-242.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Ковалев Владислав Владимирович – Научно-конструкторское бюро вычислительных систем, e-mail: vlad.kovalev94@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79525864492; программист.

Сергеев Николай Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: nesergeev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79281742585; кафедра вычислительной техники; д.т.н.; профессор.

Kovalev Vladislav Vladimirovich – Scientific design bureau of computer systems, e-mail: vlad.kovalev94@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79525864492; programmer.

Sergeev Nikolay Evgenievich – Southern Federal University; e-mail: nesergeev@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79281742585; the department of Computer Science; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.932.2

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-276-285

К.И. Морев, П.А. Ледерер

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ НАБЛЮДАЕМОЙ СЦЕНЫ ИЗ СЕРИИ СНИМКОВ ДВИЖУЩЕЙСЯ КАМЕРЫ

Статья посвящена исследованию влияния использования различных математических моделей камер, следовательно, моделей формирования изображения сцены, при восстановлении 3-Д структуры сцены из набора 2-Д снимков в процессе движения камеры (восстановлении структуры из движения, далее – СИД). Сравнительная оценка проводится для двух моделей камер: классической модели камеры центральной проекции и, сравнительно новой, модели всенаправленной камеры. В статье дано краткое описание математической модели всенаправленной камеры, описанная модель используется в ходе экспериментов, также описаны способы представления изображений от всенаправленных камер. Дополнительно дается описание математической модели классической камеры центральной проекции. Описанная модель также используется в ходе проведения экспериментов. Используемые при решении задачи восстановления структуры из движения аналитические выкладки кратко упоминаются в статье. Также дается описание алгоритма получения 3-Д координат точек наблюдаемой сцены из последовательности снимков в движении. Проведенные в рамках исследования эксперименты подробно описаны в данной статье. Раскрыт процесс установки визуальных ориентиров, определения их истинных 3-Д координат. Описаны действия по формированию наборов данных для получения сравнительных оценок. В заключении работы дан анализ результатов экспериментов, выделены модели, позволяющие уменьшить погрешности восстановления 3-Д координат наблюдаемых визуальных ориентиров.

Математические модели камер; восстановление структуры из движения; визуальные ориентиры; всенаправленная камера; эпиполярная геометрия.

K.I. Morev, P.A. Lederer

**EXPERIMENTAL ESTIMATION OF ERRORS IN RECONSTRUCTING
THE STRUCTURE OF THE OBSERVED SCENE FROM A SERIES
OF IMAGES BY VARIOUS CAMERAS**

The article is devoted to the study of the influence of using various mathematical models of cameras, and therefore models of scene image formation, when restoring the 3-D structure of a scene from a set of 2-D images during camera movement (restoring the structure from motion, hereinafter referred to as LEDs). A comparative assessment is carried out for two camera models: the classic central projection camera model and the relatively new omnidirectional camera model. The article provides a brief description of the mathematical model of an omnidirectional camera, the described model is used during experiments, and also describes ways to represent images from omnidirectional cameras. Additionally, a description of the mathematical model of the classical camera of the central projection is given. The described model is also used during experiments. The analytical calculations used in solving the problem of restoring structure from motion are briefly mentioned in the article. An algorithm for obtaining 3-D coordinates of the points of the observed scene from a sequence of images in motion is also described. The experiments carried out as part of the study are described in detail in this article. The process of setting visual landmarks and determining their true 3-D coordinates is revealed. The steps for the formation of data sets for obtaining comparative estimates are described. At the end of the work, an analysis of the experimental results is given, models are identified that reduce the errors in restoring the 3-D coordinates of the observed visual landmarks.

Mathematical models of cameras; restoration of structure from motion; visual landmarks; omnidirectional camera; epipolar geometry.

Введение. Задача восстановления структуры из движения является одной из множества задач сферы компьютерного зрения и как научная задача известна с конца прошлого века [1]. Однако, несмотря на давнюю известность и достаточно глубокий уровень изучения, в рамках задачи восстановления СИД продолжают появляться новые приложения. Так, ставшие популярными в последние годы всенаправленные камеры открывают новые возможности при решении задачи СИД. В практике компьютерного зрения всенаправленные камеры впервые были использованы в фотограмметрии, когда изображения всенаправленной камеры, как правило, регистрировалось путем вращения обычной камеры вокруг центра проекции или сшивкой панорамы из множества изображений от классических камер. В последние годы эффективность использования всенаправленных камер была значительно повышена благодаря прогрессу в области светочувствительных сенсоров и методов обработки изображений, например, появлению цифровых камер высокого разрешения и высокоточных алгоритмов сшивки панорам. В отличие от классических камер, использующих объективы с ограниченным полем зрения, всенаправленные камеры не ограничиваются полем зрения одного объектива, а захватывают всю окружающую сцену из одной точки пространства. Существуют разные способы получения такого панорамного изображения. Например, оно может быть сделано с помощью стандартной камеры и специализированного оборудования, такого как моторизованные панорамные комплексы (например, [2–5]) или специализированное автоматическое программное обеспечение (например, [3, 6]), или, что значительно удобнее, с помощью программно-аппаратных комплексов, которые автоматизируют все шаги, такие как Civetta от Weiss AG [7] или Sphero-Cam от SpheronVR [8].

Используемые модели камер. В этом разделе приведены используемые в расчетах математические модели камер. Первой описывается модель классической камеры центральной проекции (рис. 1). Изображение камеры формируется проекцией через центральную точку камеры всех наблюдаемых точек мира на плоскость изображения [9]. Камера определяется центром S , локальной прямоугольной системой координат и плоскостью изображения. Трехмерная точка M имеет координаты $M_c = (X_{M_c}, Y_{M_c}, Z_{M_c})$ в системе координат камеры. Для получения изображе-

ния точки M , точка M_c проецируется на плоскость изображения в точку $m = M_c / Z_{M_c}$. Координата Z в системе камеры определяет расстояние от центра камеры до проецируемой точки [10].

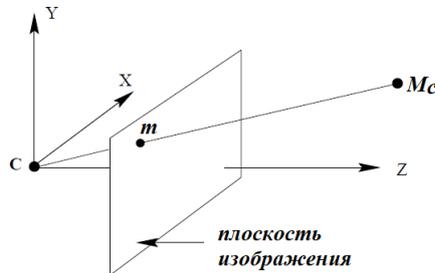


Рис. 6. Модель камеры центральной проекции

Изображение камеры центральной проекции представляет собой плоский снимок сцены, ограниченной шириной поля зрения камеры.

Ниже представлена модель всенаправленной камеры, используемая в дальнейших экспериментах. Изображение, полученное всенаправленной камерой, аппроксимируется центральной проекцией всех наблюдаемых точек пространства на сферическую поверхность – поверхность изображения. Модель всенаправленной камеры, аналогично камере центральной проекции, определяется как показано на рис. 2, ее центром C , локальной прямоугольной системой координат камеры и поверхностью изображения – поверхностью сферы [11]. Для получения изображения точки M , точка M_c проецируется на поверхность сферы в точку $m = M_c / \|M_c\|$ (Вектор нормировали, чтобы получить единичную длину).

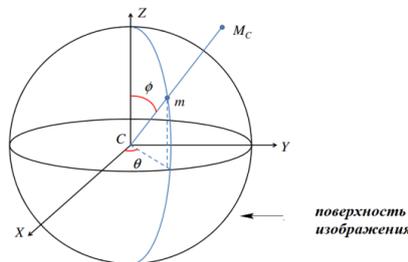


Рис. 7. Модель всенаправленной камеры

Таким образом, точки изображения всенаправленной камеры могут быть описаны единичными трехмерными векторами, подобно N-векторам в [12]. Единичные трехмерные вектора описывают положение точки в прямоугольной системе координат камеры, однако положение точек изображения удобнее выразить в сферических координатах. Сферические координаты (r, θ, ϕ) связаны с декартовыми координатами (X, Y, Z) через выражение

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \theta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right), \phi = \cos^{-1} \left(\frac{Z}{r} \right). \quad (1)$$

Изображение всенаправленной камеры представляет сферическую панораму сцены $360^\circ \times 180^\circ$ (360° по горизонтали и 180° по вертикали) вокруг центра камеры. Полученные всенаправленной камерой изображения будут представлены в виде равноугольной проекции сферы на плоскость. Формат именно равноугольной проекции наиболее широко применяется при обработке изображений, включая хор-

шо известные пакеты программного обеспечения с открытым исходным кодом и коммерческие пакеты программного обеспечения, например, OpenMVG [13], Agisoft Metashape [14] и Pix4Dmapper [15]. На рис. 3 показан пример изображения от всенаправленной камеры, развернутого в равноугольной проекции.

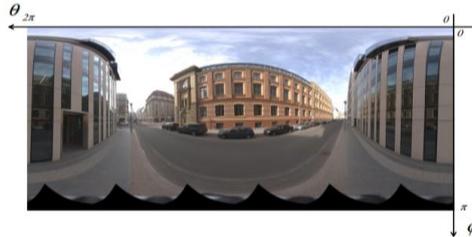


Рис. 8. Пример сферической панорамы в равноугольной проекции

Для упомянутых выше моделей камер предполагается существование глобальной системы координат (далее – ГКС), в которой может быть определено положение камеры (положение и ориентация). Если точка M имеет декартовы координаты M_w в мировой системе координат, то координаты M_c определяются поворотом R и сдвигом t таким образом, что:

$$M_c = RM_w + t. \quad (2)$$

Алгоритмы, применяемые при решении задачи СИД. Ниже описывается общая для обеих моделей камер схема действий для решения задачи СИД. Основная идея состоит в том, чтобы вычислить относительное движение между двумя первоначальными камерами, используя соответствия между точками двух изображений и уравнения эпиполярной геометрии [16]. Затем получить трехмерные координаты этих точек (начальная структура), решая триангуляционную задачу для всех сопоставленные между первоначальными камерами точек. После этой инициализации для каждого имеющегося следующего изображения последовательно выполняются следующие шаги: (1) добавляется одна новая камера в набор, (2) вычисляется 2D-3D соответствия из новой камеры с уже восстановленными триангуляцией точками, (3) вычисляется положение новой камеры, с использованием упомянутых 2D-3D соответствий и (4) восстанавливаются 3D координаты всех оставшихся точек по вычисленным параметрам связи между камерами. После добавления каждой новой камеры выполняется уточнение положений камер и структуры 3D-точек по вновь вычисленным координатам.

Эпиполярная геометрия для двух камер описана в [17]. Однако, для наглядности, ниже дано краткое описание основных принципов взаимосвязи между двумя камерами. Пусть C_1 и C_2 – центры двух камер. Без потери общности мы можем предположить, что система координат первой камеры является мировой системой координат, т.е. $C_1 = 0$, а R и t определяют поворот и смещение для второй камеры. Точка M проецируется в m_1 и m_2 в первой и второй камерах соответственно (рис. 4).

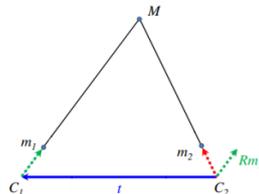


Рис. 9. Элементы эпиполярной геометрии для двух изображений произвольных камер

В общем случае точки M , m_1 , C_1 , m_2 и C_2 лежат в одной плоскости – эпполярной плоскости. И это можно выразить, указав, что векторы m_2 , Rm_1 и t являются копланарными. Также существование эпполярной плоскости позволяет определить основное ограничение эпполярной геометрии:

$$m_2^T E m_1 = 0, E = [t]_{\times} R. \quad (3)$$

Хорошо известно, что матрица E – существенная матрица, может быть вычислена с использованием восьми пар соответствий [18]. Поскольку уравнение 2 использует только предположение о копланарности, без учета ориентации лучей, разложение E на R и t обычно имеет 4 решения [19]. В камерах плоской проекции правильное решение ищется через знание о положительной глубине сцены (z -значение), а, следовательно, положительного расстояния от камеры до трехмерных точек. Для всенаправленных камер применяется аналогичное ограничение, но проверяется не знак глубины, а знак произведения $m^T M c$.

Проведение эксперимента. Сбор данных является первым шагом в наших экспериментах. Исходя из принципа конструкции, сферические камеры можно разделить на три основные категории: диоптрические камеры, катадиоптрические камеры и полидиоптрические камеры [20, 21]. Для проведения эксперимента использовалась камера Samsung Gear360, относящаяся к полидиоптрическим камерам. Ниже на рис. 5 приведено фото используемой в экспериментах камеры.

В качестве экспериментальной площадки выбрано небольшое помещение. В ходе эксперимента требуется восстановить структуру комнаты размерами 5х4м, а именно: вычислить 3-Д координаты визуальных ориентиров – размещенных на стенах агисо-маркеров. Агисо-маркеры были размещены на одной высоте относительно уровня пола, расстояние между маркерами было определено и зафиксировано. Следует отметить, что расположение ориентиров на одной высоте обеспечивает нахождение их в одной плоскости. Расстояние между ориентирами определено в метрах. Схема расположения визуальных ориентиров приведена ниже на рис. 6.



Рис. 10. Фото камеры, используемой в экспериментах

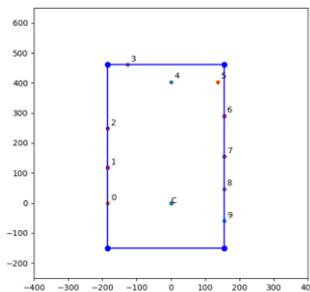


Рис. 11. Схема расположения визуальных ориентиров

На рис. 6 цифрами обозначены номера ориентиров, а крестами их положение. Также на рис. 6 отображена точка С – точка начала системы координат в которой определены координаты ориентиров. В табл. 1 указаны координаты визуальных ориентиров.

Таблица 6

Истинные координаты визуальных ориентиров

Номер ориентира	Координаты (X,Y,Z)
0	(-185; 0; 0)
1	(-185; 117,5; 0)
2	(-185; 248; 0)
3	(-126; 461; 0)
4	(0; 403,5; 0)
5	(137,5; 403,5; 0)
6	(155; 290,5; 0)
7	(155; 154,5; 0)
8	(155; 47; 0)
9	(155; -60; 0)

Упомянутая ранее камера Samsung Gear360 была установлена на штатив фиксированной высоты так, что визуальные ориентиры и оптический центр камеры находятся в одной плоскости. Ниже на рис. 7 представлен внешний вид стенда для выверки положения визуальных ориентиров и непосредственно ориентиры – агисо-маркеры.



Рис. 12. Внешний вид целевых визуальных ориентиров

Движение штатива с камерой выполнялось вручную. Каждое новое положение штатива определялось случайным образом, исходя из возможностей перемещения. Основной задачей при перемещении считался проход по помещению между противоположными углами для получения снимков как можно большего количества характерных для комнаты деталей.

Таким образом, было накоплено 10 наборов снимков всенаправленной камерой. Ниже на рис. 8 представлен пример снимка из набора.



Рис. 13. Пример исходного изображения от всенаправленной камеры

Как упоминалось ранее, обработка изображений от всенаправленной камеры будет производиться с изображениями, представленными в равноугольной проекции. Пример панорамы в равноугольной проекции, полученной из изображения входного набора данных приведен ниже на рис. 9.



Рис. 14. Изображение от всенаправленной камеры в равноугольной проекции

После преобразования исходного набора данных к виду равноугольных проекций, было произведено восстановление структуры помещения. Результат восстановления структуры приведен ниже на рис. 10.

Далее, для оценки координат ориентиров с использованием модели классической камеры центральной проекции из исходных снимков всенаправленной камеры (см. рис. 8) были вырезаны области разрешением 1920x1080. Таким образом имитировалась работа камеры с шириной поля зрения 90 градусов по горизонтали. На рис. 11 приведен пример полученного имитирующего изображения.



Рис. 15. Пример восстановленной структуры помещения



Рис. 16. Имитация снимка классической камеры центральной проекции

В конечном итоге, мы имеем 10 наборов снимков от всенаправленной камеры в движении по комнате с визуальными ориентирами (см. рис. 8). И 10 наборов снимков от классической камеры, аналогично двигающейся по комнате (см. рис. 11). Для каждого набора произведена последовательность действий по восстановлению структуры наблюдаемой сцены и получены 3-Д координаты наблюдаемых визуальных ориентиров.

Далее были вычислены среднее значение, среднеквадратическое отклонение (далее – СКО), минимальное и максимальное значение разницы между истинным и восстановленным положением визуального ориентира. Указанные значения были вычислены для координат по каждой из осей отдельно. Выражение для вычисления СКО:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (4)$$

где x_i – значение оцененных координат визуального ориентира, \bar{x} – среднее значение координат для всех экспериментов, n – количество экспериментов. Ниже в табл. 2 и 3 содержатся статистические характеристики для величины разницы между истинными и вычисленными 3-Д координатами визуальных ориентиров. Результаты приведены для всех 10-ти наборов снимков от всенаправленной и классической камер, соответственно.

Для табл. 2 и 3 названия столбцов: \bar{x} – среднее значение разницы с истинным значением положения ориентира по 10-ти наборам снимков, σ – СКО значения разницы, min и max – минимальное и максимально значение ошибки, соответственно. Ниже на рис. 12 изображены вычисленные координаты визуальных ориентиров для обеих моделей камер. Эллипсами изображены пределы 3σ для вычисленных координат каждого ориентира в отдельности. Координаты центра эллипса соответствуют среднему значению для вычисленных координат ориентира.

Таблица 7

Результаты оценки погрешностей для сферической модели камеры

Номер ориентира	\bar{x}	σ	min	max
0	(3.82; -6.31; -3.01)	(4.56; 12.85; 10.2)	(0.61; 3.53; 0.48)	(12.47; 8.96; 14.26)
1	(-0.25; -0.21; 4.89)	(8.35; 12.81; 8.61)	(1.64; 1.785; 1.47)	(8.88; 18.46; 15.86)
2	(3.16; 0.39; -1.53)	(4.59; 3.46; 8.86)	(4.40; 7.83; 1.46)	(10.50; 3.92; 16.6)
3	(3.56; 1.4; -3.17)	(7.84; 13.28; 12.78)	(1.11; 2.23; 3.51)	(18.31; 23.17; 10.52)
4	(0.06; 2.30; 4.08)	(6.67; 8.30; 7.61)	(3.56; 1.37; 0.86)	(15.15; 17.38; 15.17)
5	(1.62; 0.66; -1.46)	(4.98; 4.57; 5.85)	(0.78; 1.13; 1.29)	(9.28; 9.16; 7.21)
6	(0.24; -2.72; -5.35)	(5.16; 11.91; 13.23)	(0.81; 1.42; 2.67)	(8.15; 21.28; 19.81)
7	(1.39; 0.08; 0.51)	(10.86; 3.78; 5.13)	(1.32; 0.77; 0.34)	(16.1; 6.13; 9.9)
8	(7.20; 2.48; -3.73)	(3.52; 3.21; 3.44)	(1.64; 1.75; 1.27)	(18.78; 19.21; 14.55)
9	(-1.58; 0.11; -3.11)	(3.26; 5.65; 8.76)	(0.775; 0.768; 1.87)	(3.65; 10.03; 7.24)

Таблица 8

Результаты оценки погрешностей для классической модели камеры

Номер ориентира	\bar{x}	σ	min	max
0	(2.333; -7.66; 9.44)	(3.99; 14.01; 21.98)	(3.17; 2.94; 1.52)	(9.47; 15.30; 36.71)
1	(-1.89; 6.00; 5.05)	(8.94; 15.30; 10.54)	(5.13; 7.63; 1.61)	(12.41; 29.55; 25.42)
2	(2.83; 9.95; 9.01)	(14.59; 13.88; 16.12)	(5.93; 5.61; 6.28)	(25.62; 39.10; 36.57)
3	(-1.82; -0.87; -1.20)	(5.73; 18.36; 19.40)	(9.65; 3.08; 6.73)	(10.23; 38.80; 42.61)
4	(6.97; 2.99; 7.52)	(15.18; 9.13; 20.15)	(1.26; 1.15; 3.27)	(27.71; 19.36; 36.15)
5	(3.86; 1.50; 5.26)	(19.37; 12.15; 25.14)	(8.31; 9.79; 2.56)	(29.23; 24.45; 36.84)
6	(2.80; -0.25; -0.99)	(16.21; 6.84; 20.29)	(7.2; 9.69; 7.13)	(20.97; 12.93; 39.12)
7	(1.87; 0.19; 0.75)	(5.75; 18.75; 21.15)	(6.48; 3.89; 5.90)	(12.25; 32.60; 30.11)
8	(1.81; -6.39; -10.13)	(10.4; 14.13; 20.32)	(5.17; 4.0; 45.94)	(24.20; 18.00; 18.35)
9	(-2.91; -4.50; 17.78)	(17.75; 17.87; 26.75)	(4.51; 3.08; 7.81)	(33.06; 24.17; 55.96)

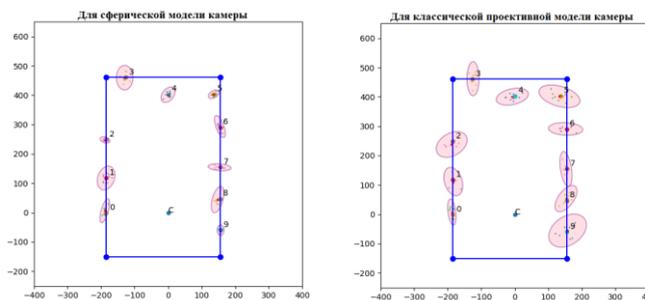


Рис. 17. Положения вычисленных 3-Д координат ориентиров

На рис. 12 продемонстрирована разница в точности решения задачи восстановления 3-Д координат заданных ориентиров. В левой части рисунка 12 приведены результаты вычисления координат при использовании сферической модели камеры, в правой для классической модели центральной проекции. Радиусы эллипсов слева, отображающих погрешности для сферической модели камеры, заметно меньше радиусов справа. А это значит что СКО ошибки относительно истинных координат меньше при использовании именно сферической модели камеры. Также можно обратить внимание на данные в табл. 2 и 3. Значения среднего \bar{x} сопоставимы при использовании обеих моделей камер, однако значения σ и max заметно больше при использовании модели проективной камеры, что опять же указывает на меньшую точность по результатам эксперимента.

Заключение. Результаты эксперимента позволяют сделать вывод о том, что использование всенаправленных камер дает возможность повысить точность решения задачи СИД при работе в закрытых помещениях. Более высокая точность определения координат наблюдаемых ориентиров при использовании сферической модели камеры может быть объяснена использованием сферической панорамы – относительно большого изображения, содержащего большее количество деталей и объектов сцены, позволяющего производить более точное сопоставление между двумя снимками. Также к преимуществам всенаправленных камер можно отнести более быстрый процесс формирования необходимого количества данных (снимков сцены) для запуска конвейера восстановления СИД.

В будущем предполагается исследование влияния выбранной модели ошибок эпиполярной геометрии на точность восстановленной структуры и скорость ее вычисления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xiong B., Jancosek M., Elberink S.O., Vosselman G. Flexible building primitives for 3d building modeling, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, Vol. 101, pp. 275-290.
2. Murtiyoso A., Grussenmeyer P. Documentation of heritage buildings using close-range uav images: dense matching issues, comparison and case studies, *The Photogrammetric Record*, 2017, Vol. 32, pp. 206-229.
3. Liao J., Yue Y., Zhang D., Tu W., Cao R., Zou Q., Li Q. Automatic tunnel crack inspection using an efficient mobile imaging module and a lightweight cnn, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022.
4. Zhang C., Cui Y., Zhu Z., Jiang S., Jiang W. Building height extraction from gf-7 satellite images based on roof contour constrained stereo matching, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, pp. 1566.
5. da Silveira T.L., Jung C.R. Dense 3d scene reconstruction from multiple spherical images for 3-dof+ vr applications, in *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces*, 2019, pp. 9-18.
6. Leutenegger S., Chli M., Siegwart R. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints, *Computer Vision (ICCV)*, 2011, pp. 2548-2555.
7. Calonder M., Lepetit V., Strecha C., Fua P. BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features, *11th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2010, pp. 778-792.
8. Wen W., Zhou Y., Zhang G., Fahandezh-Saadi S., Bai X., Zhan W., Tomizuka M., Hsu L.-T. Urbanloco: A full sensor suite dataset for mapping and localization in urban scenes, in *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020, pp. 2310-2316.
9. Pagani A., Stricker D. Structure from motion using full spherical panoramic cameras, in *2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, 2011, pp. 375-382.
10. da Silveira T.L., Pinto P.G., Murrugarra-Llerena J., Jung C.R. 3d scene geometry estimation from 360 imagery: A survey, *ACM Computing Surveys*, 2022, Vol. 55, pp. 1-39.
11. Angelov D., Dulong C., Filip D., Frueh C., Lafon S., Lyon R., Ogale A., Vincent L., Weaver J. Google street view: Capturing the world at street level, *Computer*, 2010, Vol. 43, pp. 32-38.
12. Zhang X., Zhao P., Hu Q., Ai M., Hu D., Li J. A uav-based panoramic oblique photogrammetry (pop) approach using spherical projection, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, Vol. 159, pp. 198-219.
13. Lai P.K., Xie S., Lang J., Laganiere R. Real-time panoramic depth maps from omni-directional stereo images for 6 dof videos in virtual reality, in *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2019, pp. 405-412.

14. Hartmann W., Havlena M., Schindler K. Recent developments in large-scale tie-point matching, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, Vol. 115, pp. 47-62.
15. Zhao Q., Feng W., Wan L., Zhang J. Sphorb: A fast and robust binary feature on the sphere, *International journal of computer vision*, 2015, Vol. 113, pp. 143-159.
16. Torii A., Havlena M., Pajdla T. From google street view to 3d city models, in *2009 IEEE 12th international conference on computer vision workshops, ICCV Workshops*, 2009, pp. 2188-2195.
17. Tian Y., Fan B., Wu F. L2-net: Deep learning of discriminative patch descriptor in euclidean space, in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2017, pp. 661-669.
18. Murrugarra-Llerena J., da Silveira T.L., Jung C.R. Pose estimation for two-view panoramas based on keypoint matching: A comparative study and critical analysis, in *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2022, pp. 5202-5211.
19. Jiang S., Jiang C., Jiang W. Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of sfm tools, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, Vol. 167, pp. 230-251.
20. Mouragnon E., Lhuillier M., Dhome M., Dekeyser F., Sayd P. Real time localization and 3d reconstruction, in *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2006, Vol. 1, pp. 363-370.
21. Scaramuzza D., Martinelli A., Siegwart R. A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion, in *Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems*, 2006, pp. 45-45.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Морев Кирилл Иванович – Акционерное общество Научно-конструкторское бюро вычислительных систем (АО НКБ ВС); e-mail: morev-ki@ya.ru; г. Таганрог, Россия; ; программист.

Ледерер Петр Алексеевич – e-mail: plederer25@gmail.com; программист.

Morev Kirill Ivanovich – Joint Stock Company "Scientific Design Bureau of Computing Systems" (JSC SDB CS); e-mail: morev-ki@ya.ru; Taganrog, Russia; programmer.

Lederer Pyotr Alekseevich – e-mail: plederer25@gmail.com; programmer.

УДК 28.23.24: 28.23.27: 004.82

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-285-299

С.М. Соколов

АНАЛИЗ СЦЕНЫ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ПОДВИЖНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Современные роботы способны выполнять все более сложные задачи, которые обычно требуют высокой степени взаимодействия с окружающей средой, в которой им приходится работать. Как следствие, роботизированные системы должны обладать глубокими и конкретными знаниями о своих рабочих пространствах, которые выходят далеко за рамки простого представления показателей, которое роботизированная система может создать с помощью приёмов обработки только зрительных данных, например в задаче одновременной локализации и картографирования (SLAM). Анализ сцены является связующим звеном между распознаванием объектов и знанием об окружающем мире и в том или ином виде присутствует в процессе извлечения из зрительных данных информации, необходимой для решения конкретной задачи. В статье представляется систематизированный подход к обеспечению анализа сцены бортовыми СТЗ. Рассматриваются технологии анализа сцены как составной части повышения степени автономности подвижных РТК. Ряд технологий только предстоит освоить и воплотить в жизнь, но общая структура позволяет постепенно углублять анализ сцены на борту РТК, тем самым повышая степень автономности без коренной переделки бортовой информационно-управляющей системы и СТЗ, как ключевой части информационного обеспечения. Информация, извле-

чёрная из зрительных данных, интегрируется в многослойную карту, обеспечивая высокоуровневое представление окружающей среды, которое воплощает в себе знания, необходимые робототехническому комплексу для реального выполнения сложных задач. Многослойная карта представляет собой форму хранения знаний об окружающей обстановке и объектов в ней. Эта карта объединяет пространственную иерархию объектов и мест с семантической иерархией понятий и отношений. Описываются структуры для представления данных в различных слоях этой карты и механизмы их использования. В частности, для описания маршрутов движения РТК, используются принципы интерпретирующей навигации, для представления информации об условиях функционирования и объектах интереса структуры сигнатур. В основе программной реализации предлагаемых механизмов используется унифицированный подход на основе программного каркаса СТЗ реального времени. Приводятся примеры использования описанных технологий при решении задач информационного обеспечения целенаправленных перемещений наземных РТК.

Степень автономности; система технического зрения; анализ сцены; многоуровневые когнитивные карты; конфигурационное пространство; каркас программного обеспечения СТЗ реального времени; онтологии робототехники; сигнатура.

S.M. Sokolov

SCENE ANALYSIS IN MOBILE INFORMATION SYSTEMS ROBOTIC COMPLEXES

Modern robots are capable of performing increasingly complex tasks that usually require a high degree of interaction with the environment in which they have to work. As a result, robotic systems must have deep and specific knowledge about their workspaces, which go far beyond the simple representation of indicators that a robotic system can create using visual data processing techniques, for example, in the task of simultaneous localization and mapping (SLAM). Scene analysis is the link between object recognition and knowledge about the world around us and is present in one form or another in the process of extracting information from visual data necessary to solve a specific task. The article presents a systematic approach to providing on-board STZ analysis of the scene. The technologies of scene analysis are considered as an integral part of increasing the degree of autonomy of mobile RTCs. A number of technologies have yet to be mastered and implemented, but the overall structure allows you to gradually deepen the analysis of the scene on board the RTK, thereby increasing the degree of autonomy without radically redesigning the on-board information management system and STZ, as a key part of information support. The information extracted from the visual data is integrated into a multi-layered map, providing a high-level representation of the environment, which embodies the knowledge necessary for a robotic complex to actually perform complex tasks. A multi-layered map is a form of storing knowledge about the environment and the objects in it. This map combines a spatial hierarchy of objects and places with a semantic hierarchy of concepts and relationships. The structures for representing data in various layers of this map and the mechanisms for their use are described. In particular, to describe the routes of the RTK, the principles of interpretive navigation are used to provide information about the operating conditions and objects of interest of the signature structure. The software implementation of the proposed mechanisms is based on a unified approach based on the real-time STZ software framework. Examples of the use of the described technologies in solving the problems of information support for targeted movements of ground RTCs are given..

Degree of autonomy; vision system; scene analysis; multilevel cognitive maps; configuration space; real time vision system framework; robotics ontologies; signature.

Введение. Учет сложности среды, окружающей робота, необходим для эффективного применения роботов с повышенной степенью автономности. Однако по-прежнему существует разрыв в ожиданиях пользователей и функциональности подобных роботов. Одним из ограничивающих факторов современных технологий является плохое восприятие окружающей среды, что резко влияет на то, что робот может понять о своем окружении. С одной стороны, это привело к значительным усилиям по совершенствованию сенсорных устройств и возможностей восприятия. С другой стороны, проблема решается путем оказания роботу поддержки в приобретении знаний и осведомленности о рабочей среде. В настоящее время при суперви-

зорном управлении рассматривается подход к анализу сцены, основанный на построении высокоуровневого представления окружающей среды, которое включает как геометрическую, так и символическую информацию. Выполняется разделение обязанностей. Робот отвечает за построение метрической карты окружающей среды, в то время как человек-оператор предоставляет пространственные подсказки о каждом возможном интересующем объекте, который должен быть включен в карту. Это направление можно назвать методом SLAM (одновременной локализации и картографирования) для построения карты окружающей среды, дополненной способностью интегрировать семантическую информацию, предоставленную пользователем.

Планирование задач для мобильных роботов обычно основывается исключительно на пространственной информации и поверхностных знаниях предметной области, таких как метки, прикрепленные к объектам и местам. Хотя пространственная информация необходима для выполнения основных операций робота (навигации и локализации), использование более глубоких знаний предметной области имеет решающее значение для наделяния робота более высокой степенью автономии и интеллекта, что особенно важно при перемещениях в естественных средах.

В настоящей работе подчёркивается тесная связь анализа сцены и степени автономности РТК. На основе анализа имеющихся публикаций и собственного опыта по исследованиям и разработке РТК с ПСА делается попытка систематизации технологий, которые могут быть применены при анализе сцены в бортовой информационно-управляющей системе робота с повышенной степенью автономности. Формируется общая схема анализа сцены, указывающая на разделение функций между оператором и РТК и открытая для наполнения и редакции по мере повышения степени автономности. Приводятся примеры использования этой схемы для решения задач информационного обеспечения целенаправленных перемещений наземных РТК с ПСА.

Известные решения в области анализа сцены. Анализ сцен имеет долгую историю, практически совпадающую с историей компьютерного зрения [1–3]. Если первые исследования в этой области рассматривали модельные сцены и акцентировали логический уровень рассмотрения [4], то в настоящее время на первый план выходит анализ естественных сцен с целью извлечения информации, необходимой, в частности, для систем управления автономных робототехнических комплексов [5, 6]. Хорошо связь степени автономности РТК и необходимости представления знаний об окружающей среде отражена в так называемом «пространстве автономии» (рис. 1).



Рис. 1. Пример показателей для определения уровня автономности, предложенные группой ALFUS («пространство автономии»)

Эта схема показывает связь желаемой/проектируемой степени автономности со сложностью и объёмом анализа сцены и необходимость распределения работ по анализу сцены между априорной подготовкой инфраструктуры области функцио-

нирования, оператором и бортовой информационно-управляющей системой. Подробно эти вопросы разбираются в [7]. Здесь отметим только тот факт, что автономность беспилотных средств касается множества технических областей. Сложность задачи и адаптивность к окружающей среде являются одними из ключевых аспектов. Для достижения целей, ориентированных на конкретные задачи, необходимо, чтобы любая значимая сущность окружающей среды (т.е. объекты, области и т.д.) могла обрабатываться как семантическое знание, чтобы получить то, что обычно называют семантической картой. Согласно Nuchter и Hertzberg [8]: семантическая карта для мобильного робота – это карта, которая содержит, в дополнение к пространственной информации об окружающей среде, присвоения отображаемых объектов объектам известных классов.

До последнего времени, в публикациях анализ сцены рассматривался в контексте исследований компьютерного зрения и интеллектуальных технологий. В робототехнических задачах анализ сцены был поглощён методами одновременного определения своего положения и построения карты (SLAM). Тем самым, делая акцент на получении и работе с количественным, метрическим описанием окружения. Сейчас положение меняется и намечается активный переход к развитию методов SLAM, объединяющих метрические и семантические карты области функционирования, что отводит анализу сцены полноценную роль, служащую повышению степени автономности. Исследования по совместному использованию зрительных данных и знаний об объектах внешнего мира, представленных, в частности, в текстовой форме, проводились ещё до «бума» нейросетевых трансформеров. В этом направлении активно велись работы по дополнению традиционных навигаторов многоиерархическим представлением городских карт. Передовые информационные системы для путешественников (ATISs) – это технология, которая имеет дело с интеллектуальными транспортными приложениями, направленными на предоставление пользователям жизненно важной информации о дорожном движении [9]. Исходно, такие приложения были ориентированы на интерактивный режим работы с пользователем, но заложенные механизмы позволяют двигаться по направлению повышения степени автономности транспортного средства и переходить к супервизорному управлению, используя дополнительную к зрительной информации в бортовых системах принятия решения. Например, по сочетанию нескольких внешних признаков и априорной информации об области функционирования, принимать решение о выборе траектории движения с учётом не только геометрической, но и несущей проходимости.

Ключевым моментом является то, как правильно представить и объединить семантические знания и геометрическую информацию. Связанную с этим работу можно разделить на две основные категории, отличающие полностью автоматические методы, не предполагающие взаимодействия с человеком, от полуавтоматических подходов, когда пользователь участвует в процессе получения знаний, поддерживая работу в построении семантической карты. В настоящее время при супервизорном (полуавтоматическом) управлении рассматривается подход к анализу сцены, основанный на построении высокоуровневого представления окружающей среды, которое включает как геометрическую, так и символическую информацию. Выполняется разделение обязанностей. Робот отвечает за построение метрической карты окружающей среды, в то время как человек-оператор предоставляет пространственные подсказки о каждом возможном интересующем объекте, который должен быть включен в карту [10].

Полностью автоматические методы можно далее разделить на три группы методов. Первая группа направлена на извлечение особенностей окружающей среды из лазерных карт для поддержки маркировки. Эти подходы включают определение атрибутов исследуемых пространств [11] и использование дополнения топологических карт семантическими знаниями с использованием привязки [12]. Второй набор методов использует классификацию и кластеризацию для автоматиче-

ской сегментации и маркировки метрических карт. Например, в работе Nuchter et al. [8], знания об окружающей среде извлекаются путем маркировки трехмерных точек с помощью разности градиентов между соседними точками. Генерация двумерных топологических карт из метрических карт была описана в [13, 14] (с использованием AdaBoost), в Brunskill et al. [15] (с использованием спектральной кластеризации) и в [16] (с использованием случайных полей Вороного). Третий набор методов распознавания объектов и категоризации мест основан на извлечении визуальных признаков, таких как в [17], или комбинации данных, полученных камерой RGB-D, таких как в [18]. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в полностью автоматизированном семантическом отображении, подход по-прежнему страдает от ошибок и отсутствия общности.

В полуавтоматических подходах оператор играет роль супервизора или оператора, обычно взаимодействующего с помощью естественного языка. В Diosi et al. [17] интерактивная процедура SLAM и сегментация водораздела используются для создания контекстной топологической карты. Зендер и др. [18] описали систему, способную создавать концептуальные представления о внутренней среде, созданной человеком. Роботизированная платформа обладает априорными знаниями о пространственных концепциях, используемыми для создания внутреннего представления окружающей среды, получаемого с помощью датчиков низкого уровня. Роль оператора на протяжении всего процесса сбора данных заключается в поддержке робота в нанесении меток на места. Пронобис и Йенсфельт [19] представляют многоуровневый алгоритм семантического отображения, объединяющий информацию о существовании объектов и семантических свойствах пространства. Вводимые пользователем данные, если они предоставлены, интегрируются в систему в качестве дополнительных свойств существующих объектов. Наконец, Нието-Гранда и др. [20] используют дополненное человеком отображение, основанное на многомерной вероятностной модели, для привязки пространственной области к семантической метке. Оператор поддерживает робота в этом процессе, давая ему инструкции по выбору меток. Немногие подходы нацелены на более продвинутую форму совместной работы, когда оператор активно сотрудничает с роботом для создания семантической карты не только для категоризации мест и маркировки, но и для распознавания объектов и позиционирования. Из-за сложности такого взаимодействия, чтобы оно не приводило к утомительным усилиям для неопытного оператора, предлагаются мультимодальные взаимодействия, позволяющее естественным образом работать с различными типами информации. Например, Kruijff et al. [21] внедряют систему для улучшения процесса картографирования с использованием естественного языка; Ранделли и др. [22] предлагают богатое мультимодальное взаимодействие, включающее речь, жесты и видение для семантической маркировки ориентиров окружающей среды.

Несмотря на тот факт, что взаимодействие с окружающей средой имеет первостепенное значение для большинства приложений робототехники современные системы, реализующие подходы SLAM не способны обеспечить тесное понимание на высоком уровне геометрии и семантики окружающего мира; разработка таких представлений должна быть ориентирована на задачи и в настоящее время это гибкая структура, позволяющая связать задачу с оптимальными представлениями отсутствием. Разработку такой структуры может принести только совместная работа сообщества робототехников, искусственного интеллекта и компьютерного зрения. По мнению авторов обзора проблем SLAM [23] машинное обучение на основе глубоких нейросетей будет иметь влияние на SLAM, но при этом следует учитывать особенности и ограничения этого направления. В этих технологиях эффективна классификация хорошо известных объектов, достигая уровня производительности около 80% и более [24]. При переходе в системах SLAM к более семантически значимым картам эти инструменты «черного ящика» могут ускорить этот переход. Но успехи в глубоком обучении в основном связаны с длительным вре-

менем обучения на суперкомпьютерах и выводе на специализированные графические процессоры для одноразового результата. Задача для исследователей SLAM (или даже для всех, кто хочет внедрить впечатляющие результаты в своей системе) заключается в том, как обеспечить достаточную вычислительную мощность во встроенных системах. Необходимо исследовать применимость этих результатов к меньшим масштабам вычислительных средств. Еще более серьезной и важной проблемой является онлайн-обучение. SLAM системы обычно работают в открытом мире с непрерывным наблюдением, где могут встретиться новые объекты и сцены. Но на сегодняшний день глубокие сети обычно обучаются на некоторых фиксированных сценариях и множестве данных (dataset), скажем, с фиксированным количеством классов объектов. Существующие сети, как правило, обучаются на огромном массиве размеченных данных, однако не всегда можно гарантировать, что подходящий набор данных существует или его практически можно использовать. Серьезной задачей является использование мощности глубоких сетей в сценарии с однократным или нулевым предъявлением (т. е. с одним или даже нулевым обучающим примером нового класса). Предварительная информация о сцене обеспечивает значительное повышение эффективности систем SLAM. Примеры в литературе на сегодняшний день включают известные объекты или предварительные знания об ожидаемой структуре в сцене вроде плавности как в [25], Манхэттен ограничениях, как в [26.], или даже ожидаемые отношения между объектами [27]. Очевидно, что глубокое обучение способно выделять такие предварительные знания для конкретных задач, таких как оценка меток сцены или глубины сцены. Как лучше всего извлечь и использовать эту информацию является серьезной открытой проблемой. Методы SLAM хорошо разбираются в математике геометрии сцены и встает вопрос - как соединить это хорошо понятную геометрию с выходами глубокой сети? Особая задача, которую необходимо решить, состоит в том, чтобы охарактеризовать неопределенность оценок, полученных на основе глубокой сети. Исследователи SLAM предлагают сложный контекст для изучения потенциала связи между архитектурами глубокого обучения и рекурсивными оценка состояния в крупномасштабных графических моделях, например, Кришан и другие [28] недавно предложили ряд Калмановских фильтров. Возможно, однажды станет возможным создать сквозная SLAM-система, использующая глубокую архитектуру, без явного моделирования функций, ассоциация данных и т. д.

В последние годы активное развитие получили методы объединения обработки зрительных данных совместно с текстами, описывающими изображения, с помощью генеративных нейросетей. Так, в беспилотных пассажирских перевозках голосовые запросы обрабатываются не напрямую алгоритмом беспилотного вождения, а опосредовано. Запрос при помощи технологии анализа голоса переводится в некоторый запрос – обычно признаковое представление запроса. После этого, уже по этому запросу, например, выбирается адрес и до него строится маршрут при помощи карты. Из отдельных модулей - эмбедингов формируется обобщенное представление, решающие конкретную подзадачу. Каждый модуль представляет собой некоторую сеть-трансформер. Другой пример такого объединения приводится в работе [29], где на основе общего представления осуществляется поиск действий в видео по описанию и, наоборот, – составление описания по видео. Пример блок-схемы алгоритма детектирования объектов на изображениях по их описаниям представлен на рис. 2.

Замечания, высказанные в обзоре по методам SLAM и опыт нашей группы по исследованию нейросетевых подходов в робототехнике говорит о том, что применение нейросетевых решений требует очень взвешенного рассмотрения.

Технологии анализа сцены и наш подход. В секторе робототехники ИПМ им. М.В. Келдыша РАН анализ сцены рассматривается как инструмент познания, который РТК использует в процессе функционирования в реальном мире. Степень, детальность этого анализа определяется поставленной и решаемой РТК задачей.

Анализ сцены является важной составляющей в алгоритмическом обеспечении СТЗ в составе бортовой информационно-вычислительной системы (БИУС). Общая схема создания этой части алгоритмического обеспечения следующая. После фиксации на очередной итерации в конфигурационном пространстве [30] координат по оси моделей и составу аппаратной поддержки, выполняется исследование интервала возможного алгоритмического обеспечения по оси алгоритмов. Это исследование выполняется с помощью имитационного моделирования, компоновки алгоритмов, реализованных в унифицированном каркасе ПО СТЗ РВ [31]. Выполняется исследование разделения работ между оператором и БИУС с использованием технологий многоуровневых карт и сигнатур.

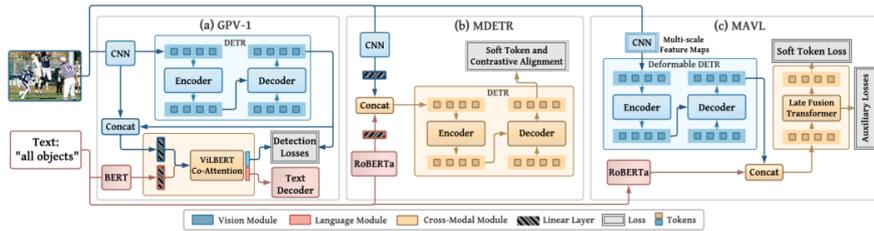


Рис. 2. Блок-схема метода детектирования объектов по их описаниям на основе нейросетей трансформеров

В качестве носителей знаний об окружающем РТК пространстве при разработке алгоритмического обеспечения выступает многослойная карта. Здесь представлены пространственные и функциональные свойства окружающей среды, которые позволяют роботу воспринимать окружающую среду так же, как это делает человек. Такая карта позволяет роботу воспринимать окружающую среду геометрически, а также использовать семантические представления, что может способствовать эффективному планированию и взаимодействию человека и робота. Как показано на рис. 3, многослойная карта состоит из трех слоев: геометрической карты внизу, топологической карты посередине для представления распределенных областей на графике и семантической карты сверху для представления свойств и классов объектов интереса.

<p>Семантическая карта: граф смысловых связей объектов интереса</p>
<p>Топологическая карта: граф пространственных связей объектов интереса</p>
<p>Физическая, геометрическая карта: Форматы, слои отображений сенсорных данных и используемой ГИС</p>

Рис. 3. Схема слоёв многослойной карты для представления данных о пространстве функционирования РТК

Семантическое картирование – это постепенный процесс сопоставления релевантной информации о мире (т.е. пространственной информации, временных событиях, агентах и действиях) с формальным описанием, поддерживаемым логическим механизмом, с целью обучения пониманию, сотрудничеству и коммуникации.

В последние годы семантическое картографирование стало очень активной областью исследований. Такой растущий интерес продиктован идеей о том, что если роботы могут понимать среду, в которой живут люди, и то, как они действуют в ней, они также могут сотрудничать и действовать (т.е. обладать более когнитивным поведением). Такое представление является необходимым условием для совместной работы двух или более агентов. Семантические карты являются необходимым условием объединения разнородных и разнородных групп РТК.

Для того, чтобы определить карту как “семантическую”, требуется, чтобы знания были представлены подходящим образом. Необходима формализация минимально общей структуры представления, которая должна быть реализована в семантической карте. Это представление должно играть роль общего интерфейса между всеми семантическими картами и может быть легко расширено или специализировано по мере необходимости. Это представление определяется как тройное $SM = \langle R, M, P \rangle$, где:

- ◆ R – глобальная система отсчета, в которой выражены все элементы семантической карты;
- ◆ M – набор геометрических элементов, полученных в качестве необработанных данных датчиков. Они выражены в системе отсчета R и описывают пространственную информацию в математической форме. $M_s \subseteq M$ – подмножество семантически значимых элементов;
- ◆ P – это набор предикатов, среди которых $-a(X, Y)$ и $instance-of(X, Y)$ являются обязательными.

В нашей практике на семантическом уровне используем граф связей ОИ (на основе онтологий предметной области). Топологический уровень – графы информационной эквивалентности, районы информационной эквивалентности, в соответствии с концепцией интерпретирующей навигации [32]. Геометрический/физический (количественный/метрический) уровень форматы и слои ГИС «Панорама», результаты построения карты по данным датчиков.

Карты занятости на основе сетки рабочего пространства могут создавать точное пространственное представление для локализации роботов и безопасной навигации. Но сложность планирования на основе карты сетки часто очень велика в крупномасштабных средах. Трун [33] представил метрико-топологический картографический подход для навигации мобильных роботов внутри помещений, который может использоваться гораздо эффективнее, но также согласуется с картой на основе сетки. *О. М. Mozos*, и др. [34?] в разработали эффективную систему навигации роботов с гибридной метрико-топологической картой. Их система использует алгоритм Дейкстры для планирования на топологической карте с позиционным графом, и их результат продемонстрировал, что планирование на основе гибридной карты более эффективно, чем планирование на основе метрик. Топологические карты разделяют регионы поверх карты-сетки. Мозос и др. [34] представили метод извлечения топологической семантической карты из метрической с использованием контролируемого обучения. Граф может быть определен как $G = \{N, E, S, P\}$, где:

- ◆ N – набор узлов, таких как районы информационной эквивалентности (имеющие своё информационное описание в терминах ИН). Каждый узел имеет уникальное имя.
- ◆ E – это набор ребер, который представляет ограничение (связи) – переходы между узлами.
- ◆ S относится к набору текущей области робота с учетом данных датчиков и одометрии на геометрической карте (текущая, определяемая по датчикам позиция).
- ◆ P – это набор глобальных положений каждого узла.

С помощью топологической карты робот или оператор может выбрать различные навигационные модули в разных регионах – например, в помещении или в хорошо организованном городском пространстве навигация управляется планировщиком на основе карты-сетки; как только осуществится выход в естественную среду, модуль навигации в естественной среде возьмет управление на себя. Верхний уровень – это семантическая карта, которая включает в себя пространственную концепцию сред, основанную на онтологии, связанную с топологической картой и геометрической картой. Это дает единообразное описание сред с метаданными, а также контекст объектов внутри сред. Это обеспечивает связь между пространственной информацией и концепцией человека (семантикой), которая позволяет расположить и естественная коммуникация человека и робота. Основываясь на работе [36], база знаний онтологии среды объединяется с информацией о топологии и геометрии. Онтология содержит таксономии и взаимосвязи свойств сред, которые позволяют делать выводы и рассуждения о гетерогенных средах.

Перспективным направлением в создании и описании пространственных представлений является применение четко определенных концептуальных онтологий. Применение этого строгого подхода упрощает процесс преобразования постановок задач на естественном языке во внутреннее представление робота и наоборот. В контексте навигационных роботов знание предметной области чаще всего требуется для моделирования представления пространства, движения и действия. Литература по когнитивной робототехнике в настоящее время становится все более насыщенной формально смоделированными представлениями пространственных знаний. Базовые расчеты регионального представления недавно были дополнены более целенаправленными моделями информации о типе маршрута [37] и пространственных отношениях. Хотя такие формальные представления в настоящее время неоднородны по своей природе, существует стремление к унифицированному подходу с использованием верхних пространственных онтологий, ниже которых могут быть разработаны более конкретные онтологии предметной области для отдельных мобильных роботов. Такое четко определенное представление пространственных концепций должно затем позволить реализовать более конкретные и расширяемые системы, которые связывают язык с пространственными знаниями.

На перспективу активного использования РТК с ПСА западные коллеги разрабатывают онтологии верхнего уровня робототехники и онтологии прикладных областей [38]. В России также начались работы в этом направлении, готовится первый стандарт по онтологиям в робототехнике. Мы же в своих экспериментах, не имея достаточной базы данных для формирования онтологии прикладной области, используем смешанный подход: отталкиваясь от функциональных возможностей РТК для описания сценариев его работы используем термины из известного нам тезауруса предметной области (лексикона конечных пользователей). У каждого объекта интереса (ОИ) есть свойства (описанные в сигнатуре ОИ). Онтологическое описание среды реализовано с помощью семантических формализмов OWL. С помощью описания OWL, например, мы можем определить семантическое представление области функционирования РТК. В основе, мы определяем следующие понятия для представления окружающей среды. Класс типа района информационной эквивалентности (РИЭ) относится к разделению областей функционирования по типам ориентиров и других объектов интереса, а также типам опорной проходимости. У каждого объекта интереса есть класс, такие свойства, как ориентация, подкласс, пространственные отношения с другими объектами. Пространство разделено на районы инф эквивалентности со своими специфическими способами выделения ориентиров области. При наличии семантики, созданной OWL, мы можем использовать структуру рассуждения о семантической

карте, которая включает интерфейс Prolog для запроса базы знаний онтологии OWL в ROS. Помимо таксономий свойства среды, мы также можем определить онтологию задачи с помощью OWL, т.е. размещение чего-либо в заданном районе приведет к последовательности рассуждений и действий.

Анализ сцены состоит из нескольких подзадач. Первой из этих подзадач является извлечение информации из зрительных данных. Направляется это извлечение сигнатурами объектов интереса. Одним из основных алгоритмов, используемых на старте сегментации выступает алгоритм сегментация изображения сцены на однородные области. Совместно с априорной информацией о возможных объектах интереса в поле зрения результаты сегментации позволяют более точно и надёжно исследовать объекты интереса, сосредотачивая внимание на тех областях, в которых могут содержаться дополнительные характеристики этих объектов (границы, форма). В качестве наиболее эффективных в составе БИУС были выбраны графовые алгоритмы. Программное обеспечение для работы с графовыми структурами унифицировано в рамках каркаса программного обеспечения.

В дополнение к описанной структуре многоуровневых карт, мы используем специализированные сигнатуры. Эти структуры представляют собой хранилища, позволяющие объединить информацию об объектах интереса с информацией в слоях семантической карты на борту (проверка релевантности реальности модели или построение этой модели) и конструктивно использовать различные методы обработки зрительных данных. Реализовывать целенаправленный сбор зрительных данных, управляемый моделью условий и объектов интереса. В структуре сигнатур, предусматривается помимо перечня необходимых вычислений, возможные действия по выбору поля зрения или необходимости изменения точки наблюдения. Эти данные требуют согласованного использования многоуровневых карт. Механизм оперативной автоматической работы с такими представлениями находится в стадии разработки. В практических задачах реализуется статическая фиксация действий РТК, а для оперативного использования знаний предполагается участие оператора. Например, указание новых ориентиров по ходу движения. По мере развития алгоритмической базы, описанная схема реализации анализа сцены допускает постепенное увеличение степени автономности РТК без коренной перестройки всей архитектуры программного обеспечения бортового вычислительно-управляющего комплекса. Эта схема хорошо продолжает подход, предложенный в монографии [39]. Можно провести параллели в используемых понятиях. Концептуализация предметной области – построение онтологий, типовая ситуация – прецедент и реализующие его сценарии, формирование бортовой оперативно-советующей экспертной системы для типовой ситуации – формирование сигнатур объектов интереса и условий наблюдения в соответствии с решаемой задачей и подготовленными сценариями. В основе программной реализации предлагаемых механизмов используется унифицированный подход на основе программного каркаса СТЗ реального времени [31].

С использованием описанных технологий в нашем секторе был разработан макетный образец программно-аппаратного комплекса для информационного обеспечения целенаправленных перемещений РТК с ПСА. Макетный образец позволил реализовать ряд экспериментов. В частности, было опробовано решение задачи определения траектории движения РТК при движении по смешанной: урбанистической и естественной среде в супервизорном режиме. По маршруту следования подвижного РТК оператор по мере запросов от РТК в полях зрения видеокамер, которыми оснащена бортовая СТЗ, указывал объекты, которые могут быть использованы в качестве ориентиров при решении навигационной задачи (эти данные являются независимым информационным каналом, дополняющим визуальную одометрию, показания инерциальной и спутниковой навигационных

систем). Бортовая информационно-управляющая система проверяет надежность выделения указанных объектов и, в случае положительного результата использует эти объекты в качестве ориентиров, следя за ними и определяя положение РТК относительно них. Когда указанные ориентиры приближаются к выходу из полей зрения, БИУС запрашивает оператора об указании новых ориентиров. Как показали эксперименты, для надежного определения (с точностью до десятка сантиметров) положения РТК, оснащённого одной вперёдсмотрящей стереосистемой и двигающегося со скоростью 10 м/с, без использования других навигационных средств, требуется в среднем не менее 6 ориентиров на 100 метров пути. На 600 метровой замкнутой траектории рассогласование координат, определённых по показаниям высокоточного интегрированного (с БИНС) GPS приёмника и определённых по показаниям визуального одометра, скорректированным данными по определению положения РТК относительно ориентиров, оставалось в пределах 1 м. Кроме этого, проводились эксперименты по детектированию заданных классов препятствий по ходу движения РТК. Препятствия описывались сигнатурами, содержащими, как характеристики образов этих объектов, так и указание на то, какие параметры препятствия следует определить осмотром или переключением на другое поле зрения, чтобы принять решение о преодолении или объезде. В существующей реализации эти действия выполнялись в старт-стопном режиме с привлечением оператора. В целом, описанная схема и выбранные технологии анализа сцены, показали свою успешную работоспособность с возможностью наращивания степени автономности.

Заключение. Как показал проведённый анализ доступных публикаций и известного опыта разработок, несмотря на тот факт, что взаимодействие с окружающей средой имеет первостепенное значение для большинства приложений робототехники современные системы, реализующие подходы SLAM не способны обеспечить понимание на высоком уровне геометрии и семантики окружающего мира. Разработка таких представлений должна быть ориентирована на задачи и в настоящее время это гибкая структура, позволяющая связать задачу с оптимальными представлениями отсутствует. Совершенствование технологий анализа сцены, как и повышение степени автономности РТК требуют объединённых усилий как робототехников-практиков, так и специалистов по компьютерному зрению и исследователей средств искусственного интеллекта.

В ближайшей перспективе, на пути повышения степени автономности РТК перед бортовой СТЗ стоят такие задачи как: определение общих условий движения РТК; автоматический поиск/выделение ориентиров в окружающем пространстве. При этом предполагается использование алгоритмов различной природы: традиционных (с пошаговым объяснением типа обработки и её результатов), нейросетевые. Кроме того, в развитие технологии сигнатур, эти структуры и механизмы работы с ними предлагается дополнить понятиями нечёткой логики и средствами мягких вычислений, что позволит получать информацию/принимать решения в ситуациях не полностью определённых и неоднозначных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Minsky M., Papert S.* Perceptrons. – Cambridge, Mass.: MIT Press, 1969.
2. *Дуда П., Харт П.* Распознавание образов и анализ сцен. – М.: Мир, 1976.
3. *Liang-Chieh Chen, Yukun Zhu, Papandreou G., Schroff Florian, Hartwig Adam.* Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation, ECCV, 2018, Corpus ID: 3638670.
4. *Salas-Moreno R., Newcombe R., Strasdat H., Kelly P., and Davison A.* SLAM++: Simultaneous Localisation and Mapping at the Level of Objects // In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – IEEE, 2013. – P. 1352-1359.
5. *Newcombe R.A., Lovegrove S.J., and Davison A.J.* DTAM: Dense Tracking and Mapping in Real-Time // In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – IEEE, 2011. – P. 2320-2327.

6. Bao S.Y., Bagra M., Chao Y.W., and Savarese S. Semantic structure from motion with points, regions, and objects // In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – IEEE, 2012. – P. 2703-2710.
7. Соколов С.М. Сравнительный анализ степени автономности робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 1 (231). – С. 65-76. – <http://izv-tn.tti.sfedu.ru>.
8. Nüchter A. and Hertzberg J. Towards semantic maps for mobile robots // Robotics and Autonomous Systems. – 2008. – Vol. 56, No. 11. – P. 915-926.
9. Galindo C., Gonzalez J., Fernandez-Madriral J.A. Interactive In-Vehicle Guidance through a Multihierarchical Representation of Urban Maps // International journal of intelligent systems. – Vol. 25. – P. 597-620.
10. Ruijiao Li, Lai Wei, Dongbing Gu, Huosheng Hu, Klaus D. McDonald-Maier Multi-layered Map based Navigation and Interaction for an Intelligent Wheelchair // Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) Shenzhen, China, December 2013. – P. 115-120.
11. Galindo C., Saffiotti A., Coradeschi S., Buschka P., Fernandez-Madriral J., and Gonzalez J. Multi-hierarchical semantic maps for mobile robotics // in Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Edmonton, CA, 2005. – P. 3492-3497. – Online at <http://www.aass.oru.se/asaffio/>.
12. Martinez Mozos O. and Burgard W. Supervised learning of topological maps using semantic information extracted from range data // In Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Beijing, China, 2006. – P. 2772-2777.
13. Goerke N. and Braun S. Building semantic annotated maps by mobile robots, in Proceedings of the Conference Towards Autonomous Robotic Systems, Londonderry, UK, 2009.
14. Brunskill E., Kollar T., and Roy N. Topological mapping using spectral clustering and classification // in Proc. of IEEE/RSJ Conference on Robots and Systems (IROS). – 2007.
15. Friedman S., Pasula H., and Fox D. Voronoi random fields: Extracting the topological structure of indoor environments via place labeling // in Proc. of 19th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). – 2007.
16. Mozos O.M., Mizutani H., Kurazume R., and Hasegawa T. Categorization of indoor places using the kinect sensor // Sensors. – 2012. – Vol. 12, No. 5. – P. 6695-6711.
17. Diosi A., Taylor G., and Kleeman L. Interactive slam using laser and advanced sonar // in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, 2005. – P. 1103-1108. Gard, “Conceptual spatial representations for indoor mobile robots,” Robotics and Autonomous Systems. – 2008. – Vol. 56, No. 6. – P. 493-502.
18. Zender H., Martinez Mozos O., Jensfelt P., Kruijff G., and Bur-Annual W. Conference on Human-Robot Interaction (HRI'06), Salt Lake.
19. Pronobi A. s and Jensfelt P. Multi-modal semantic mapping, in The RSS'11 Workshop on Grounding Human-Robot Dialog for Spatial Tasks, Los Angeles, CA, USA, July 2011. [Online]. Available: <http://www.pronobis.pro/publications/pronobis2011rss-ghrdst>.
20. Nieto-Granda C., III J.G.R., Trevor A.J.B., and Christensen H.I. Semantic map partitioning in indoor environments using regional analysis // in 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 18-22, 2010, Taipei, Taiwan. IEEE, 2010. – P. 1451-1456.
21. Sabrina Wilske & Geert-Jan Kruijff Service Robots dealing with indirect speech acts. Language Technology Lab German Research Center for Artificial Intelligence (DFKI) Saarbrücken, Germany.
22. Randell D., Cui Z., Cohn A. A spatial logic based on regions and connection // In: Proceedings of the 3rd. International Conference on Knowledge Representation and Reasoning, San Mateo, Morgan Kaufmann, 1992. – P. 165-176;
23. Cadena C., Carlone L., Carrillo H., Latif Y., Scaramuzza D., Neira J. and Reid I., Leonard J.J. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization And Mapping: Towards the Robust-Perception Age // in IEEE Transactions on Robotics. – 32 (6). – P. 1309-1332.
24. Everingham M., Van-Gool L., Williams C.K.I., Winn J., and Zisserman A. The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge // International Journal of Computer Vision. – 2010. – 88 (2). – P. 303-338.
25. Newcombe R.A., Lovegrove S.J., and Davison A.J. DTAM: Dense Tracking and Mapping in Real-Time // In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – IEEE, 2011. – P. 2320-2327.

26. *Flint A., Murray D., and Reid I.D.* Manhattan Scene Understanding Using Monocular, Stereo, and 3D Features // In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – IEEE, 2011. – P. 2228-2235.
27. *Bao S.Y., Bagra M., Chao Y.W., and Savarese S.* Semantic structure from motion with points, regions, and objects // In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vis.
28. *Krishnan R.G., Shalit U., and Sontag D.* Deep Kalman Filters // In NIPS 2016 Workshop: Advances in Approximate Bayesian Inference. – NIPS, 2016. – P. 1-7.
29. *Michael Wray, Diane Larlus, Gabriela Csurka, Dima Damen.* Fine-Grained Action Retrieval Through Multiple Parts-of-Speech Embeddings // ICCV 2019 paper is the Open Access version, provided by the Computer Vision Foundation, is available on IEEE Xplore. – https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2019/papers/Wray_Fine-Grained_Action_Retrieval_Through_Multiple_Parts-of-Speech_Embeddings_ICCV_2019_paper.pdf.
30. *Богуславский А.А., Боровин Г.К., Карташев В.А., Павловский В.Е., Соколов С.М.* Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2019. – 228 с.
31. *Соколов С.М., Богуславский А.А., Беклемишев Н.Д.* Программное обеспечение систем технического зрения реального времени для систем управления робототехническими комплексами // Матер. XIII Международной научно-технической конференции «Завалишинские чтения – 2018». – СПб.: ГУАП, 16-20 апреля 2018 г. – С. 205-211.
32. *Соколов С.М., Богуславский А.А., Беклемишев Н.Д.* Реализация интерпретирующей навигации с помощью модулей СТЗ // Матер. 30-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника», 13-15 июня 2019, Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. – С. 264-267.
33. *Thrun S. and Bucken A.* Integrating grid-based and topological maps for mobile robot navigation // In Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence. – 1996. – No. 8.
34. *Mozos O. and Burgard W.* Supervised Learning of Topological Maps using Semantic Information Extracted from Range Data // 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, – Oct. 2006. – P. 2772-2777.
35. *Pronobis A. and Jensfelt P.* Understanding the real world: Combining objects, appearance, geometry and topology for semantic mapping. Royal Institute of Technology (KTH) SE-100, Tech. Rep., 2011.
36. *Dansereau D.G., Williams S.B., and Corke P.* Simple Change Detection from Mobile Light Field Cameras. Computer Vision and Image Understanding. – 2016.
37. *Davison A., I. Reid, N. Molton, and O. Stasse.* MonoSLAM: RealTime Single Camera SLAM // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI). – 2007. – 29 (6). – P. 1052-1067.
38. *Соколов С.М.* Онтологический подход в создании робототехнических комплексов с повышенной степенью автономности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1. – С. 42-59.
39. *Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунев Е.Е.* Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физико-математическая литература, 2000. – 352 с.

REFERENCES

1. *Minsky M., Papert S.* Perceptrons. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1969.
2. *Duda R., Khart P.* Raspoznavanie obrazov i analiz stsen [Pattern recognition and scene analysis]. Moscow: Mir, 1976.
3. *Liang-Chieh Chen, Yukun Zhu, Papandreou G., Schroff Florian, Hartwig Adam.* Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation, ECCV, 2018, Corpus ID: 3638670.
4. *Salas-Moreno R., Newcombe R., Strasdat H., Kelly P., and Davison A.* SLAM++: Simultaneous Localisation and Mapping at the Level of Objects, In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2013, pp. 1352-1359.
5. *Newcombe R.A., Lovegrove S.J., and Davison A.J.* DTAM: Dense Tracking and Mapping in Real-Time, In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE, 2011, pp. 2320-2327.
6. *Bao S.Y., Bagra M., Chao Y.W., and Savarese S.* Semantic structure from motion with points, regions, and objects, In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2012, pp. 2703-2710.

7. Sokolov S.M. Sravnitel'nyy analiz stepeni avtonomnosti robototekhnicheskikh kompleksov [Comparative analysis of the degree of autonomy of robotic complexes], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 1 (231), pp. 65-76. Available at: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru>.
8. Nüchter A. and Hertzberg J. Towards semantic maps for mobile robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, Vol. 56, No. 11, pp. 915-926.
9. Galindo C., Gonzalez J., Fernandez-Madriral J.A. Interactive In-Vehicle Guidance through a Multihierarchical Representation of Urban Maps, *International journal of intelligent systems*, Vol. 25, pp. 597-620.
10. Ruijiao Li, Lai Wei, Dongbing Gu, Huosheng Hu, Klaus D. McDonald-Maier Multi-layered Map based Navigation and Interaction for an Intelligent Wheelchair, *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) Shenzhen, China, December 2013*, pp. 115-120.
11. Galindo C., Saffiotti A., Coradeschi S., Buschka P., Fernandez-Madriral J., and Gonzalez J. Multi-hierarchical semantic maps for mobile robotics, in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Edmonton, CA, 2005*, pp. 3492-3497. Online at <http://www.aass.oru.se/asaffio/>.
12. Martinez Mozos O. and Burgard W. Supervised learning of topological maps using semantic information extracted from range data, in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Beijing, China, 2006*, pp. 2772-2777.
13. Goerke N. and Braun S. Building semantic annotated maps by mobile robots, in *Proceedings of the Conference Towards Autonomous Robotic Systems, Londonderry, UK, 2009*.
14. Brunskill E., Kollar T., and Roy N. Topological mapping using spectral clustering and classification, in *Proc. of IEEE/RSJ Conference on Robots and Systems (IROS), 2007*.
15. Friedman S., Pasula H., and Fox D. Voronoi random fields: Extracting the topological structure of indoor environments via place labeling, in *Proc. of 19th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), 2007*.
16. Mozos O.M., Mizutani H., Kurazume R., and Hasegawa T. Categorization of indoor places using the kinect sensor, *Sensors*, 2012, Vol. 12, No. 5, pp. 6695-6711.
17. Diosi A., Taylor G., and Kleeman L. Interactive slam using laser and advanced sonar, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, 2005*, pp. 1103-1108. Gard, Conceptual spatial representations for indoor mobile robots // *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, Vol. 56, No. 6, pp. 493-502.
18. Zender H., Martinez Mozos O., Jensfelt P., Kruijff G., and Burdick W. Conference on Human-Robot Interaction (HRI'06), Salt Lake.
19. Pronobis A. and Jensfelt P. Multi-modal semantic mapping, in *The RSS'11 Workshop on Grounding Human-Robot Dialog for Spatial Tasks, Los Angeles, CA, USA, July 2011*. [Online]. Available: <http://www.pronobis.pro/publications/pronobis2011rss-ghrdst>.
20. Nieto-Granda C., III J.G.R., Trevor A.J.B., and Christensen H.I. Semantic map partitioning in indoor environments using regional analysis, in *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 18-22, 2010, Taipei, Taiwan. IEEE, 2010*, pp. 1451-1456.
21. Sabrina Wilske & Geert-Jan Kruijff Service Robots dealing with indirect speech acts. Language Technology Lab German Research Center for Artificial Intelligence (DFKI) Saarbrücken, Germany.
22. Randell D., Cui Z., Cohn A. A spatial logic based on regions and connection, in: *Proceedings of the 3rd. International Conference on Knowledge Representation and Reasoning, San Mateo, Morgan Kaufmann, 1992*, pp. 165-176;
23. Cadena C., Carlone L., Carrillo H., Latif Y., Scaramuzza D., Neira J. and Reid I., Leonard J.J. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization And Mapping: Towards the Robust-Perception Age, in *IEEE Transactions on Robotics*, 32 (6), pp. 1309-1332.
24. Everingham M., Van-Gool L., Williams C K.I., Winn J., and Zisserman A. The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge, *International Journal of Computer Vision*, 2010, 88 (2), pp. 303-338.
25. Newcombe R.A., Lovegrove S.J., and Davison A.J. DTAM: Dense Tracking and Mapping in Real-Time, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE, 2011*, pp. 2320-2327.

26. Flint A., Murray D., and Reid I.D. Manhattan Scene Understanding Using Monocular, Stereo, and 3D Features, *In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. IEEE, 2011, pp. 2228-2235.
27. Bao S.Y., Bagra M., Chao Y.W., and Savarese S. Semantic structure from motion with points, regions, and objects, *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vis.*
28. Krishnan R.G., Shalit U., and Sontag D. Deep Kalman Filters, *In NIPS 2016 Workshop: Advances in Approximate Bayesian Inference*. NIPS, 2016, pp. 1-7.
29. Michael Wray, Diane Larlus, Gabriela Csurka, Dima Damen. Fine-Grained Action Retrieval Through Multiple Parts-of-Speech Embeddings, *ICCV 2019 paper is the Open Access version, provided by the Computer Vision Foundation, is available on IEEE Xplore*. Available at: https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2019/papers/Wray_Fine-Grained_Action_Retrieval_Through_Multiple_Parts-of-Speech_Embeddings_ICCV_2019_paper.pdf.
30. Boguslavskiy A.A., Borovin G.K., Kartashev V.A., Pavlovskiy V.E., Sokolov S.M. Modeli i algoritmy dlya intellektual'nykh sistem upravleniya [Models and algorithms for intelligent control systems]. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha, 2019, 228 p.
31. Sokolov S.M., Boguslavskiy A.A., Beklemishev N.D. Programmnoe obespechenie sistem tekhnicheskogo zreniya real'nogo vremeni dlya sistem upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami [Software for real-time vision systems for control systems of robotic complexes], *Mater. XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Zavalishinskie chteniya – 2018»* [Materials of the XIII International Scientific and Technical Conference "Zavalishinsky Readings – 2018"]. St. Petersburg: GUAP, 16-20 aprelya 2018 g., pp. 205-211.
32. Sokolov S.M., Boguslavskiy A.A., Beklemishev N.D. Realizatsiya interpretiruyushchey navigatsii s pomoshch'yu moduley STZ [Implementation of interpretive navigation using STZ modules], *Mater. 30-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Ekstremal'naya robototekhnika», 13-15 iyunya 2019, Sankt-Peterburg: TSNII RTK* [Proceedings of the 30th International Scientific and Technical Conference "Extreme Robotics", June 13-15, 2019, St. Petersburg: Central Research Institute of RTK], pp. 264-267.
33. Thrun S. and Bucken A. Integrating grid-based and topological maps for mobile robot navigation, *In Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, 1996, No. 8.
34. Mozos O. and Burgard W. Supervised Learning of Topological Maps using Semantic Information Extracted from Range Data, *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct. 2006, pp. 2772-2777.
35. Pronobis A. and Jensfelt P. Understanding the real world: Combining objects, appearance, geometry and topology for semantic mapping. Royal Institute of Technology (KTH) SE-100, Tech. Rep., 2011.
36. Dansereau D.G., Williams S.B., and Corke P. Simple Change Detection from Mobile Light Field Cameras. *Computer Vision and Image Understanding*, 2016.
37. Davison A., I. Reid, N. Molton, and O. Stasse. MonoSLAM: RealTime Single Camera SLAM, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, 2007, 29 (6), pp. 1052-1067.
38. Sokolov S.M. Ontologicheskii podkhod v sozdanii robototekhnicheskikh kompleksov s povyshennoy stepen'yu avtonomnosti [An ontological approach to the creation of robotic complexes with an increased degree of autonomy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1, pp. 42-59.
39. Vasil'ev S.N., Zherlov A.K., Fedosov E.A., Fedunov E.E. Ingellektnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami [Intelligent control of dynamic systems]. Moscow: Fiziko-matematicheskaya literatura, 2000, 352 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. М.Ю. Медведев.

Соколов Сергей Михайлович – Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН; e-mail: sokolsm@keldysh.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84992207994; д.ф.-м.н.; профессор; г.н.с.; зав. сектором.

Sokolov Sergey Mikhailovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS; e-mail: sokolsm@keldysh.ru; Moscow, Russia; phone: +74992207994; dr. of math. and physics. sc.; professor; chief researcher; chief division.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Объем статьи должен быть не менее 12 и не более 18 страниц. Формат (А 4). Редактор **Word 7 for Windows**, шрифт Times New Roman, размер 14, интервал 1,5. Авторы представляют в редакцию 1 экз. статьи и идентичный электронный вариант.

2. Названию статьи предшествует индекс УДК, соответствующий заявленной теме.

3. Текст статьи начинается с названия статьи (на русском и английском языках), фамилии, имени и отчества автора (полностью) и снабжается аннотацией на русском и английском языках объемом **не менее 250-300 слов**. В тексте аннотации указывается цель, задачи исследования и краткие выводы. В аннотации **не следует** давать ссылку на номер публикации в списке литературы к статье. После аннотаций приводятся ключевые слова (словосочетания), несущие в тексте основную смысловую нагрузку (на русском и английском языках).

4. В тексте статьи следует использовать минимальное количество таблиц и иллюстраций. Рисунок должен иметь объяснения значений всех компонентов, порядковый номер, название, расположенное под рисунком. В тексте на рисунок дается ссылка. Таблица должна иметь порядковый номер, заголовок, расположенный над ней. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст. Формулы должны быть набраны **в редакторе формул Word 7 for Windows**.

5. Цитаты тщательно сверяются с первоисточником и визируются автором на обратной стороне последней страницы: "Цитаты и фактический материал сверены". Подпись, дата.

6. Наличие пристатейного библиографического списка на русском и английском языках обязательно. **Ссылок должно быть не менее 20-ти**, из них на зарубежные источники – не менее 35 %. В тексте ссылки должны быть в квадратных скобках.

Примеры оформления литературы: а) для книг: фамилия, инициалы автора(ов), полное название книги, место, год издания, страницы; б) для статей: фамилия и инициалы автора(ов), полное название сборника, книги, газеты, журнала, где опубликована статья, место и год издания (сборника, книги), номер (для журнала), год и дата (для газеты), выпуск, часть (для сборника), страницы, на которых опубликована статья. Иностранная литература оформляется по тем же правилам.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Рукопись должна быть тщательно вычитана. Редакционная коллегия оставляет за собой право при необходимости сокращать статьи, редактировать и отсылать авторам на доработку.

8. Статьи сопровождаются сведениями об авторе(ах) (фамилия, имя, отчество, ученое звание, должность, место работы, адрес, электронный адрес и номер телефона) на русском и английском языках.

9. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Адрес журнала в Интернете: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/>.