

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.

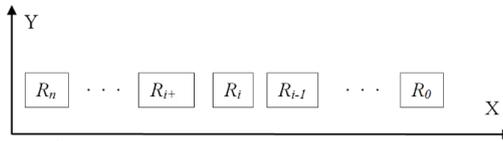


Рис. 1. Схема движения роя мобильных роботов в колонне

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 .

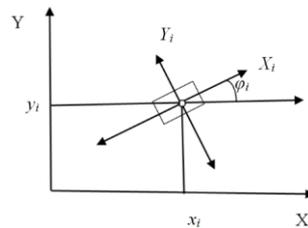


Рис. 2. Координаты мобильного робота

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].

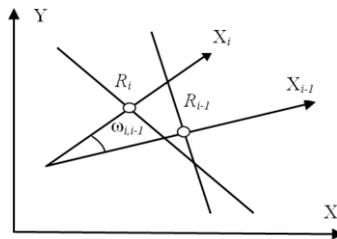


Рис. 3. Схема расположения двух соседних роботов в абсолютной системе координат OXY

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 передвижением 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 $\mathbf{V}_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ – 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 $\mathbf{V}_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ сопоставляется автоматы адаптации АА – $a^{x_i}, a^{y_i}, a^{V_i}$, 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.

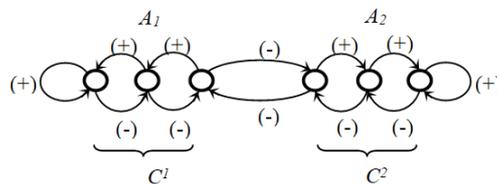


Рис. 4. Структура автомата адаптации

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 изменениям 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.

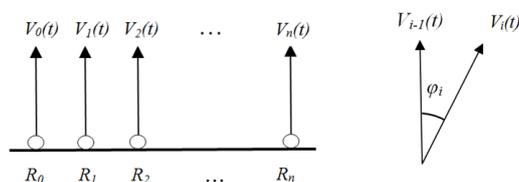


Рис. 5. Схема движения роя мобильных роботов развернутых в линию

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.

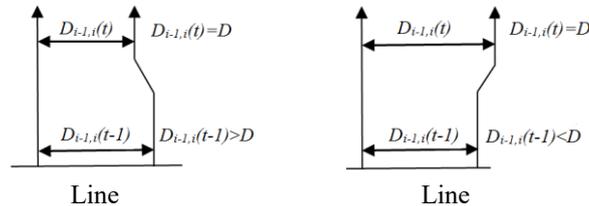


Рис. 6. Схема маневра, выполняемого роботом для коррекции параметра $x_i(t)$

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).

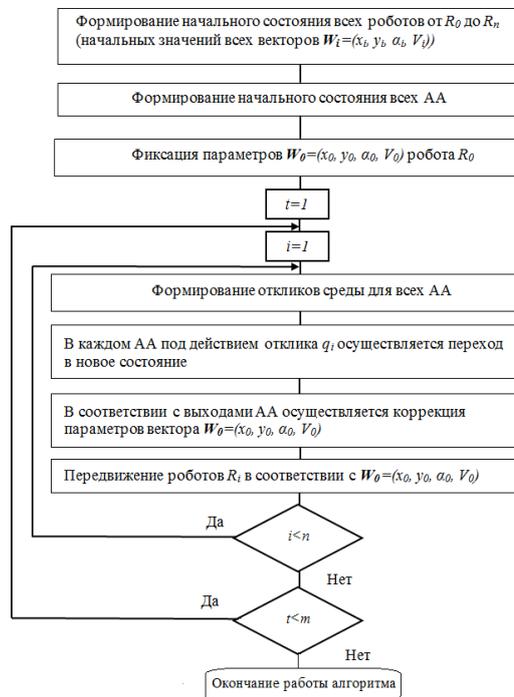


Рис. 7. Структура алгоритма управления движением коллектива роботов, развернутых в линию

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 MGU 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 pchel'nogo 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.