

14. Rumiantsev B., Dzhatdoeva S., Zotov V., Kochkarov A. Analysis of the Potato Vegetation Stages Based on the Dynamics of Water Consumption in the Closed Urban Vertical Farm with Automated Microclimate Control, *Agronomy*, 2023, 13, 954. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy13040954>.
15. Rumiantsev B.V., Kochkarov R.A., Kochkarov A.A. Graph-Clustering Method for Construction of the Optimal Movement Trajectory under the Terrain Patrolling, *Mathematics*, 2023, 11, 223. Available at: <https://doi.org/10.3390/math11010223>.
16. Kochkarov A.A., Kulikov A.K., Rummyantsev B.V. Opyt primeneniya i perspektivy ispol'zovaniya iskusstvennogo intellekta v oblasti agrobiotekhnologii [Experience of using state intelligence in industry. Microbiological], *Gorizonty matematicheskogo modelirovaniya i teoriya samoorganizatsii. K 95-letiyu so dnya rozhdeniya S.P. Kurdyumova* [Horizons of mathematical modeling and theory of self-organization. On the 95th anniversary of S.P. Kurdyumov's birth]. Moscow: IPM im. M.V. Keldysha, 2024, pp. 144-153. Available at: <https://doi.org/10.20948/k95-8>.
17. Altieri M. *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. CRC Press, Endereço. 2nd ed. February 2018.
18. Sharada P. Mohanty, David P. Hughes, and Marcel Salathé. Using deep learning for image-based plant disease detection, *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7:1419.
19. Sally A. Miller, Fen D. Beed, and Carrie Lapaire Harmon. Plant Disease Diagnostic Capabilities and Networks, *Annual Review of Phytopathology*, Sep 2009, 47 (1), pp. 15-38.
20. Anne-Katrin Mahlein. Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping, *Plant Disease*, 2016, 100 (2), pp. 241-251.

Кочкаров Азрет Ахматович – ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН; e-mail: akochkar@fbras.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74956603430 (доб. 499); зам. директора по инновационной работе; к.ф.-м.н.; д.т.н.; профессор.

Куликов Андрей Кириллович – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: kulikov_a@mirea.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74996008080; к.т.н.; доцент.

Ольхова Варвара Алексеевна – Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; e-mail: 237561@edu.fa.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89267888554; студент.

Стахмич Александр Сергеевич – Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; e-mail: 220807@edu.fa.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89853006560; студент.

Рыбак Артем Николаевич – Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; e-mail: 223415@edu.fa.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89104834217; студент.

Kochkarov Azret Akhmatovich – Federal Research Center for Fundamental Principles of Biotechnology of the RAS; e-mail: akochkar@fbras.ru; Moscow, Russia; phone: +74956603430 (ext. 499); deputy director for Innovation; cand. of phys. and math. sc.; dr. of eng. sc.; professor.

Kulikov Andrey Kirillovich – MIREA – Russian Technological University; e-mail: kulikov_a@mirea.ru; Moscow, Russia; phone: +74996008080; cand. of eng. sc.; associate professor.

Olkhova Varvara Alekseevna – Financial University under the Government of the Russian Federation; e-mail: 237561@edu.fa.ru; Moscow, Russia; phone: +79267888554; student.

Stakhmich Aleksander Sergeevich – Financial University under the Government of the Russian Federation; e-mail: 220807@edu.fa.ru; Moscow, Russia; phone: +79853006560; student.

Rybak Artem Nikolaevich – Financial University under the Government of the Russian Federation; e-mail: 223415@edu.fa.ru; Moscow, Russia; phone: +79104834217; student.

УДК 007.52+004.896: 656.052.48: 519.876.5

DOI 10.18522/2311-3103-2025-2-68-82

М.И. Бесхмельнов, Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ КОНФИГУРАЦИИ МАРШРУТА НА КАРТЕ МЕСТНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Описывается гибридный алгоритм ситуационного планирования траектории в условиях частичной неопределенности для двумерного пространства, основанный на интеграции волнового и муравьиного алгоритмов, позволяющий строить в реальном масштабе времени траектории минимальной длины с одновременной оптимизацией ряда других критериев качества построенно-

го пути. Процессы формирования участка траектории и перемещения по нему объекта чередуются на каждом шаге. Формирование траектории осуществляется последовательно (пошагово) на двух уровнях каждого шага. Формирование и ориентация локальной зоны видимости и покрываемого ею региона на карте местности выполняется относительно текущего опорного вектора. Процедурами первого уровня на карте местности последовательно по шагам формируется цепочка попарно смежных регионов с локализованными препятствиями. Процедурами второго уровня на шаге формируется множество траекторий прохода подвижного объекта через регион. При слиянии цепочки регионов образуется область местности, через которую прокладывается траектория. Вся траектория является совокупностью отдельных траекторий прохода подвижного объекта через регионы, связывающих его исходную позицию с целевой позицией. Поиск решения осуществляется популяцией агентов на графе поиска решений. Вершины множества соответствуют ячейкам области. Две вершины связаны ребром, если соответствующие им ячейки на модели местности в виде дискретного рабочего поля смежны и возможен переход соединения из одной ячейки в другую. Синтез траектории и передвижение подвижного объекта в условиях неопределенности – это сложная задача, требующая интеграции различных сенсорных систем, алгоритмов обработки данных, алгоритмов планирования пути и систем управления движением. Постоянное развитие технологий в областях искусственного интеллекта, машинного зрения и робототехники позволяет создавать всё более совершенные системы автономной навигации. Однако, полная автономность и гарантированная безопасность подвижного объекта в любых условиях пока остаются сложными задачами для исследования.

Траектория; алгоритм; ситуационное планирование; частичная неопределенность; локальная зона видимости; подвижный объект.

M.I. Beskhamelnov, B.K. Lebedev, O.B. Lebedev

HYBRID METHOD OF ROUTE CONFIGURATION PLANNING ON A TERRAIN MAP UNDER CONDITIONS OF PARTIAL UNCERTAINTY

The paper describes a hybrid algorithm for situational trajectory planning under partial uncertainty for a two-dimensional space based on the integration of the wave and ant algorithms, which allows constructing trajectories of minimum length in real time with simultaneous optimization of a number of other quality criteria for the constructed path. The processes of forming a trajectory section and moving an object along it alternate at each step. The trajectory is formed sequentially (step by step) at two levels of each step. The local visibility zone and the region covered by it on the terrain map are formed and oriented relative to the current reference vector. The first-level procedures sequentially form a chain of pairwise adjacent regions with localized obstacles on the terrain map in steps. The second-level procedures form a set of trajectories for the passage of a moving object through a region at a step. When the chain of regions merges, a terrain region is formed through which the trajectory is laid. The entire trajectory is a set of individual trajectories for the passage of a moving object through regions connecting its initial position with the target position. The search for a solution is carried out by a population of agents on a solution search graph. The vertices of the set correspond to the cells of the region. Two vertices are connected by an edge if the corresponding cells on the terrain model in the form of a discrete working field are adjacent and the transition of the connection from one cell to another is possible. It should be noted that the synthesis of the trajectory and the movement of a moving object under uncertainty is a complex task that requires the integration of various sensor systems, data processing algorithms, path planning algorithms and motion control systems. The constant development of technologies in the fields of artificial intelligence, machine vision and robotics allows the creation of increasingly sophisticated autonomous navigation systems. However, complete autonomy and guaranteed safety of a moving object under any conditions still remain complex tasks for research.

Trajectory; algorithm; situational planning; partial uncertainty; local visibility zone; moving object.

Введение. Задача проектирования траекторий (трасс) имеют достаточно широкое применение [1, 2]. Это проектирование соединений интегральных схем, автомобильных дорог, коммуникационных сетей, различного рода траекторий. К настоящему времени разработано достаточно большое количество алгоритмов для решения задач построения траекторий в различных постановках, с учетом различного рода ограничений [3]. Траектории формируются (прокладываются) на некоторой карте местности последовательно, часто в условиях неполной определенности от начальной точки к целевой точке [5]. Цель работы заключается в разработке нового гибридного метода планирования траекторий. Процесс формирования траектории в условиях частичной неопределенности осуществля-

ется последовательно (пошагово) на двух уровнях каждого шага. Процедурами первого уровня на карте местности последовательно по шагам формируется цепочка попарно смежных регионов с локализованными препятствиями. При слиянии цепочки регионов образуется область местности, через которую прокладывается траектория.

В результате проведенных исследований было установлено, что эффективность решения во многом во многом определяется как возможностями технических средств (радаров, лидаров), позволяющих оценить текущую ситуацию, а с другой стороны методикой и методами построения траектории [3–5]. В работе рассматривается модернизированная методика пошагового проектирования траектории с использованием адаптивного опорного вектора, задающего предпочтительное направление перемещения ПО и подходы к формированию, соотношению размеров, взаимного расположения и ориентации на местности локальной зоны видимости и регионов. Кроме того, в работе предлагаются новые методика и методы проектирования траектории с учетом упомянутых факторов.

Планирование конфигурации маршрута на карте местности. Процессы синтеза траектории и передвижения по ней подвижного объекта (ПО) представляют собой сложную взаимосвязанную задачу, особенно в условиях неопределенности окружающей среды [5, 6]. Перемещение происходит практически синхронно с формированием траектории, что обусловлено динамической природой препятствий на местности. В отличие от статических картографических данных, где препятствия имеют четко определённые границы, в реальном времени ПО сталкивается с неопределённостью, вызванной отсутствием априорной информации о форме, размерах, скорости и траектории движения препятствий [3, 6, 7]. Это может быть связано с движущимися объектами (другие транспортные средства, пешеходы), изменяющимися погодными условиями (снег, дождь, туман, снижающие видимость), или неожиданно возникающими препятствиями (например, обрушение конструкций) [3, 7].

Общая структура процесса формирования маршрута и перемещения ПО включает несколько итеративных этапов, подробное описание которых представлено ниже.

1. Формирование модели карты местности. Этот этап включает в себя не только создание статической карты (например, на основе спутниковых снимков или предварительно собранных данных), но и динамическое обновление этой модели в режиме реального времени. Это достигается с помощью различных сенсорных систем, таких как GPS, IMU (инерциальная измерительная единица), лидар (лазерный дальномер), радар и камеры. Информация от этих датчиков обрабатывается и интегрируется, чтобы создать точную и актуальную модель окружающей среды. Важно отметить, что точность модели напрямую влияет на качество планирования траектории и безопасность движения ПО. Современные системы используют методы фильтрации Калмана или подобные для сглаживания данных и снижения влияния шумов. Кроме того, модель карты может быть представлена в различных форматах, например, в виде сетки (grid map), графа (graph map) или облака точек (point cloud). Выбор формата зависит от специфики задачи и возможностей системы [1–3, 7].

2. Фиксация исходной и целевой позиций. После создания модели карты местности необходимо определить начальную и конечную точки траектории. Это может быть задано пользователем или определено автоматически, например, на основе данных о задании миссии ПО. Точность фиксации позиций крайне важна для успешного построения маршрута [8, 9].

3. Генерация локальной зоны видимости (ЛЗВ). ЛЗВ представляет собой область вокруг ПО, в пределах которой его сенсорная система способна обнаруживать препятствия. Размер и форма ЛЗВ зависят от характеристик датчиков (дальность действия, угол обзора) и технических возможностей ПО. Генерация ЛЗВ – это динамический процесс, он изменяется в зависимости от положения ПО и ориентации его сенсоров. Важно отметить, что ЛЗВ не является идеальной, она может содержать погрешности из-за шумов в данных датчиков или ограничения их функциональности (например, слепые зоны) [8, 9].

4. Анализ ЛЗВ и локализация препятствий. На этом этапе происходит обработка данных от сенсорной системы (лидар, радар, камеры) для обнаружения и локализации препятствий в пределах ЛЗВ. Это сложная задача, требующая применения алгоритмов

обработки изображений и сигналов для фильтрации шумов, разделения объектов и определения их геометрических параметров. Современные системы используют методы глубокого обучения для повышения точности и скорости обнаружения препятствий. Выявленные препятствия добавляются в модель карты местности, уточняя информацию о доступном пространстве [9, 10].

5. Формирование конфигурации региона и выбор границ. Область, покрываемая ЛЗВ с выявленными препятствиями, рассматривается как отдельный регион. Для успешного планирования траектории важно определить границы входа и выхода из этого региона, учитывая расположение препятствий и доступные пути обхода [1, 3, 9, 10].

6. Фиксация входной позиции. Входная позиция первого региона совпадает с исходной позицией ЛЗВ. В последующих регионах входная позиция будет определяться выходной позицией предыдущего региона [8–10].

7. Генерация набора маршрутов (Q). На этом этапе применяется алгоритм поиска пути для генерации множества потенциальных маршрутов, соединяющих входную и выходную позиции региона. Для этого могут использоваться различные алгоритмы, такие как A^* , $Dijkstra$, RRT^* и другие. Выбор алгоритма зависит от сложности ландшафта и требований к скорости и точности планирования. Каждый маршрут оценивается по различным критериям, таким как длина, время прохождения и безопасность [1, 3, 9, 10].

8. Выбор оптимального маршрута. Из множества сгенерированных маршрутов (Q) выбирается оптимальный маршрут, удовлетворяющий заданным критериям. Критерии могут включать в себя минимальную длину пути, минимальное время прохождения, максимальное расстояние до препятствий и другие. Выбор оптимального маршрута часто выполняется с использованием методов многокритериальной оптимизации [9–11].

9. Перемещение ПО. После выбора маршрута ПО начинает движение по нему. Этот процесс сопровождается непрерывным мониторингом окружающей среды с помощью сенсорной системы и динамической корректировкой траектории в случае обнаружения новых препятствий или изменения ситуации. Эта корректировка может осуществляться путём перепланирования маршрута или локального управления движением ПО с использованием методов локальной навигации и уклонения от препятствий [1, 9–12].

Следует отметить, что синтез траектории и передвижение ПО в условиях неопределенности – это сложная задача, требующая интеграции различных сенсорных систем, алгоритмов обработки данных, алгоритмов планирования пути и систем управления движением. Постоянное развитие технологий в областях искусственного интеллекта, машинного зрения и робототехники позволяет создавать всё более совершенные системы автономной навигации. Однако, полная автономность и гарантированная безопасность ПО в любых условиях пока остаются сложными задачами для исследования [13].

Процессы формирования участка траектории и перемещения по нему объекта чередуются на каждом шаге. На рецепторной модели карты местности фиксируются две позиции: p_u – исходная позиция, p_c – целевая позиция.

Позиции p_u и p_c связываются опорной линией L_o . Длина L_o является кратчайшим расстоянием s_o между позициями p_u и p_c (рис. 1). Опорная линия служит ориентиром при прокладке траектории.

Процесс формирования траектории в условиях частичной неопределенности осуществляется последовательно (пошагово) на двух уровнях каждого шага.

Процедурами первого уровня на карте местности последовательно по шагам формируется цепочка попарно смежных регионов с локализованными препятствиями рис. 2. При слиянии цепочки регионов образуется область местности, через которую прокладывается траектория.

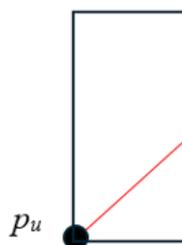


Рис. 1. Рецепторная модель карты местности (кратчайшее расстояние между позициями)

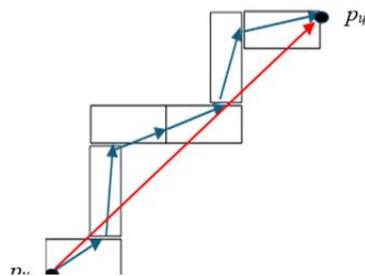


Рис. 2. Рецепторная модель карты местности (формирование цепочки попарно смежных регионов с локализованными препятствиями)

На каждом шаге t процедурами первого уровня относительно входной позиции $p_{вх}(t)$ региона r_t , достигнутой на предыдущих шагах, формируется с помощью радара ПО локальная зона видимости (ЛЗВ) $z(t)$. В пределах ЛЗВ осуществляется определение координат (локализация) всех препятствий и параметры их перемещения [10, 11].

Далее экстраполируются параметры перемещения подвижных объектов. На основе этих данных, в соответствии с конфигурацией местности, определяются граничные размеры региона r_t , покрываемого ЛЗВ. Граничные размеры региона лежат в пределах граничных размеров ЛЗВ, покрывающей регион r_t . Основное требование к региону заключается в существовании сквозного прохода через него.

Граничные размеры региона r_t считаются валидными, если существует проход через регион r_t . Изменение (деформация) конфигурации контура региона осуществляется путем параллельного сдвига сторон региона [10].

Процедурами второго уровня на шаге t формируется множество $M(t)$ траекторий прохода ПО через регион r_t , от входной позиции $p_{вх}(t)$ к границе выхода из региона r_t . Для каждой траектории $m_t \in M$ вычисляется оценка пригодности ξ_t . Выбирается m_t с лучшей оценкой ξ_t и определяется выходная позиция $p_{вых}(t)$, которая является концевой вершиной траектории m_t , расположенной на границе выхода из региона r_t .

На шаге $t+1$ граница выхода из региона r_t совмещается с границей входа в регион r_{t+1} , при этом выходная позиция $p_{вых}(t)$ совмещается с входной позицией $p_{вх}(t+1)$.

ПО в течение заданного интервала времени перемещается в пределах региона r_t с учетом прогнозируемых параметров размещения подвижных и не подвижных объектов по кратчайшему пути от входной позиции p_i к новой позиции p_{i+1} , которая после прохода размещается в конце региона.

В работе описывается гибридный алгоритм планирования траектории в условиях частичной неопределенности для двумерного пространства, основанный на интеграции волнового и муравьиного алгоритмов, позволяющий строить в реальном масштабе времени траектории минимальной длины с одновременной оптимизацией ряда других критериев качества построенного пути [10–13].

Поиск решения осуществляется популяцией агентов на графе поиска решений $G=(E,U)$. Вершины множества E соответствуют ячейкам области R . Две вершины $e_i \in E$ и $e_j \in E$ связаны ребром u_k , если соответствующие им ячейки на модели местности в виде ДРП смежны и возможен переход соединения из одной ячейки в другую.

Наибольшее распространение для построения маршрута на плоскости получили волновые алгоритмы (метод распространения волнового фронта) [10, 11]. Карта местности при построении маршрута волновым алгоритмом разбивается на квадраты (ячейки), размер которых определяется на основе соотношения размеров подвижного объекта, препятствий, местности и требуемой точности.

На рис. 3 представлена модель региона местности в виде дискретного рабочего поля (ДРП). Модель такого рода называют **рецепторной**. ДРП региона соответствует граф (рис. 4). Вершины графа соответствуют ячейкам. Если две ячейки смежны, то со-

ответствующие этим ячейкам вершины графа связаны ребром. С помощью радара ПО осуществляется локализация на модели региона препятствий и параметры их перемещения [1, 3, 4, 11]. Ячейки ДРП отражают все возможные размещения ПО и препятствий в пространстве поиска.

На каждом шаге t относительно опорного вектора и входной позиции $p_{вх}(t)$ региона r_t , достигнутой на предыдущих шагах, формируется с помощью радара и лидара ПО локальная зона видимости (ЛЗВ) $z(t)$. Изначально все ячейки ДРП считаются свободными. В пределах ЛЗВ осуществляется определение координат (локализация) всех препятствий и параметры их перемещения [1, 10]. Ячейки с препятствиями помечаются.

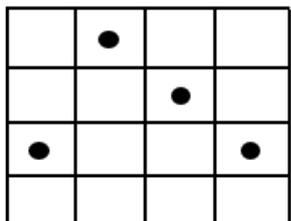


Рис. 3. Модель региона местности в виде дискретного рабочего поля

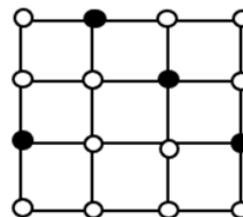


Рис. 4. Граф, соответствующий дискретному рабочему полю региона

На модели региона r_t в виде дискретного рабочего поля (ДРП) фиксируется входная $p_{вх}(t)$ позиция маршрута, проходящего через регион r_t . Фиксируется граница выхода из региона, на которой выбирается и размещается выходная позиция из региона $p_{вых}(t)$ рис. 5. На рис. 6 выбранный маршрут выделен цветом, а в качестве выходной позиции региона служит позиция q_2 .

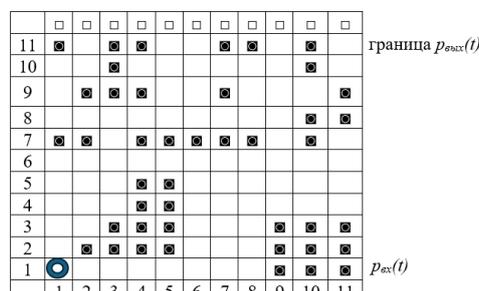


Рис. 5. Модель региона r_t в виде ДРП (исходная модель первого региона с препятствиями)

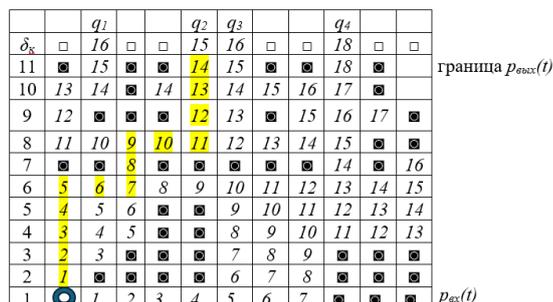


Рис. 6. Модель региона r_t в виде ДРП (построение маршрута в первом регионе на основе волновых процедур)

Процесс планирования траектории в заданном регионе представляет собой сложный и многоступенчатый процесс, который можно разделить на два ключевых этапа. На первом этапе, который можно назвать этапом построения маршрута, осуществляется распро-

странение волны от исходной позиции (обозначаемой как $p_{ex}(t)$) до границы выхода из региона (обозначаемой как r_t). В результате этого распространения формируется пространство поиска R маршрута, которое обозначается как $ППМ(t)$. Это пространство представляет собой совокупность связанных ячеек дискретного рабочего поля (ДРП), которые были достигнуты волной, и каждой из этих ячеек присваиваются определенные веса в соответствии с принятым критерием оптимальности [10, 11].

В процессе распространения волны от источника к цели ячейкам дискретного рабочего поля присваиваются весовые оценки, связанные с принятым критерием оптимальности.

После завершения распространения волны определяется множество, достигнутых на ДРП волной, ячеек $Q=\{q_k\}$, расположенных на границе выхода из региона r_t .

Если после распространения волны от источника в множество ячеек, достигнутых на ДРП волной, не вошли ячейки, расположенные на границе выхода из региона r_t , т.е. $Q=\emptyset$, то производится коррекция конфигурации региона, путем изменения его размеров. Основные процедуры изменения конфигурации региона заключаются в последовательном наращивании слоя ячеек по периметру конфигурации модели региона [10, 11, 13].

На рис. 7 представлена модель региона, на которой выполнено распространение волны от входной ячейки. Расположение препятствий не допускает достижения волной ячеек, расположенных на границе выхода из региона.

На рисунке 8 представлена модель этого же региона, после наращивания слоя ячеек по периметру конфигурации модели. В новых ячейках отражаются препятствия. После этого в рамках новой конфигурации региона производится дополнительное распространение волны с выходом на границу выхода [1, 3, 10, 11].

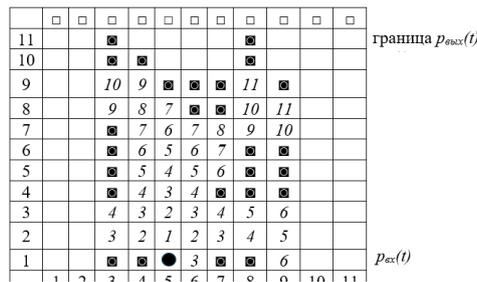


Рис. 7. Процесс модернизации конфигурации региона (исходная модель региона не позволяющая выполнить выход волны к границе)

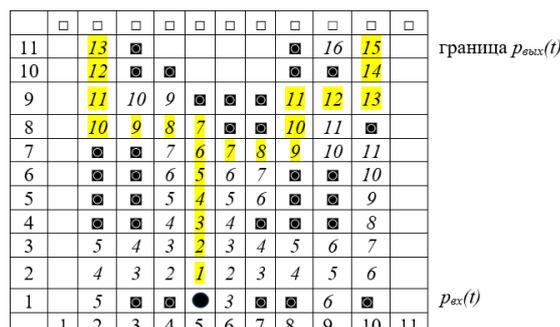


Рис. 8. Процесс модернизации конфигурации региона (модернизированная структура модели региона, допускающая выход волны к границе)

Для каждой достигнутой волной вершины $q_k \in Q$ на границе выхода из региона в пространстве поиска на ДРП может существовать несколько вариантов маршрута, связывающего вершину q_k с вершиной $p_{ex}(t)$.

На базе сформированного в регионе пространства поиска R муравьиным алгоритмом (МА) от каждой ячейки $q_k \in Q$ формируется маршрут $M_k(t)$, связывающий q_k с $p_{ex}(t)$ [12].

Построение каждого маршрута $M_k(t)$ выполняется популяцией P_k муравьев на графе поиска решений $G=(X,U)$. Вершины множества X соответствуют ячейкам области R . Две вершины $x_i \in X$ и $x_j \in X$ связаны ребром, если соответствующие им ячейки на модели местности в виде ДРП смежны и возможен переход маршрута из одной ячейки в другую.

Каждая итерация l муравьиного алгоритма включает три этапа. На первом этапе каждый агент a_n популяции P_k конструктивным алгоритмом формирует на графе G маршрут $m_{kn}(t)$ из вершины q_k , в вершину $p_{ex}(t)$.

Подобно волновому алгоритму каждый муравей конструктивным алгоритмом строит на $ППТ(l)$ маршрут, представляющий совокупность ячеек ДРП с последовательно уменьшающимся весом. Всеми муравьями популяции P_k на базе каждой ячейки q_k будет построено множество M_k вариантов маршрута одной минимальной длины d_k , но отличающимися конфигурациями. В качестве оценки каждого маршрута m_{kn} служит параметр f_{kn} – число поворотов маршрута. Запоминается лучшая оценка f_k и маршрут, полученные агентом a_n на l -ой итерации.

На втором этапе итерации МА каждый агент a_n откладывает феромон на ребрах маршрута m_{kn} , в количестве пропорциональном оценке f_{kn} маршрута m_{kn} .

На третьем этапе итерации осуществляется общее испарение (уменьшение) количества феромона на всех ребрах графа поиска решений $G=(X,U)$ на некоторую величину, запоминается решение с лучшей оценкой [12, 14–17].

Целью муравьиного алгоритма является поиск маршрута $m_k^* \in M_k$ с минимальным значением оценки f_{kn} .

Для каждой ячейки $q_k \in Q$ определяется расстояние d_k от q_k до опорного вектора L_o . Для каждой траектории $M_k \in M$ вычисляется оценка пригодности ξ_k .

$$\xi_k = \alpha f_{ki} + \beta \delta_k + \gamma d_k.$$

В качестве маршрута, проложенного через регион r_i выбирается маршрут m_k^* с лучшим значением оценки пригодности ξ_k , а в качестве выходной позиции региона r_i выбирается ячейка q_k , соответствующая вышеприведенным условиям.

Для примера, приведенного на рис. 8 выбранный маршрут выделен цветом, а в качестве выходной позиции региона служит позиция q_2 .

На рис. 9 представлен пример второго региона, модель которого сформирована относительно выходной позиции первого региона. В пределах ЛЗВ определены координаты (локализация) всех препятствий и параметры их перемещения [11, 16, 18]. Ячейки с препятствиями помечены.

На втором этапе прокладки траектории в регионе определяется выходная ячейка $p_{вых}(t)=q_k(t)$ и осуществляется выбор на ДРП региона маршрута, связывающего ячейки $p_{ex}(t)$ и $p_{вых}(t)$. Фиксируются весовые оценки δ_k множества Q ячеек ДРП.

В примере, представленном на рис. 6: $Q=\{q_1, q_2, q_3, q_4\}$; $\delta_1=16, \delta_2=15, \delta_3=16, \delta_4=18$.

В процессе распространения волны от источника к цели ячейкам дискретного рабочего поля присваиваются весовые оценки, связанные с принятым критерием оптимальности. В примере, представленном на рисунке 10: $\delta_1=16, \delta_2=14, \delta_3=13, \delta_4=15, \delta_5=17$ [1–12, 16–18].

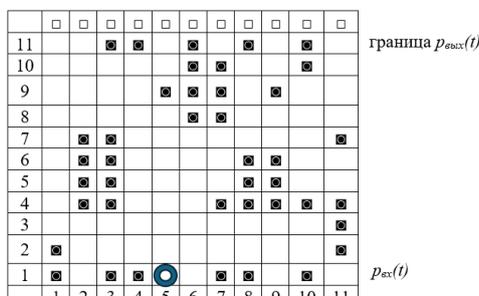


Рис. 9. Пример второго региона, модель которого сформирована относительно выходной позиции первого региона (модель региона с препятствиями)

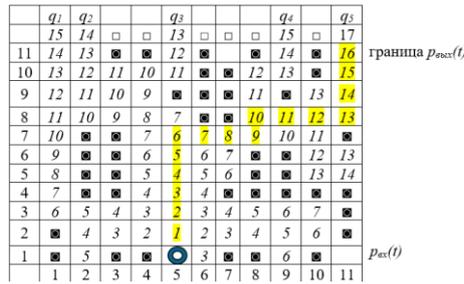


Рис. 10. Пример второго региона, модель которого сформирована относительно выходной позиции первого региона (построение маршрута на основе волновых процедур)

Муравьиным алгоритмом на базе сформированного пространства поиска R каждой ячейки $q_k \in Q$ формируется маршрут $m_k(t)$, связывающий q_k с $p_{вх}(t)$.

Процедурами второго уровня на шаге t формируется множество M траекторий прохода ПО через регион r_i , от входной позиции $p_{вх}(t)$ к границе выхода из региона r_i . Для каждой траектории $m_i \in M$ вычисляется оценка пригодности ξ_i . Выбирается m_i с лучшей оценкой ξ_i и определяется выходная позиция $p_{вых}(t)$, которая является конечной вершиной траектории q_i , расположенной на границе выхода из региона r_i .

На шаге $t+1$ граница выхода из региона r_i совмещается с границей входа в регион r_{t+1} , при этом выходная позиция $p_{вых}(t)$ совмещается с входной позицией $p_{вх}(t+1)$.

ПО – в течение заданного интервала времени перемещается в пределах региона r_i с учетом прогнозируемых параметров размещения подвижных и не подвижных объектов по кратчайшему пути от входной позиции p_i к новой позиции p_{i+1} , которая после прохода размещается в конце региона [11, 19].

На третьем этапе путем распространения на ДРП волны от источника (точка $ТП(t)$) к точке *цель* формируется пространство поиска траектории – $ППТ(l)$, представляющая совокупность связанных ячеек ДРП, достигнутых волной, с присвоенными им весами [11, 12, 19–20].

На четвертом этапе муравьиным алгоритмом на сформированной области $ППТ(l)$ прокладывается траектория $M(l)$ из точки *цель* к точке $ТП(l)$ [18–20].

На рис. 11 представлен процесс слияния маршрутов, построенных в первом и втором регионах.

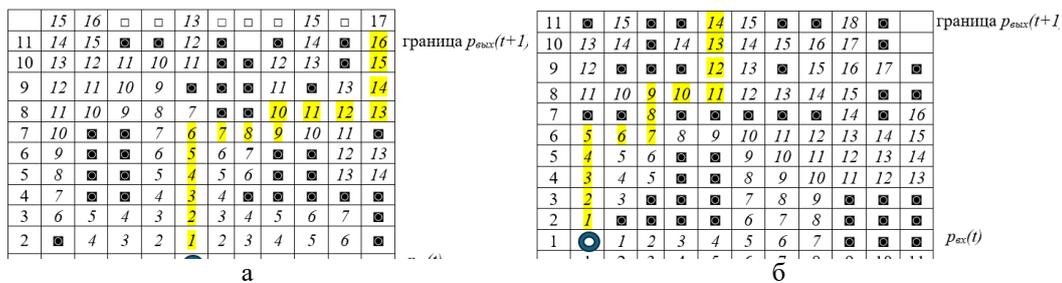


Рис. 11. Пример слияния 1 и 2 регионов (а – второй регион, б – первый регион)

Алгоритм планирования траектории подвижным объектом.

1. Формирование рецепторной модели карты местности с заданным шагом дискретизации.
2. На рецепторной модели карты местности фиксируются две позиции: p_u – исходная позиция, p_v – целевая позиция.
3. Позиции p_u и p_v связываются опорным вектором L_o . Длина L_o является кратчайшим расстоянием s_o между позициями p_u и p_v .
4. $t=1$. (t – номер шага).
5. На основе данных сенсорной системы ПО относительно позиции $p_{вх}(t)$ и опорного вектора, генерируется контур локальной зоны видимости (ЛЗВ) $z(p_{вх}(t))$. Размеры и форма контура ЛЗВ определяются техническими возможностями сенсорной системы ПО.

6. В пределах ЛЗВ с помощью радара и лидара ПО осуществляется обнаружение и определение координат (локализация) всех препятствий.

Задача обнаружения объекта заключается в задаче нахождения в двухмерном случае областей ЛЗВ, покрываемых препятствиями, а также нанесение меток на всех дискретах ДРП, покрываемых препятствиями. Для обнаружения объектов по моноизображениям наиболее точными являются методы, основанные на применении свёрточных нейронных сетей.

7. В границах ЛЗВ $z(t)$ формируются конфигурация, ориентация и размеры региона r_t . На размеры региона накладываются ограничения. Регион r_t должен полностью покрываться ЛЗВ $z(t)$.

8. Фиксируется расположение региона r_t на карте местности.

9. Фиксируется граница региона, на которой размещается входная позиция $p_{ex}(t)$ в регион r_t , и граница региона, на которой размещается выходная позиция из региона $p_{вых}(t)$.

10. Формируются входная позиция региона r_t . Если $t=1$ (t – номер шага), то $p_{ex}(t) = p_u$. Если $t > 1$, то в качестве входной позиции в регион r_t , служит позиция $p_{ex}(t) = p_{вых}(t-1)$.

11. Подвижный объект помещается во входную позицию $p_{ex}(t)$ региона r_t .

Далее экстраполируются параметры перемещения подвижных объектов.

12. Выполняется первый этап прокладки траектории в регионе r_t от позиции $p_{ex}(t)$ до границы выхода из региона r_t .

Путем распространения на ДРП волны от источника (точка $p_{ex}(t)$) к границе выхода из региона r_t формируется пространство поиска траектории, представляющее совокупность связанных ячеек ДРП, достигнутых волной, с присвоенными им весами.

13. Если волна не достигла границы выхода из региона r_t , то переход к пункту 14, иначе переход к пункту 15.

14. Производится изменение контура и размеров региона, без изменения $p_{ex}(t)$ и выполняется дополнительное распространение волны в обновленных границах региона. Переход к пункту 13.

15. Определяется множество достигнутых волной ячеек $Q = \{q_k\}$, расположенных на границе выхода из региона r_t . Если в состав региона входит целевая позиция – p_u , то $Q = \{p_u\}$. Фиксируется весовые оценки δ_i множества ячеек Q .

16. Построение муравьиным алгоритмом для каждой ячейки q_k маршрута $M_k(t)$ от q_k до $p_{ex}(t)$. Расчет оценок ξ_k пригодности всех маршрутов.

17. Выбор маршрута $M_k^*(t)$ от q_k до $p_{ex}(t)$ с лучшей оценкой ξ_k . Фиксация $p_{вых}(t) = q_k^*$, где q_k^* принадлежит лучшему маршруту. Маршрут $M_k^*(t)$ включается в множество маршрутов P , построенных в регионах.

18. ПО перемещается в позицию $p_{вых}(t)$.

19. Если маршрут $M_k^*(t)$ не достиг p_u , то формируется опорный вектор L_t , связывающий $p_{вых}(t)$ с p_u , $t = (t+1)$ и переход к пункту 6, иначе переход к пункту 20.

20. На базе построенных маршрутов в отдельных регионах формируется траектория маршрута из позиции p_u в позицию p_u .

21. Конец работы алгоритма.

Процесс формирования и ориентации локальной зоны видимости и покрываемого ею региона на карте местности выполняется относительно текущего опорного вектора, рис. 12.

Схема алгоритма планирования траектории ПО представлена на рис. 13.

На рис. 12 на первом шаге в качестве текущей опорной линии служит линия L_0 , связывающая позиции p_u и p_u . Через позицию p_u перпендикулярно к опорному вектору L_0 проводится базовая линия, который служит основанием для формируемой ЛЗВ и региона. Позиция p_u рассматривается в качестве входной позиции региона r_1 .

На рис. 12,а приведено взаимное расположение опорного вектора L_0 , базовой линии, сформированных области ЛЗВ $z(1)$ и региона r_1 .

После построения в регионе r_1 маршрута с лучшим значением оценки пригодности и выборе выходной позиции $p_{вых}(1)$ региона r_1 формируется текущий опорный вектор L_1 , рис. 12,б, связывающего позиции $p_{вых}(1)$ и p_u .

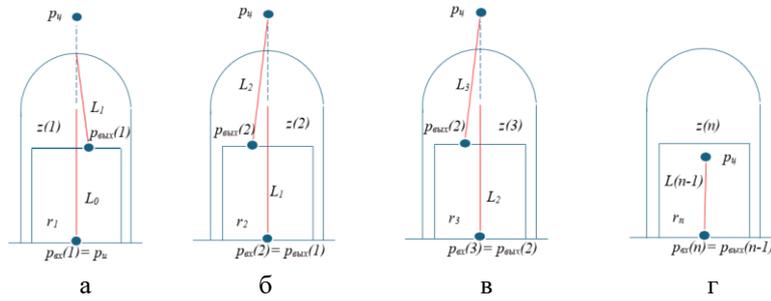


Рис. 12. Процесс формирования и ориентации локальной зоны видимости: а – взаимное расположение опорного вектора L_0 , базовой линии, сформированных области ЛЗВ $z(1)$ и региона r_1 , б – формирование текущего опорного вектора L_1 , связывающего позиции $p_{\text{вых}}(1)$ и $p_{\text{ц}}$, в – формирование текущего опорного вектора L_2 , связывающего позиции $p_{\text{вых}}(2)$ и $p_{\text{ц}}$, г – последний регион

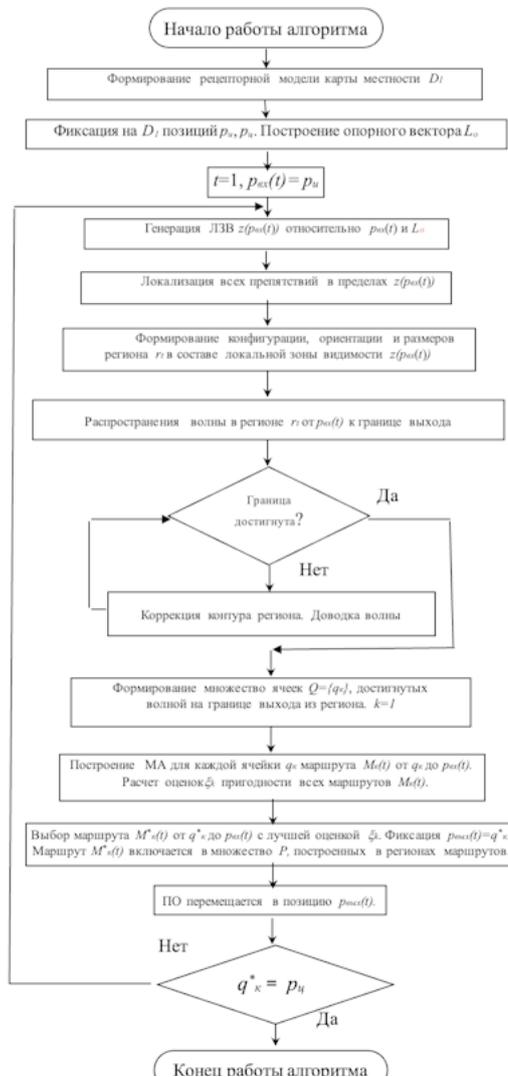


Рис. 13. Схема работы алгоритма

На втором шаге позиция $p_{вых}(1)$ служит в качестве входной позиции $p_{вх}(2)=p_{вых}(1)$ региона r_2 . Затем относительно опорного вектора L_1 через $p_{вх}(2)$ проводится базовая линия на которой формируются и располагаются область ЛЗВ $z(2)$ и регион r_2 .

После построения в регионе r_2 маршрута и выборе выходной позиции $p_{вых}(2)$ региона r_2 формируется текущий опорный вектор L_2 рис. 12,в, связывающего позиции $p_{вых}(2)$ и $p_{ц}$.

Если на некотором шаге n окажется, что позиция цели $p_{ц}$ окажется внутри региона r_n , то регион r_n будет последним, рис. 12,г.

Отметим, что если при прокладке маршрута через регион волна, распространяемая от входной позиции в регион, не достигает выходной границы региона, то размеры региона увеличиваются, до тех пор, пока не будет достигнута выходная граница региона.

На размеры региона накладываются ограничения. В составе региона не допускается наличие областей, не покрываемых локальной зоной видимости, так как в этих областях могут быть не учтенные препятствия [10, 18–20].

В этом случае в качестве выходной позиции региона выбирается ближайшая к позиции $p_{ц}$ позиция, расположенная на одной из границ покрываемого ЛЗВ региона.

Вычислительный эксперимент. Гибридная многоагентная система ситуационного планирования траектории в условиях частичной неопределенности реализована в виде комплекса программ, базирующихся на парадигмах роевых алгоритмов и гибридной стратегии поиска в глубину.

Для оценки эффективности разработанных методик и программного обеспечения авторами разработаны контрольные примеры построения маршрутов, для которых заранее известно оптимальное значение F суммарной стоимости траекторий в регионах, входящих в общую траекторию следования подвижного объекта в условиях частичной неопределенности для двухмерного пространства.

С помощью разработанного программного средства было сгенерировано 5 примеров М1-М5.

Каждый пример запускался 10 раз. В табл. 1 для каждого примера приводится среднее значение отклонения оценки решения от оптимального в %, а также среднее значение отклонения оценки решения (длина траектории). В качестве объекта сравнения использовалась суммарная длина траектории, проложенной через опорные векторы, связывающих исходную и целевую позиции.

nR – число регионов;

nP – число препятствий;

LM – длина траектории;

LV – длина опорного вектора.

В результаты экспериментов было установлено, что показатели качества разработанных алгоритмов имеют более высокие значения чем в работах [6–10].

Таблица 1

Класс задач	М1	М2	М3	М4	М5
$X \times Y =$	6×6	6×7	6×6	6×6	6×6
nR	5	6	7	8	9
nP	5	10	16	18	20
LM	35	48	58	66	75
LV	32	43	52	62	70
$LV/LM\%$	91	89	89	93	93

В результате проведенных экспериментов были найдены лучшие эвристики для решения задач, связанных с выбором точек сопряжения двух соседних регионов

Временная сложность алгоритма (BCA), полученная экспериментальным путем, практически совпадает с теоретическими исследованиями и для рассмотренных тестовых задач составляет ($BCA \approx O(n^2)$).

Заключение. В работе предлагается гибридный алгоритм, позволяющий строить в реальном масштабе времени траектории минимальной длины с одновременной оптимизацией ряда других критериев качества построенного пути. Отличительная особенность заключается в том, что перемещение подвижного объекта по траектории происходит практически одновременно с ее формированием (прокладкой), в текущем режиме времени.

В результате проведенных исследований было установлено, что предложенная модернизированная методика пошагового проектирования траектории позволила повысить эффективность решения, что подтверждено результатами, полученными во время проведения экспериментальных исследований. Анализ показал, что значительное влияние на улучшение характеристик оказало использование адаптивного опорного вектора, задающего предпочтительное направление перемещения ПО, модернизированная методика пошагового проектирования траектории и подходы к формированию и размеров, соотношению взаимного расположения и ориентации на местности локальной зоны видимости и регионов. Использование предложенной методики и методов проектирования траектории с учетом упомянутых факторов позволяют упростить конфигурацию траектории и минимизировать ее общую длину, в результате чего снижаются вычислительные затраты и время прохождения по маршруту. Источником усовершенствования может быть более детальная проработка вопросов, связанных с формированием локальной зоны видимости и выбором (сменой) текущих исходных позиций, что ускорит процесс достижения подвижным объектом целевого состояния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пишихов В.Х. и др.* Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пишихова. – М.: Физматлит, 2014. – 300 с.
2. *Гузик В.Ф., Переверзев В.А., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В.* Принципы построения экстраполирующего многомерного нейросетевого планировщика интеллектуальной системы позиционно-траекторного управления подвижными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 67-80.
3. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В.* Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // Проблемы управления. – 2015. – № 4. – С. 66-74.
4. *Нейдорф Р.А., Полях В.В., Черногоров И.В., Ярахмедов О.Т.* Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3 (176). – С. 127-143.
5. *Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Биоинспирированный алгоритм планирования траектории в условиях частичной неопределенности и наличии перемещающихся препятствий // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сб. научных трудов XI-й Международной научно-технической конференции. – Смоленск: Универсум, 2022. – С. 298-309.
6. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Методы и модели коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
7. *Котов Д.В., Лебедев О.Б.* Управление передвижением группы БПЛА с соблюдением геометрической структуры строя на основе альтернативной коллективной адаптации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 155-167.
8. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Бесхмельнов М.И.* Децентрализованное управление группой автономных подвижных объектов при формировании траектории движения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 6. – С. 177-190.
9. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011.
10. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Гибридный алгоритм ситуационного планирования траектории на плоскости в условиях частичной неопределенности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2018. – № 1. – С. 76-93.
11. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б.* Планирование двухмерной траектории в условиях частичной неопределенности на основе интеграции волнового и муравьиного алгоритмов // Сб. трудов V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием «Гибридные и синергетические интеллектуальные системы». – Зеленоградск: Изд-во Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта. – 2020. – С. 87-94.
12. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – 3-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 448 с.
13. *Городецкий В.И.* Управление коллективным поведением роботов в автономной миссии // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 1 (10). – С. 40-54.
14. *Chen S., Eshaghian M.M.* A fast recursive mapping algorithm // Department of computer and information science. – New Jersey, USA: New Jersey, 2013. – P. 219-227.
15. *Кузнецов А.В.* Модель движения и взаимодействия системы интеллектуальных агентов // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2018. – № 2. – С. 130-138.

16. Байгутлина И.А. Реализация новых сервисов с использованием робототехнических комплексов // Славянский форум. – 2021. – № 4 (34). – С. 162-170.
17. Морозова Н.С. Децентрализованное управление движением строя роботов при динамически изменяющихся условиях // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2015. – Т. 1. – С. 65-74.
18. 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.
19. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // Современная мехатроника: Сб. научных трудов Всероссийской научной школы. – 2011. – С. 35-51.
20. Усанова 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.

REFERENCES

1. Pshikhopov V.Kh. *i dr.* Intellektual'noe planirovanie traektoriy podvizhnykh ob"ektov v sredakh s prepyatstviyami [Intelligent planning of trajectories of moving objects in environments with obstacles], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2014, 300 p.
2. Guzik V.F., Pereverzev V.A., Pyavchenko A.O., Saprykin R.V. Printsipy postroeniya ekstrapoliruyushchego mnogomernogo neyrosetevogo planirovshchika intellektual'noy sistemy pozitsionno-traektornogo upravleniya podvizhnymi ob"ektami [Principles of constructing an extrapolating multidimensional neural network planner of an intelligent system of position-trajectory control of moving objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2 (175), pp. 67-80.
3. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Algoritmy adaptivnykh pozitsionno-traektornykh sistem upravleniya podvizhnymi ob"ektami [Algorithms of adaptive position-trajectory control systems for moving objects], *Problemy upravleniya* [Problems of Control], 2015, No. 4, pp. 66-74.
4. Neydorf R.A., Polyakh V.V., Chernogorov I.V., Yarakhmedov O.T. Issledovanie evristicheskikh algoritmov v zadachakh prokladki i optimizatsiya marshrutov v srede s prepyatstviyami [Study of heuristic algorithms in problems of laying and optimizing routes in an environment with obstacles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3 (176), pp. 127-143.
5. Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B. Bioinspirirovannyi algoritm planirovaniya traektorii v usloviyakh chastichnoy neopredelennosti i nalichii peremeshchayushchikhsya prepyatstviy [Bioinspired algorithm for trajectory planning under partial uncertainty and in the presence of moving obstacles], *Integrirrovannyye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte: Sb. nauchnykh trudov XI-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Integrated models and soft computing in artificial intelligence: Collection of scientific papers of the XI International Scientific and Technical Conference]. Smolensk: Universum, 2022, pp. 298-309.
6. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Metody i modeli kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Methods and models of collective control in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 280 p.
7. Kotov D.V., Lebedev O.B. Upravlenie peredvizheniem gruppy BPLA s soblyudeniem geometricheskoy struktury stroya na osnove al'ternativnoy kollektivnoy adaptatsii [Control of movement of a group of UAVs with observance of the geometric structure of the formation based on alternative collective adaptation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 1, pp. 155-167.
8. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Detsentralizovannoe upravlenie gruppy avtonomnykh podvizhnykh ob"ektov pri formirovani traektorii dvizheniya [Decentralized control of a group of autonomous mobile objects when forming a trajectory of movement], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 6, pp. 177-190.
9. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Control of moving objects in certain and uncertain environments]. Moscow: Nauka, 2011.
10. Lebedev B.K., Lebedev O.B. Gibridnyy algoritm situatsionnogo planirovaniya traektorii na ploskosti v usloviyakh chastichnoy neopredelennosti [Hybrid algorithm for situational trajectory planning on a plane under partial uncertainty], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Priborostroenie"* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument Engineering], 2018, No. 1, pp. 76-93.
11. Lebedev B.K., Lebedev O.B. Planirovanie dvukhmernoy traektorii v usloviyakh chastichnoy neopredelennosti na osnove integratsii volnovogo i murav'inogo algoritmov [Two-dimensional trajectory planning under partial uncertainty based on the integration of wave and ant algorithms], *Sb. trudov V Vserossiyskoy Pospelovskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy»* [Collection of works of the V All-Russian Pospelovskaya conference with international participation "Hybrid and synergetic intelligent systems"]. Zelenogradsk: Izd-vo Baltiyskiy federal'nyy universitet im. Immanuila Kanta, 2020, pp. 87-94.

12. *Karpenko A.P.* Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennye prirodoy: ucheb. posobie [Modern algorithms for search engine optimization. Algorithms inspired by nature: a tutorial]. 3rd ed. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2021, 448 p.
13. *Gorodetskiy V.I.* Upravlenie kolektivnym povedeniem robotov v avtonomnoy missii [Control of collective behavior of robots in an autonomous mission], *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* [Robotics and Technical Cybernetics], 2016, No. 1 (10), pp. 40-54.
14. *Chen S., Eshaghian M.M.* A fast recursive mapping algorithm, *Department of computer and information science*. New Jersey, USA: New Jersey, 2013, pp. 219-227.
15. *Kuznetsov A.V.* Model' dvizheniya i vzaimodeystviya sistemy intellektual'nykh agentov [Model of movement and interaction of a system of intelligent agents], *Vestnik VGU. Seriya: Sistemy analiz i informatsionnye tekhnologii* [VSU Bulletin. Series: Systems analysis and information technology], 2018, No. 2, pp. 130-138.
16. *Baygulina I.A.* Realizatsiya novykh servisov s ispol'zovaniem robototekhnicheskikh kompleksov [Implementation of new services using robotic complexes], *Slavyanskiy forum* [Slavic forum], 2021, No. 4 (34), pp. 162-170.
17. *Morozova N.S.* Detsentralizovannoe upravlenie dvizheniem stroya robotov pri dinamicheski izmenyayushchikhsya usloviyakh [Decentralized control of the movement of a robot formation under dynamically changing conditions], *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial Intelligence and Decision Making], 2015, Vol. 1, pp. 65-74.
18. *Veselov G.E., Lebedev B.K., Lebedev O.B.* Upravlenie dvizheniem gruppy mobil'nykh robotov v kolonne [Control of the movement of a group of mobile robots in a column], *Nauchno-prakticheskiy zhurnal Informatizatsiya i svyaz'* [Scientific and practical journal Informatization and Communications], 2021, No. 3, pp. 7-11.
19. *Karpov V.E.* Kollektivnoe povedenie robotov. Zhelaemoe i deystvitel'noe [Collective behavior of robots. Desired and actual], *Sovremennaya mekhatronika: Sb. nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchnoy shkoly* [Modern mechatronics: Collection of scientific papers of the All-Russian scientific school], 2011, pp. 35-51.
20. *Uspanova R.A.* Aktual'nye problemy upravleniya gruppoy BPLA [Actual problems of UAV group control], *Tr. trinahtsatoy obshcherossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: v 2-kh t. Ser. Biblioteka zhurnala «Voenmekh. Vestnik BGTU»* [Proc. of the thirteenth all-Russian youth scientific and technical conference: in 2 volumes. Series. Library of the journal "Voenmekh. Bulletin of BSTU"]. Saint Petersburg, 2021, No. 76, pp. 128-130.

Бесхмельнов Максим Игоревич – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89252622177; кафедра информатики; преподаватель.

Лебедев Борис Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89282897933; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; д.т.н.; профессор.

Лебедев Олег Борисович – МИРЭА – Российский технологический университет; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89085135512; кафедра информатики; д.т.н.; профессор.

Beskhmelnov Maxim Igorevich – MIREA – Russian University of Technology; e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79252622177; the Department of Computer Science; teacher.

Lebedev Boris Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79282897933; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; dr. of eng. sc.; professor.

Lebedev Oleg Borisovich – MIREA – Russian University of Technology; e-mail: lebedev.ob@mail.ru; Moscow, Russia; phone: +79085135512; the Department of Computer Science; dr. of eng. sc.; professor.