

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.896

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

М.И. БЕСХМЕЛЬНОВ, препод., Б.К. ЛЕБЕДЕВ, д-р техн. наук,
О.Б. ЛЕБЕДЕВ, д-р техн. наук

МИРЭА – Российский технологический университет,
119454, Москва, пр-т Вернадского, 78, e-mail: m_beskhmelnov@mail.ru

© Бесхмельнов М.И., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., 2025

В статье представлен детальный анализ гибридного алгоритма планирования маршрута, предназначенного для навигации в двухмерном пространстве, с учетом частичной неопределенности в информации о местности. Алгоритм функционирует поэтапно и разделяется на два уровня. На первом уровне происходит формирование локальной зоны видимости объекта и определение покрываемого региона на карте. На втором уровне алгоритм отвечает за создание множества возможных траекторий прохождения объекта через каждый из идентифицированных на первом уровне регионов. Важной особенностью является использование муравьиного алгоритма, что позволяет эффективно исследовать пространство вариантов и находить оптимальные пути. После обработки алгоритм формирует общую траекторию, представляющую собой связную последовательность отдельных участков, каждый из которых является оптимальным путем.

Ключевые слова: траектория, алгоритм, ситуационное планирование, частичная неопределенность, локальная зона видимости, подвижный объект.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-3-103-119

ВВЕДЕНИЕ

Задача проектирования траекторий (трасс) имеет достаточно широкое применение [1, 2]. Это проектирование соединений интегральных схем, автомобильных дорог, коммуникационных сетей и др. К настоящему времени разработано достаточно большое количество алгоритмов для решения задач построения траекторий в различных постановках и с учетом различного рода ограничений [3]. Траектории формируются (прокладываются) на некоторой карте местности последовательно, часто в условиях неполной определенности, от начальной точки к целевой [5]. Цель настоящей работы заключается в разработке нового гибридного метода планирования траекторий. 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. При слиянии цепочки регионов образуется область местности, через которую прокладывается траектория.

В результате проведенных исследований было установлено, что эффективность решения определяется, с одной стороны, возможностями технических средств (радаров, лидаров), позволяющих оценить текущую ситуацию, а с другой – методикой и методами построения траектории [3–5]. Разработана модернизированная методика пошагового проектирования траектории с использованием адаптивного опорного вектора, задающего предпочтительное направление перемещения подвижного объекта (ПО), и определены подходы к формированию, соотношению размеров, взаимному расположению и ориентации на местности локальной зоны видимости и регионов. Предложены новые методика и методы проектирования траектории с учетом упомянутых факторов [1–4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процессы синтеза (прокладки) траектории и передвижения по ней ПО связаны, причем передвижение по траектории происходит практически одновременно с ее формированием (прокладкой). Это связано с неопределенностью ограничений на карте местности, препятствующих прокладке траекторий [5, 6]. Наличие неопределенности обусловлено тем, что применительно к ПО такие препятствия не локализованы, так как система управления предварительно не имеет никакой информации ни об их форме, ни о размере, ни о параметрах их перемещения и расположения [3, 6, 7].

Процесс формирования маршрута и перемещения ПО на местности включает следующие этапы:

1. Формирование модели карты местности [1–3, 7].
2. Фиксация на модели карты местности исходной и целевой позиций траектории [8, 9].
3. Генерация в соответствии с техническими возможностями локатора ПО локальной зоны видимости (ЛЗВ) относительно опорного вектора и исходной позиции ПО [8, 9].
4. Анализ ЛЗВ и выявление (локализация) препятствий в ее пределах с помощью сенсорной подсистемы ПО [9, 10].
5. Формирование конфигурации региона, покрываемого ЛЗВ с препятствиями, выявленными радаром и лидаром в зоне видимости. Выбор границ входа и выхода из региона [1, 3, 9, 10].
6. Фиксация входной позиции на границе входа в регион. Входная позиция первого региона совмещается с исходной позицией ЛЗВ [8–10].
7. Формирование на модели региона набора маршрутов Q , связывающих входную позицию региона с границей выхода из региона [1, 3, 9, 10].
8. Выбор выходной позиции на границе выхода из региона и фиксация маршрута, связывающего входную и выходную позиции в регионе [9–11].
9. Перемещение ПО по выбранному маршруту из входной позиции региона в выходную [1, 9–12].

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 . 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.

При слиянии цепочки регионов образуется область местности, через которую прокладывается траектория.

На основе данных в соответствии с конфигурацией местности определяются граничные размеры региона r_i , покрываемого ЛЗВ. Граничные размеры региона лежат в пределах граничных размеров ЛЗВ, покрывающей регион r_i . Основное требование к региону заключается в наличии сквозного прохода через него [10, 11].

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

Процедурами второго уровня на шаге t формируется множество $M(t)$ траекторий прохода ПО через регион r_i от входной позиции $p_{\text{вх}}(t)$ 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 $p_{\text{вых}}(t)$, которая является конечной вершиной траектории m_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_{i+1} , при этом выходная позиция $p_{\text{вых}}(t)$ совмещается с входной позицией $p_{\text{вх}}(t + 1)$.

Подвижный объект в течение заданного интервала времени перемещается в пределах региона r_i с учетом прогнозируемых параметров размещения подвижных и неподвижных 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, 11].

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 дискретного рабочего поля (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. 1(а) представлена модель региона местности в виде ДРП. Модель такого рода называют рецепторной. Дискретному рабочему полю региона соответствует граф (рис. 1(б)), вершины которого соответствуют ячейкам. Если две ячейки смежны, то соответствующие этим ячейкам вершины графа связаны ребром. С помощью радара ПО осуществляется локализация на модели региона препятствий и определяются 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 $p_{\text{вх}}(t)$ региона r_i , достигнутой на предыдущих шагах, формируется с помощью радара и лидара ПО ЛЗВ $z(t)$. Изначально все ячейки ДРП считаются свободными. В пределах ЛЗВ осуществляется определение координат (локализация) всех препятствий и параметров их перемещения [1, 10]. Ячейки с препятствиями помечаются.

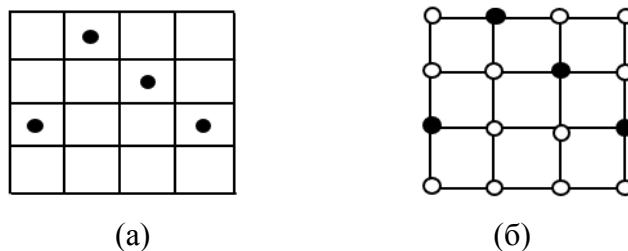


Рис. 1. Модель региона местности в виде дискретного рабочего поля (а) и граф, соответствующий ДРП региона (б)

На модели региона r_t в виде 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. 2(а)). На рис. 2(б) выбранный маршрут выделен цветом, а в качестве выходной позиции региона служит позиция q_2 .

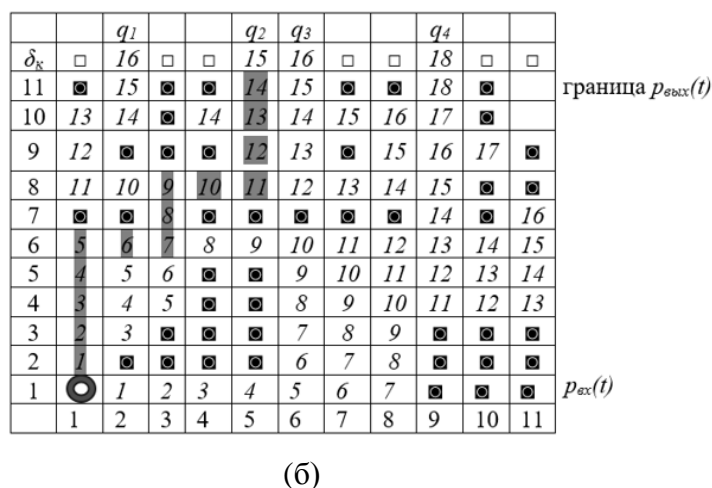
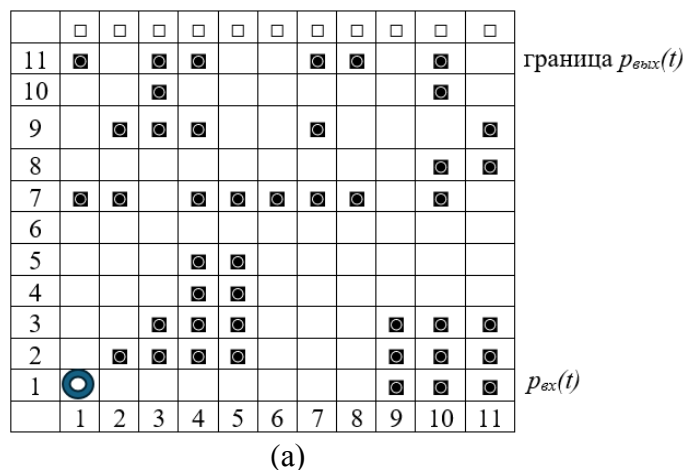


Рис. 2. Модель региона r_t в виде ДРП: граница выхода из региона (а); выбранные маршрут и выходная позиция q_2 (б)

Процесс планирования траектории в регионе включает два этапа.

На первом этапе построения маршрута в регионе путем распространения на ДРП волны от источника (входная позиция $p_{вх}(t)$) к границе выхода из региона r_t

формируется пространство поиска R маршрута – $ППМ(t)$, представляющее совокупность связанных ячеек ДРП, достигнутых волной, с присвоенными им весами.

В процессе распространения волны от источника к цели ячейкам ДРП присваиваются весовые оценки, связанные с принятым критерием оптимальности [10, 11].

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. В рамках новой конфигурации региона производится дополнительное распространение волны на границу выхода [9]. 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 $p_{ex}(t)$ [10–12].

На базе сформированного в регионе пространства поиска R муравьиным алгоритмом от каждой ячейки $q_k \in Q$ формируется маршрут $M_k(t)$, связывающий q_k с $p_{ex}(t)$. 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 [10–12]. 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 $ППМ(l)$ 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 с разными конфигурациями. Для оценки каждого маршрута m_{kn} используется параметр f_{kn} – число поворотов маршрута. Запоминаются лучшая оценка f_k и маршрут, полученные агентом a_n^* на l -й итерации.

На втором этапе итерации 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 и запоминается решение с лучшей оценкой [10–13]. 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_t , выбирается маршрут m_k^* с лучшим значением оценки пригодности ξ_k , а в качестве выходной позиции региона r_t выбирается ячейка q_k , соответствующая вышеуказанным условиям.

Выбранный маршрут выделяется цветом, а в роли выходной позиции региона будет служить позиция q_2 .

После этого рассматривается второй регион, модель которого сформирована относительно выходной позиции первого региона. В пределах ЛЗВ определены координаты (локализация) всех препятствий и параметры их перемещения [10, 11–15]. 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 $p_{вх}(t)$ и $p_{вых}(t)$. Фиксируются весовые оценки δ_k множества Q ячеек ДРП.

В примере, представленном на рис. 2(б), $Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4\}$; $\delta_1 = 16$, $\delta_2 = 15$, $\delta_3 = 16$, $\delta_4 = 18$.

В процессе распространения волны от источника к цели ячейкам ДРП присваиваются весовые оценки, связанные с принятым критерием оптимальности [10–12, 16, 17].

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_t , от входной позиции $p_{вх}(t)$ к границе выхода из региона r_t . 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_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 $p_{вх}(t + 1)$.

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

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

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

Алгоритм формирования конфигурации маршрута:

1. Формирование рецепторной модели карты местности с заданным шагом дискретизации.

2. На рецепторной модели карты местности фиксируются две позиции: p_u – исходная позиция, $p_{ц}$ – целевая позиция.

3. Позиции p_u и $p_{ц}$ связываются опорным вектором L_o . Длина L_o является кратчайшим расстоянием s_o между позициями p_u и $p_{ц}$.

4. $t = 1$ (t – номер шага).

5. На основе данных сенсорной системы ПО относительно позиции $p_{вх}(t)$ и опорного вектора генерируется контур ЛЗВ $z(p_{вх}(t))$, размеры и форма которого 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 нахождении в двухмерном случае областей ЛЗВ, покрываемых препятствиями, а также в нанесении меток на все дискреты ДРП, покрываемые препятствиями. Для обнаружения объектов по

моноизображениям наиболее точными являются методы, основанные на применении сверточных 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 $p_{\text{вх}}(t)$ в регион r_t , и граница региона, на которой размещается выходная позиция из региона $p_{\text{вых}}(t)$.

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

11. Подвижный объект помещается во входную позицию $p_{\text{вх}}(t)$ региона r_t . Затем экстраполируются параметры перемещения подвижных объектов.

12. Выполняется первый этап прокладки траектории в регионе r_t от позиции $p_{\text{вх}}(t)$ до границы выхода из региона r_t . Путем распространения на ДРП волны от источника (точка $p_{\text{вх}}(t)$) к границе выхода из региона r_t формируется пространство поиска траектории, представляющее собой совокупность достигнутых волной связанных ячеек ДРП с присвоенными им весами.

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

14. Производится изменение контура и размеров региона, без изменения $p_{\text{вх}}(t)$, и выполняется дополнительное распространение волны в обновленных границах региона. Переход к п. 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 $Q = \{p_u\}$. Фиксируются весовые оценки δ_i множества ячеек Q .

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

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

18. Подвижный объект перемещается в позицию $p_{\text{вых}}(t)$.

19. Если маршрут $M_k^*(t)$ не достиг p_u , то формируется опорный вектор L_t , связывающий $p_{\text{вых}}(t)$ с p_u , $t = (t + 1)$, и переход к п. 6, иначе переход к п. 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 ЛЗВ и покрываемого ею региона на карте местности выполняется относительно текущего опорного вектора (рис. 3).

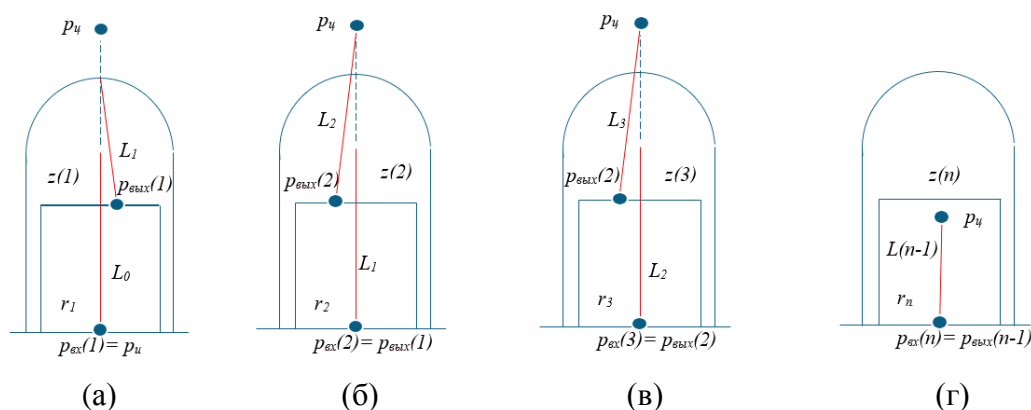


Рис. 3. Процесс формирования и ориентации ЛЗВ

и покрываемого ею региона на карте местности: взаимное расположение опорного вектора L_0 , базовой линии, сформированной области ЛЗВ $z(1)$ и региона r_1 (а); формирование текущего опорного вектора L_1 , связывающего позиции $p_{вых}(1)$ и p_u (б); формирование текущего опорного вектора L_2 , связывающего позиции $p_{вых}(2)$ и p_u (в); последний регион (г)

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, которая служит основанием для формируемой ЛЗВ и региона. Позиция p_u рассматривается в качестве входной позиции региона r_1 . На рис. 3(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 выбора выходной позиции $p_{вых}(1)$ региона r_1 формируется текущий опорный вектор L_1 (см. рис. 3(б)), связывающий позиции $p_{вых}(1)$ и p_u . 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 (см. рис. 3(в)), связывающий позиции $p_{вых}(2)$ и p_u . Если на некотором шаге n окажется, что позиция цели p_u расположена внутри региона r_n , то регион r_n будет последним (см. рис. 3(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 ЛЗВ, так как в данных областях могут быть неучтенные препятствия. В этом случае в качестве выходной позиции региона выбирается ближайшая к позиции p_u позиция, расположенная на одной из границ покрываемого ЛЗВ региона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведенных экспериментальных исследований преследовались две взаимосвязанные, но самостоятельные цели. Первая цель заключалась в углубленном изучении механизмов поиска траектории движения ПО с использованием роевых алгоритмов. Роевые алгоритмы, в основу которых положен принцип коллективного поведения социальных насекомых, таких как пчелы или муравьи, представляют собой мощный инструмент для решения задач оптимизации, в том числе и поиска

оптимального пути. Однако их эффективность напрямую зависит от правильного выбора параметров и архитектуры алгоритма. Именно поэтому в рамках данного исследования был разработан гибридный алгоритм, сочетающий преимущества волновых и роевых методов. Волновые алгоритмы, в отличие от роевых, основаны на том, что «волны» распространяются от точки старта к точке финиша, постепенно покрывая все пространство поиска. Такой подход позволяет эффективно находить пути в сложных ландшафтах, но может быть вычислительно затратным. Гибридный подход, используемый в данном исследовании, призван объединить сильные стороны обоих методов, обеспечивая как эффективность поиска, так и приемлемое время вычислений. В разработанном алгоритме волновой метод используется для грубого определения потенциальных путей, после чего роевой алгоритм уточняет эти пути, избегая препятствий и оптимизируя общую длину траектории.

Ключевыми параметрами, определяющими эффективность предложенного гибридного алгоритма, являются длина полученной траектории, время, затраченное на ее вычисление, и, что крайне важно, безопасность движения вдоль этой траектории. Под безопасностью мы понимаем минимальное расстояние от траектории до препятствий. Оптимизация этих трех параметров – непростая задача, требующая тщательного подбора весовых коэффициентов в алгоритме. Цель исследования заключалась в определении такого оптимального соотношения параметров, при котором компромисс между длиной траектории, временем вычислений и безопасностью движения обеспечивает наилучшее решение задачи построения траектории подвижного объекта. Необходимо найти «золотую середину», позволяющую сформировать достаточно короткий и безопасный путь в приемлемые сроки.

Вторая цель состояла в оценке качества разработанного гибридного алгоритма. Разработанный для этого интегральный критерий, учитывающий все три упомянутых выше параметра – длину траектории, время вычислений и безопасность, позволил объективно сравнить эффективность созданного алгоритма с уже известными методами построения траектории. Сравнение проводилось на основе тестовых примеров, обозначенных как Ex1, Ex2, Ex3, Ex4 и Ex5. Каждый пример представлял собой отдельную сцену, содержащую различные препятствия, расположенные на поле размером 20 x 20 дискретов (подобластей). На рис. 4 приведены пояснения условных обозначений, которые применялись при проведении тестовых экспериментов.

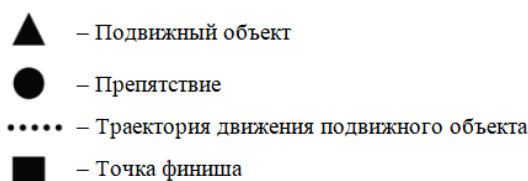


Рис. 4. Пояснения изображений используемых в тестовых примерах

Построение траектории заключается в выполнении следующих этапов (рис. 5):

1. Генерация зоны видимости.
2. Проведение анализа зоны видимости (обнаружение препятствий).
3. Исправление сетки графа в соответствии с обнаруженными препятствиями.
4. Нахождение кратчайшего пути по сетке графа.
5. Коррекция маршрута. Ближайшие к текущей позиции объекта узлы графа используются в качестве ориентира, позволяя объекту эффективно огибать препятствия. Это динамическое обновление траектории осуществляется каждый раз, когда объект попадает в новую область видимости, которая определяется через

заданный временной интервал или при обнаружении новых препятствий. Такой подход позволяет алгоритму адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды и обеспечивает более гибкое и эффективное построение траектории, особенно в динамических средах, где препятствия могут менять свое положение.

Таким образом, исследование охватило как разработку нового гибридного алгоритма, так и его всестороннюю оценку с использованием четко определенных критериев и тестовых примеров. Полученные результаты позволили выявить преимущества и недостатки предложенного подхода по сравнению с существующими методами, открыли новые возможности для дальнейших исследований в области планирования траекторий движения.

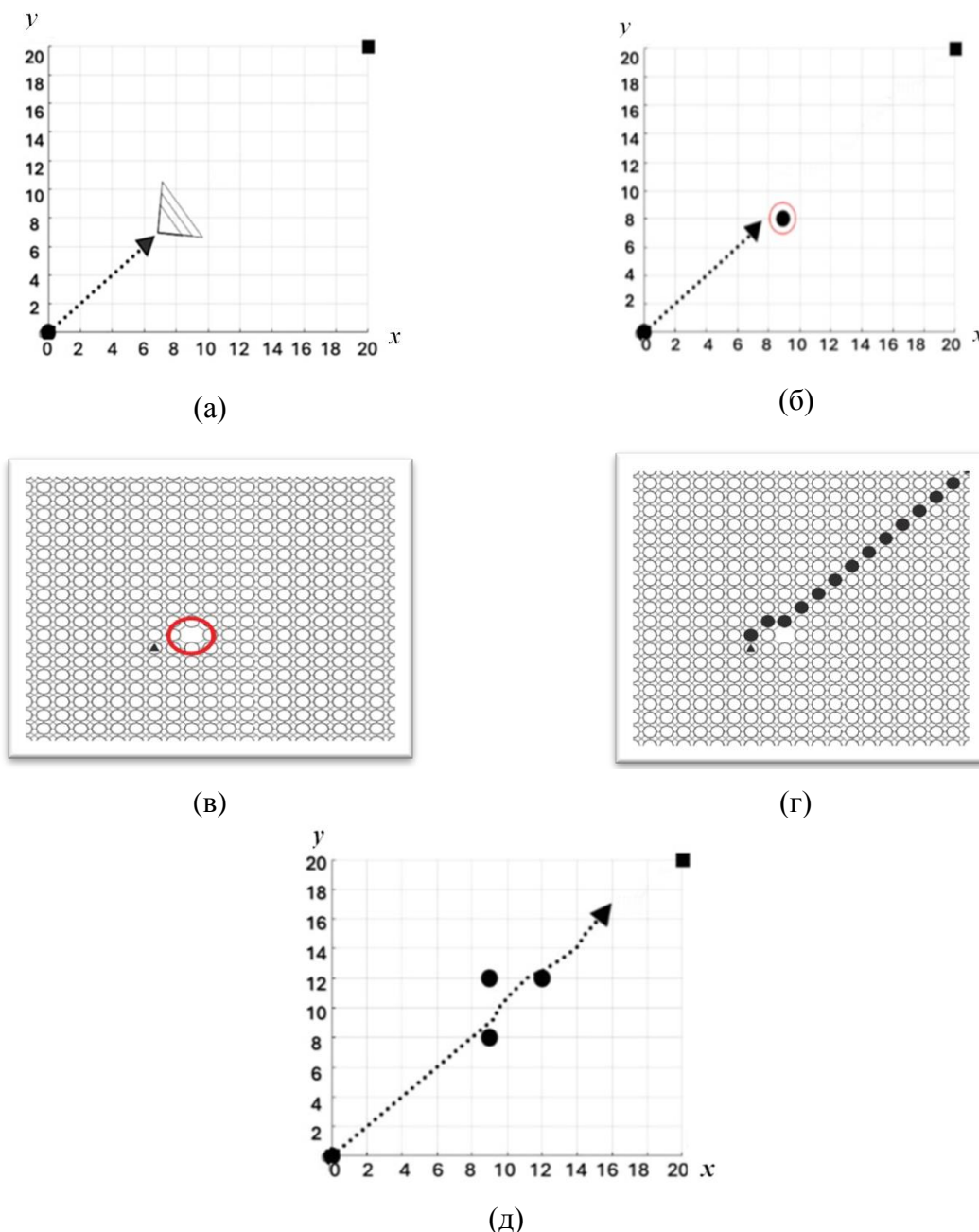


Рис. 5. Этапы построения траектории: генерация зоны видимости (а); обнаружение препятствий (б); исправление сетки графа (в); определение кратчайшего маршрута (г); коррекция маршрута (д)

В основе моделирования построения траектории для ПО лежит многокритериальная оптимизация, учитывающая несколько важных параметров. Ключевыми факторами, влияющими на качество траектории, являются показатель безопасности, длина траектории, время выполнения задания и коэффициент успешности миссии. Каждый из этих параметров имеет свой весовой коэффициент, отражающий его значимость в общей оценке.

Показатель безопасности (весовой коэффициент 20 %) определяется минимальным расстоянием между ПО и любым препятствием на протяжении всей траектории. Параметр критически важен, так как напрямую связан с риском столкновения. Чем больше это расстояние, тем безопаснее траектория. Минимизация риска столкновения является первостепенной задачей, особенно в условиях неопределенности и наличия непредвиденных препятствий. Низкое значение показателя безопасности свидетельствует о высокой вероятности аварийной ситуации, что недопустимо в большинстве приложений. В процессе оптимизации алгоритм стремится максимизировать данный показатель, обеспечивая необходимое расстояние между ПО и препятствиями. Это расстояние должно быть достаточно большим, чтобы учесть погрешности в работе датчиков, неточности в построении карты местности и возможные отклонения от заданной траектории.

Длина траектории (весовой коэффициент 20 %) – это общее расстояние, пройденное ПО от начальной точки до цели. Минимизация длины траектории способствует экономии энергии, времени и ресурсов. Однако стремление к кратчайшему пути может привести к снижению показателя безопасности, если кратчайший путь слишком близок к препятствиям. Поэтому оптимизация длины траектории должна осуществляться с учетом ограничения на минимальное расстояние до препятствий. Алгоритм должен находить баланс между кратчайшим путем и безопасностью движения.

Время выполнения задания (весовой коэффициент 20 %) – время, затраченное ПО на прохождение всей траектории. Этот параметр также важен, особенно в тех приложениях, где скорость выполнения является критическим фактором. Однако, как и в случае с длиной траектории, стремление к минимизации времени выполнения задания может повлечь за собой снижение показателя безопасности. Поэтому при оптимизации данного параметра следует учитывать ограничения на минимальное расстояние до препятствий и другие факторы, влияющие на скорость движения ПО (например, тип местности, характеристики ПО и наличие дополнительных задач).

Коэффициент успешности миссии (весовой коэффициент 40 %) – это, пожалуй, самый важный параметр, учитывающий вероятность успешного завершения движения в условиях неопределенности и наличия сложных препятствий. Он отражает надежность и способность алгоритма построения траектории адаптироваться к меняющимся условиям. Высокий коэффициент успешности миссии указывает на то, что алгоритм в состоянии успешно преодолевать препятствия и достигать цели даже в сложных и непредсказуемых ситуациях. Этот параметр учитывает вероятностные аспекты движения, и его оптимизация часто требует применения методов стохастической оптимизации. Рассмотрим процесс моделирования построения траектории на тестовых примерах.

Пример 1 демонстрирует ситуацию, когда отсутствует параметр, ограничивающий минимальное расстояние до препятствий. В результате ПО строит траекторию, проходящую опасно близко к препятствиям, что приводит к низкому показателю безопасности. Здесь подчеркивается важность явного задания ограничения на минимальное расстояние до препятствий для обеспечения безопасности движения.

Данные из этого примера (рис. 6, табл. 1) наглядно показывают критичность игнорирования параметра безопасности.

Пример 2. Препятствия представлены в виде окружностей (рис. 7), и ПО корректирует свою траекторию, избегая попадания в центр любой из них. Это демонстрирует адаптивность алгоритма к изменению условий окружающей среды и способность к локальной оптимизации траектории. Результаты, представленные в табл. 2, показывают, что эффективность алгоритма зависит от точности представления препятствий. **В реальных условиях точность модели препятствий может быть ограничена**, что необходимо учитывать при разработке алгоритма.

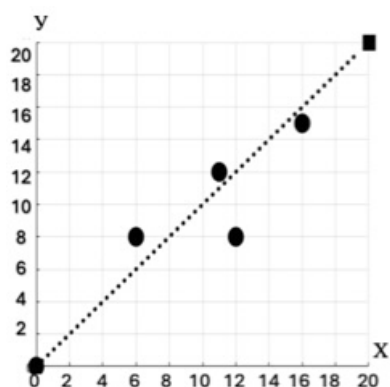


Рис. 6. Пример 1

Таблица 1. Анализ параметров по примеру 1

Показатель	Данные из источника (a)	Полученные данные (b)	Разница (a – b)
Безопасность, м	0,33	0,25	0,8
Траектория, м	29,42	27	2,42
Время, с	34,20	54	20,20
Успех миссии	1	1	-

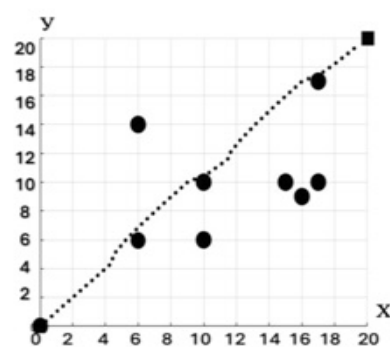


Рис. 7. Пример 2

Таблица 2. Анализ параметров по примеру 2

Показатель	Данные из источника (a)	Полученные данные (b)	Разница (a – b)
Безопасность, м	0,35	0,19	0,16
Траектория, м	29,47	27,5	1,97
Время, с	34,38	55	20,62
Успех миссии	1	1	-

Пример 3 иллюстрирует многошаговую корректировку траектории в ответ на обнаружение нескольких препятствий (рис. 8). Подвижный объект, обнаружив препятствие 1, корректирует траекторию, смещаясь влево. Однако после обнаружения препятствия 2 алгоритм пересчитывает траекторию с учетом нового положения ПО и препятствий, что приводит к смещению вправо. Этот сценарий показывает важность динамического перепланирования траектории в ответ на изменения окружающей среды. Данный пример показывает необходимость алгоритма, способного к перепланированию в реальном времени и адаптации к динамически меняющейся обстановке. Отсутствие такой адаптации может привести к «застреванию» ПО или столкновению с препятствиями. Анализ данных из примера 3 позволяет оценить эффективность алгоритма перепланирования траектории (табл. 3).

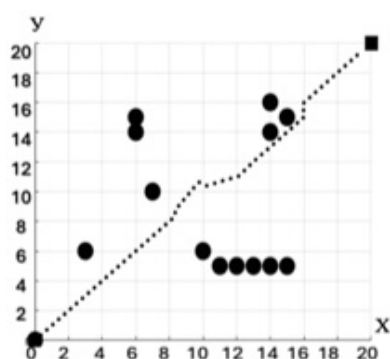


Рис. 8. Пример 3

Таблица 3. Анализ параметров по примеру 3

Показатель	Данные из источника (a)	Полученные данные (b)	Разница (a – b)
Безопасность, м	1,06	0,25	0,81
Траектория, м	29,35	28	1,35
Время, с	34,38	56	21,62
Успех миссии	1	1	–

Пример 4. Как и в примерах 1 и 2, маршрут пересекает препятствие из-за отсутствия параметра, определяющего допустимое приближение ПО к препятствию (рис. 9). Полученные данные примера 4 сведены в табл. 4.

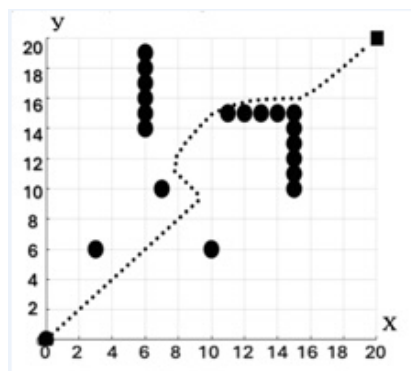


Рис. 9. Пример 4

Таблица 4. Анализ параметров по примеру 4

Показатель	Данные из источника (a)	Полученные данные (b)	Разница (a – b)
Безопасность, м	0,04	0,18	0,14
Траектория, м	34,17	30,5	3,67
Время, с	52,62	61	8,38
Успех миссии	1	1	–

Пример 5. Так же, как и в примерах 1, 2 и 4, траектория пересекает препятствие из-за отсутствия параметра, определяющего допустимое приближение ПО к препятствию (рис. 10). Данные примера 5 сведены в табл. 5.

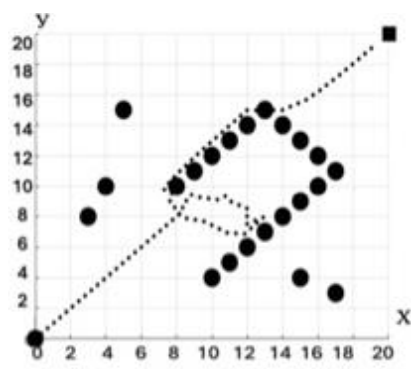


Рис. 10. Пример 5

Таблица 5. Анализ параметров по примеру 5

Показатель	Данные из источника (a)	Полученные данные (b)	Разница (a – b)
Безопасность, м	1,06	0,01	1,05
Траектория, м	42,68	41,5	1,18
Время, с	75,42	83	7,58
Успех миссии	1	1	–

В табл. 6 приведены усредненные значения используемых в работе параметров, в табл. 7 представлены нормированные значения параметров и их интегральная оценка.

Таблица 6. Усредненные значения параметров

Методы	Показатели			
	S _m	P _L	t _m	F
Метод потенциальных полей 1	0,104	0,019 75	0,015 93	0,6
Метод потенциальных полей 2	0,028	0,006 65	0,005 32	0,2
Метод потенциальных полей 3	0,37	0,032 05	0,025 93	1,0
Метод потенциальных полей 4	0,724	0,025 95	0,020 97	0,8
Метод потенциальных полей 5	0,344	0,02	0,163 3	0,6
Метод потенциальных полей 6	0,576	0,025 91	0,021 32	0,8
Метод диаграмм Вороного	0,44	0,020 52	0,017 28	0,6
Метод реактивной навигации	0,656	0,024 12	0,024 73	0,8
Метод управления с применением нечетких систем	0,495	0,025 07	0,012 53	1,0
DVN-метод в классическом базисе	0,068	0,031 3	0,070 08	1,0
DVN-метод в базисе формальных нейронов	0,068	0,031 3	0,070 08	1,0
Нейросетевой гибридный метод	0,076	0,031 7	0,037 95	1,0
Генетический поиск без картографии	0,074	0,013 53	0,011 03	0,4
Генетический поиск с картографией	0,565	0,030 94	0,023 73	1,0
Метод планирования с использованием неустойчивых режимов	0,317	0,020 32	0,019 64	0,8
Комбинированный метод планирования с использованием неустойчивых режимов и виртуальной целевой точки	0,838	0,025 76	0,016 75	1,0
Муравьиный метод	0,176	0,032 4	0,016 2	1,0

Таблица 7. Нормированные значения параметров и их интегральная оценка

Метод	Показатели				
	S _m	P _L	t _m	F	I
DVN-метод в классическом базисе	0,081 1	0,967 2	1,0	1,0	0,809 7
DVN-метод в базисе формальных нейронов	0,081 1	0,967 2	1,0	1,0	0,809 7
Комбинированный метод планирования с использованием неустойчивых режимов и виртуальной целевой точки	1,0	0,796 0	0,239 1	1,0	0,807
Генетический поиск с картографией	0,674 2	0,956 0	0,338 6	1,0	0,793 8
Метод потенциальных полей 3	0,441 5	0,990 3	0,370 0	1,0	0,760 4
Нейросетевой гибридный метод	0,907	0,979 5	0,541 5	1,0	0,722 3
Метод потенциальных полей 4	0,864	0,801 9	0,299 2	0,8	0,713
Метод управления с применением нечетких систем	0,590 4	0,774 7	0,178 8	1,0	0,708 8
Метод реактивной навигации	0,782 8	0,745 3	0,352 8	0,8	0,696 2
Муравьиный метод	0,210 0	1,0	0,230 9	1,0	0,668 2
Метод потенциальных полей 6	0,687 4	0,618 0	0,304 3	0,8	0,641 9
Метод планирования с использованием неустойчивых режимов	0,378 3	0,627 9	0,280 4	0,8	0,577 3
Метод диаграмм Вороного	0,525 1	0,634 1	0,246 5	0,6	0,521 1
Метод потенциальных полей 5	0,410 5	0,801 9	0,233 0	0,6	0,529 1
Метод потенциальных полей 1	0,124 1	0,610 3	0,227 3	0,6	0,432 3

Метод	Показатели				
	S_m	S_m	S_m	S_m	S_m
Генетический поиск без картографии	0,087 7	0,418 1	0,157 3	0,4	0,292 6
Метод потенциальных полей 2	0,033 4	0,205 5	0,075 9	0,2	0,143

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на достаточно большое количество разработанных моделей и алгоритмов управления ПО в условиях неопределенности, исследователи сталкиваются с рядом проблем, к числу которых относится трудность в обосновании качества результатов анализа с учетом специфики конкретной задачи. Одним из перспективных направлений является разработка гибридных методов. В гибридных (комбинированных) алгоритмах, объединяющих различные либо одинаковые алгоритмы, но с различными значениями свободных параметров, преимущества одного алгоритма могут компенсировать недостатки другого. Предложенный в статье гибридный алгоритм позволяет строить в реальном масштабе времени траектории минимальной длины с синхронной оптимизацией ряда других критериев качества построенного пути. Отличительная особенность данного алгоритма заключается в том, что перемещение ПО по траектории происходит практически одновременно с ее формированием (прокладкой) в текущем режиме времени. Моделирование построения траектории для ПО – сложная задача, требующая учета множества факторов и применения методов многокритериальной оптимизации. Успех ее решения зависит от правильного выбора весовых коэффициентов для каждого параметра и от разработки алгоритма, способного к адаптации к изменяющимся условиям и обеспечению высокой степени безопасности движения. Анализ результатов тестовых примеров позволяет оценить эффективность разработанного алгоритма и выявить области для дальнейшего улучшения.

Предложенная модернизированная методика пошагового проектирования траектории позволила повысить эффективность решения, что подтверждено результатами экспериментальных исследований. Было установлено, что значительное влияние на улучшение характеристик оказали использование адаптивного опорного вектора, задающего предпочтительное направление перемещения ПО, модернизированная методика пошагового проектирования траектории и подходы к формированию размеров, соотношению взаимного расположения и ориентации на местности локальной зоны видимости и регионов. Практическое применение описанной методики и методов проектирования траектории с учетом упомянутых факторов позволяют упростить конфигурацию траектории и минимизировать ее общую длину, в результате чего уменьшаются вычислительные затраты и время прохождения по маршруту. Источником усовершенствования может быть более детальная проработка вопросов, связанных с формированием ЛЗВ и выбором (сменой) текущих исходных позиций, что ускорит процесс достижения ПО целевого состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов Д.А., Гузик В.Ф., Косенко Е.Ю. [и др]. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / под ред. В.Х. Пшихопова. М.: Физматлит, 2014. 300 с.
2. Гузик В.Ф., Переверзев В.А., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В. Принципы построения экстраполирующего многомерного нейросетевого планировщика интел-

лектуальной системы позиционно-траекторного управления подвижными объектами // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2016. № 2 (175). С. 67–80.

3. Пшихопов 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: Сборник научных трудов XI Международной научно-технической конференции*. Переславль-Залесский: Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2022. Т. 1. 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. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. М.: Наука, 2011. 349 с.

9. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Гибридный алгоритм ситуационного планирования траектории на плоскости в условиях частичной неопределенности // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2018. № 1. С. 76–93.

10. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Планирование двухмерной траектории в условиях частичной неопределенности на основе интеграции волнового и муравьиного алгоритмов // *Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: Сборник трудов V Всероссийской Пospelовской конференции с международным участием* / под ред. А.В. Колесникова. Зеленоградск: БФУ им. И. Канта, 2020. С. 87–94.

11. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. Изд. 3-е, испр. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 448 с.

12. Бекетов С.М., Зубкова Д.А., Гинцяк А.М., Бурлуцкая Ж.В., Редько С.Г. Современные методы оптимизации и особенности их применения // *Russian Technological Journal*. 2025. Т. 13. № 4. С. 78–94.

13. Chen S., Eshaghian M. M. A fast recursive mapping algorithm // *Concurrency: Practice and Experience*. 1995. V. 7. № 5. С. 391–409.

14. Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Dynamic Formation of Robot Movement Route in Nondeterministic Environment with Bypassing Stationary and Nonstationary Obstacles // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2024. V. 34. № 3. P. 543–548.

15. 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 (242). С. 177–190.

16. Кузнецов А.В. Модель движения и взаимодействия системы интеллектуальных агентов // *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2018. № 2. С. 130–138.

17. Байгутлина И.А. Реализация новых сервисов с использованием робототехнических комплексов // *Славянский форум*. 2021. № 4 (34). С. 162–170.

18. Морозова Н.С. Децентрализованное управление движением строя роботов при динамически изменяющихся условиях // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2015. № 1. С. 65–74.

19. Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление движением группы мобильных роботов в колонне // *Информатизация и связь*. 2021. № 3. С. 7–11.

20. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // *Современная мехатроника: Сборник научных трудов Всероссийской научной школы*. 2011. С. 35–51.

21. Успанова Р.А. Актуальные проблемы управления группой БПЛА // *Молодежь. Техника. Космос: Труды тринадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции: в 2 т. Сер.: Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»*. СПб.: Военмех, 2021. Т. 1. № 76. С. 128–130.

Для цитирования: Бесхмельнов М.И., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Моделирование построения траектории подвижного объекта на основе методов многокритериальной оптимизации // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 3 (27). С. 103–119.

MODELING THE CONSTRUCTION OF A MOBILE OBJECT'S TRAJECTORY BASED ON MULTICRITERIAL OPTIMIZATION METHODS

M.I. BESKHMELNOV, Lecturer, B.K. LEBEDEV, Dr. Sc.,
O.B. LEBEDEV, Dr. Sc.

MIREA – Russian Technological University,
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, e-mail: beshmelnov@mirea.ru

This paper presents a detailed analysis of a hybrid route planning algorithm designed for navigation in two-dimensional space taking into account partial uncertainty in terrain information. This innovative approach combines the advantages of the wave algorithm and the ant colony algorithm, which allows for the efficient construction of the shortest trajectories in real time, while simultaneously optimizing other important route parameters, such as avoiding difficult sections or taking into account preferred terrain types. The algorithm operates in stages, alternating the processes of constructing a trajectory section and the actual movement of an object along it. Each planning stage is divided into two levels. At the first level, a local visibility zone of the object is formed and the region covered by it is determined on the map. Then, sequentially, step by step, the algorithm builds a chain of interconnected regions, each of which contains information about localized obstacles. The second level of the algorithm is responsible for creating a set of possible trajectories for the object to pass through each of the regions identified at the first level. An important feature is the use of the ant algorithm at this stage, which allows one to effectively explore the space of options and find optimal paths that minimize various criteria, including path length.

Keywords: trajectory, algorithm, situational planning, partial uncertainty, local visibility zone, moving object.

Поступила в редакцию/received: 21.04.2025; после рецензирования/revised: 24.04.2025;
принята/accepted: 30.04.2025