

Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев**МЕТОДЫ СБОРА ДАННЫХ СРЕДСТВАМИ БПЛА ПРИ МОНИТОРИНГЕ
ТРУДНОДОСТУПНОЙ МЕСТНОСТИ**

Предложены методика и метод построения модели исследуемой территории в виде конечной совокупности покрывающих ее зон (участков), отличающиеся тем, что все участки имеют форму прямоугольников. В работе рассматриваются методы формирования на поле большой площади минимального набора участков, полностью покрывающих доступную территорию, исследуемую датчиками беспилотных летательных аппаратов. Размеры, ориентация и взаимное расположение участков направлены на минимизацию времени их исследования. В общем случае маршрут М представляет последовательную совокупность линейных отрезков. Разбиение маршрута М на отрезки осуществляется с помощью множества опорных точек Р. Разработана методология и алгоритм построения оптимального маршрута беспилотного летательного аппарата, на основе метода муравьиной колонии. Разработаны механизмы управления перемещениями беспилотного летательного аппарата по маршруту. В общем случае маршрут М представляет последовательную совокупность линейных отрезков. Отрезок пути (траектории маршрута) беспилотного летательного аппарата над исследуемым участком территории, подвергаемым сканированию (исследованию), назван рабочим, а отрезок пути (траектории) беспилотного летательного аппарата над территорией, не подвергаемой сканированию, (исследованию) называется холостым. В общем случае маршрут представляет чередующуюся последовательность рабочих и холостых отрезков, поочередно сменяющих друг друга. Разработана методология и алгоритм перемещения беспилотного летательного аппарата между опорными точками отрезка, соответствующими опорным точкам. Процедура поиска решения представляется в виде двух алгоритмов: алгоритм 1 поведения муравьиной колонии; алгоритм 2 поведения агента. Процесс перемещения беспилотного летательного аппарата по маршруту в реальных условиях поддерживается блоком адаптации. Задача блока адаптации обеспечить управление перемещением беспилотного летательного аппарата вдоль опорной линии по маршруту. Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени производится перепланирование параметров движения беспилотного летательного аппарата, движущегося параллельно к опорному вектору. Адаптация беспилотного летательного аппарата сводится к адаптации значений параметров управления. Предложена структуры маневров, выполняемых беспилотными летательными аппаратами для коррекции отклонений параметров. Задача адаптации состоит в том, чтобы сформировать в автомате адаптации последовательность адаптирующих воздействий, экстремизирующих показатели качества получаемых решений (критерии адаптации). В качестве объекта адаптации служат набор параметров непрерывного управления полетом: отклонение беспилотного летательного аппарата от опорной линии; угол между вектором перемещения беспилотного летательного аппарата и опорной линией текущего участка; высота полета беспилотного летательного аппарата над текущим участком. Адаптация беспилотного летательного аппарата сводится к адаптации значений параметров управления.

Система управления; беспилотные летательные аппараты; мониторинг территории; маршрут; коллективная альтернативная адаптация; мультиагентная система.

B.K. Lebedev, O.B. Lebedev**METHODS OF DATA COLLECTION BY UAVS WHEN MONITORING
HARD-TO-REACH TERRAIN**

This paper proposes a methodology and method for constructing a model of the study area as a finite set of zones (sections) covering it, characterized by the fact that all sections are rectangular. The paper examines methods for forming a minimal set of sections on a large field that completely cover the accessible territory surveyed by unmanned aerial vehicle (UAV) sensors. The size, orientation, and relative positions of the sections are aimed at minimizing their survey time. In general, a route M is a sequential set of linear segments. Route M is divided into segments using a set of control points P. A methodology and algorithm for constructing an optimal UAV route based on the ant colony method have been developed. Mechanisms for controlling the UAV's movements along the route have been developed. In general, a route M is a sequential set of linear segments. A segment of the UAV's path (trajectory) over a surveyed

area of territory being scanned (explored) is called a working segment, while a segment of the UAV's path (trajectory) over a non-scanned (explored) area is called a dummy segment. Generally, a route is an alternating sequence of working and dummy segments, replacing each other. A methodology and algorithm for moving an UAV between reference points of a segment corresponding to reference points have been developed. Two algorithms represent the solution search procedure: Algorithm 1, which describes the behavior of an ant colony; Algorithm 2, which describes the behavior of an agent. An adaptation unit supports the process of moving an UAV along a route in real-world conditions. The adaptation unit's task is to control the UAV's movement along a reference line along the route. The control method involves replanning the motion parameters of an unmanned aerial vehicle (UAV) moving parallel to a reference vector at each moment during flight. Adaptation of the UAV consists of adapting the control parameter values. A structure of maneuvers performed by UAVs to correct parameter deviations is proposed. The adaptation task consists of generating a sequence of adaptive actions in the adaptation machine that extremize the quality indicators of the resulting solutions (adaptation criteria). The adaptation object is a set of continuous flight control parameters: the UAV's deviation from the reference line; the angle between the UAV's motion vector and the reference line of the current segment; and the UAV's flight altitude above the current segment. Adaptation of the UAV consists of adapting the control parameter values.

Control system; unmanned aerial vehicles; territory monitoring; route; collective alternative adaptation; multi-agent system.

Введение. Одним из активно развивающихся направлений робототехники является синтез алгоритмов управления роботами, которые выполняют общую поставленную задачу. Мобильные автономные системы для решения различного типа задач стали одним из признаков современности. Разработкой данных систем занимаются коллективы различных стран. Использование мобильных роботов является обоснованным в различных ситуациях, связанных с автоматизацией производства.

Мобильные роботы применяются в промышленности, логистике, сельском хозяйстве и при ликвидации последствий ЧС, поскольку они необходимы для выполнения работ в опасных или труднодоступных для человека условиях [1–4]. В этих условиях особенно важно создавать алгоритмы управления поведением роботов, способных адаптироваться к динамике среды и неопределенности исходных данных.

В последнее время для мониторинга состояния труднодоступной местности в качестве мобильных узлов сбора данных для передачи информации используют сети датчиков, расположенных на БПЛА (беспилотных летательных аппаратов) и наземных беспилотных роботов (НБР). БПЛА и НБР используются для обеспечения автоматического высокоточного сбора данных на территории местности.

БПЛА и НБР осуществляет мониторинг на местности: поиск места крушения самолета (объекта на местности), исследование состояния местности после землетрясения, поиск пропавшей группы (человека), поиск очага возгорания, сход геля, наводнения.

Сначала БПЛА определяет вероятностные области катастрофы, потом уточняется результат поиска. Область разбивается на подобласти, а затем выполняется последовательное разбиение области на участки. После информации, полученной от БПЛА наземный НБР отправляется к найденному беспилотным летательным аппаратом вероятному месту поиска из пункта отправления и выполняет доставку груза, оборудования, в условиях бездорожья и отсутствия спроектированных маршрутов и траекторий между пунктами отправления и доставки. После обнаружения БПЛА искомого объекта исследований часто возникает потребность в тщательном исследовании объекта. в этом случае организуется доставка объекта на базу с помощью наземных транспортных средств.

Методология и методы сбора данных сенсорными узлами БПЛА и НБР основана на дистанционном исследовании. Способность БПЛА к полету позволяет им быстро в непосредственной близости от объекта перемещаться, обходя препятствия на местности. Возможны два варианта использования БПЛА для мониторинга: последовательный и параллельно-последовательный. Вся территория разбивается на примерно равные области. Первый вариант предусматривает последовательное исследование областей.

При втором варианте области исследуются параллельно группой БПЛА независимо друг от друга, каждая область исследуется отдельными БПЛА. После завершения исследования областей производится объединение собранной информации.

Сенсорный узел выполняет функции сбора информации, её первичной обработки и передачи по беспроводному каналу [5–7]. Основная особенность сенсорных узлов заключается в совмещении в узле приёмопередатчика и измерительного датчика. Датчики – это «органы чувств» роботов, которые помогают им воспринимать окружающий мир. Они фиксируют изменения среды (свет, звук, давление) и преобразуют их в электрические сигналы для обработки.

Технология работает следующим образом: датчик БПЛА передает высокочастотное излучение, которое отражается от поверхности земли. Отраженные электромагнитные волны имеют различную поляризацию и преломление в зависимости от состояния поверхности. Эти характеристики воздействуют на электропроводность, которая измеряется приемником БПЛА. Полученные данные после обработки позволяют определить параметры поверхности. Система навигации обеспечивает непрерывное планирование траектории полета [8].

БПЛА осуществляет сбор данных, следуя по определенному маршруту, проходя через узлы маршрута. В данной статье рассматриваются структура и методы построения маршрута, обеспечивающей эффективный сбор данных сенсорными датчиками БПЛА, с распределенных участков территории. Маршрут БПЛА должен быть спроектирован так, чтобы БПЛА последовательно «посещал» участки территории, состояние которых фиксируется сенсорами, установленными на БПЛА.

Основные этапы работы:

- ◆ Представление исследуемой территории в виде конечной совокупности покрывающих ее зон (участков). Решается задача формирования минимального количества участков, полностью покрывающих исследуемую территорию.
- ◆ Разработка методологии и метода построения оптимальной траектории БПЛА, проходящей через все участки.
- ◆ Разработка механизмов управления перемещениями БПЛА по траектории.

Формирование множества базовых участков $U=(u_i, i=1,2,...,n)$, $|U|=n$ на поле исследуемой территории датчиками БПЛА зависит от технических возможностей. Чем больше мы увеличиваем радиус r покрытия окрестности сигналом датчика беспилотного летательного аппарата, тем шире становится его зона охвата окрестности. В то же время, суммарная длина маршрута, сформированного для сбора данных в определенной области, уменьшается, то есть маршрут становится короче.

Маршрут и модель движения БПЛА по маршруту разрабатывается с учётом радиуса покрытия поверхности сенсорами.

Цель исследования заключается в разработке эффективных алгоритмов планирования маршрута при минимально возможной длине маршрута и минимальном времени прохождения маршрута, обеспечивающих полное исследование территории сенсорами БПЛА и разработке адаптивных механизмов перемещения БПЛА в реальных условиях по заданному маршруту.

Разбиение исследуемой территории на множество участков. Как правило, основная задача, возлагаемая на комплексы БПЛА – проведение разведки труднодоступных районов, в которых получение информации обычными средствами, включая авиаразведку, затруднено или же подвергает опасности здоровье и даже жизнь людей.

Постановка задачи для БПЛА – это четкое определение целей, условий полета, маршрута и полезной нагрузки (камера, датчики) для выполнения миссии, например мониторинга местности. Она включает выбор типа БПЛА, расчет траектории, времени полета и действий при нештатных ситуациях, обеспечивая автоматический или полуавтоматический режим работы.

Любая из подсистем БПЛА (наблюдение, связь, электропитание, энергообеспечение) является производной, заимствованной из смежной отрасли и в данной работе не рассматриваются. Конечными целями являются разведка и мониторинг (фото/видеосъемка) местности, картография.

В качестве объектов воздействия рассматриваются координаты целей, границы области мониторинга или конкретные объекты для инспекции.

Основные критерии – минимизация времени полета, полнота покрытия территории. Необходимо построить оптимальный маршрут с учетом возможных препятствий.

Для решения поставленных задач в работе используются элементы алгоритмов управления: поиска пути в пространстве, коллективная альтернативная адаптации, навигация и управление при полете по заданной траектории, стабилизацию углов ориентации аппарата в полете.

На начальном этапе мониторинга местности производится первичный обзор местности с помощью БПЛА и формируются границы территории для более тщательных исследований. Выбранная для исследования исходная территория T в пределах заданных границ может быть неоднородной и включать области не доступные для их мониторинга средствами БПЛА в силу их физических свойств (болота, участки, покрытые густой зарослью и т.д. После анализа исходной территории на ее базе формируются контуры территории, доступной для мониторинга. За каждой территорией закрепляются два робота: БПЛА и наземный робот БНР. На основе первичной информации определяется район исследований, который разбивается по карте местности на участки [9, 10].

Задача минимизации общего пути беспилотного летательного аппарата основана на дистанционном измерении характеристик поверхности земли с помощью беспилотных летательных аппаратов.

В работе рассматриваются методы формирования на поле большой площади минимального набора участков, полностью покрывающих доступную территорию, в которых датчики БПЛА снимают информацию. Размеры, ориентация и взаимное расположение участков направлены на минимизацию времени их исследования [9–11].

Рабочее пространство исследуемой территории представляет собой прямоугольную область $\Omega = [0, L_x] \times [0, L_y] \subset R^2$ в двумерной системе координат, где $L_x, L_y > 0$ – размеры области в условных единицах длины (у.е.). Область Ω разбивается вертикальными линиями на полосы (рис. 1) заданной ширины. В зависимости от состояния и свойств рельефа территории в составе каждой полосы определяется зоны недоступные для исследования. Недоступные зоны исключаются из рассмотрения. Таким образом, каждая полоса распадается на множество доступных $U = \{u_i | i=1, \dots, n_u\}$ и недоступных участков. Недоступный участок помечен знаком Θ . Участки нумеруются от 1 до n . Определяются границы k_i^1 и k_i^2 от начала и до конца каждого участка u_i в составе полосы и их координаты. Каждый доступный участок $u_i \in U$ ограничен двумя концами k_i^1 и k_i^2 . Верхний индекс – номер конца участка, нижний индекс – номер участка. Расположение k_i^1 и k_i^2 на участке u_i фиксировано. Поскольку расположение всех участков на территории фиксировано, то и оба конца k_i^1 и k_i^2 каждого участка u_i имеют фиксированные координаты размещения на исследуемой территории. На рис. 1 приведена модель территории.

Формируется исходное множество $K = \{k_i^\alpha | \alpha=1,2; i=1, \dots, n\}$ концов k_i^1 и k_i^2 участков u_i . Обозначим координаты позиций, занимаемыми концами участка u_i : для k_i^1 как (x_{1i}, y_{1i}) ; для k_i^2 , как (x_{2i}, y_{2i}) . У всех u_i : $y_{1i} < y_{2i}$; $x_{1i}^2 = x_{2i}^2$, рис. 2.

По середине каждого участка $u_i \in U$ проводится виртуальная опорная линия l_i , ограниченная двумя концами k_i^1 и k_i^2 . Опорная линия l_i в двумерном пространстве, служит ориентиром для БПЛА, при его перемещении на высоте z вдоль линии в двумерном пространстве от одного конца участка к другому, в целях полного покрытия участка сигналом сенсора БПЛА.

БПЛА движется на постоянной высоте (то есть $z=h$) в двумерной системе координат. В каждый момент времени t его положение определяется координатами $(x(t), y(t))$ и постоянной координатой z .

Исследуемая территории (объект исследования) описывается в двумерной системе координат. Основная задача – построение маршрута в двумерной системе координат.

В работе маршрут M представляет последовательную совокупность линейных отрезков в двумерной системе координат. Разбиение маршрута M на отрезки осуществляется с помощью множества опорных точек $P = \{p_v | v=1, 2, \dots, n_p\}$. Каждый отрезок маршрута связывает опорные точки (p_v, p_{v+1}) . Каждая опорная точка соответствует определенному концу участка.

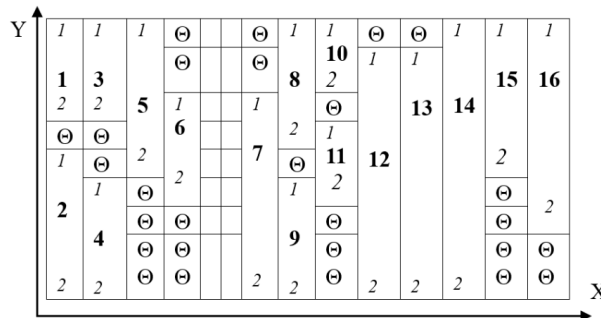


Рис. 1. Рабочее пространство исследуемой территории

i	1				2				3				4				5			
k	k_i^1		k_i^2		k_i^1		k_i^2		k_i^1		k_i^2		k_i^1		k_i^2		k_i^1		k_i^2	
	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1	x_1	y_1
	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i

Рис. 2. Координаты концов k_i^1 и k_i^2 участков u_i

На рис. 1 исследуемой территории 16 участков. Последовательность исследуемых участков определяется в процессе движения БПЛА по маршруту в двумерной системе координат. Каждый из концов k_i^1 и k_i^2 участка могут служить точкой входа или выхода из участка. Возникает проблема выбора конца входа в участок. Второй конец участка служит выходом в последующий участок. Возможны четыре варианта (рис. 3.)

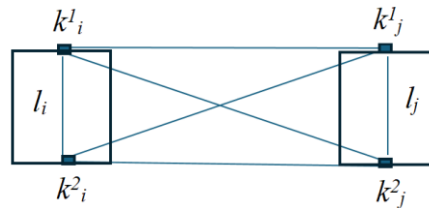


Рис. 3. Варианты перехода БПЛА между соседними участками в маршруте

Между множеством концов K и сформированным множеством опорных точек P построенного маршрута устанавливается взаимно однозначное соответствие $f: K \rightarrow P$. $f(k) = p$. Для всех участков территории каждому концу $k_i \in K$ участка соответствует некоторая опорная точка p_i маршрута с фиксированными координатами концу k_i и наоборот. Третья координата у всех опорных точек равна высоте полета БПЛА. Линейный отрезок маршрута БПЛА над участком территории u_i между концами k_i^1 и k_i^2 одного участка, подвергается сканированию (исследованию), назовем рабочим, а линейный отрезок маршрута БПЛА, над не подвергаемой сканированию (исследованию) территорией, назовем холостым [12].

В общем случае маршрут представляет чередующуюся последовательность n рабочих и $(n-1)$ холостых отрезков, поочередно сменяющих друг друга.

Вариант маршрута, представленной на рис. 1 имеет вид:

$(11, 12) \leftrightarrow (21, 22) \leftrightarrow (42, 41) \leftrightarrow (32, 31) \leftrightarrow (51, 52) \leftrightarrow (62, 61) \leftrightarrow (71, 72) \leftrightarrow (92, 91) \leftrightarrow (112, 111) \leftrightarrow (82, 81) \leftrightarrow (101, 102) \leftrightarrow (121, 122) \leftrightarrow (132, 131) \leftrightarrow (141, 142) \leftrightarrow (152, 151) \leftrightarrow (161, 162)$, где большая цифра обозначает номер участка. Графическое изображение маршрута представлено на рис. 4.

БПЛА перемещаясь от начальной точки по маршруту последовательно и в порядке очереди просматривает участки. В пределах каждого участка u_i робот перемещается над участком от одного конца к другому концу участка.

БПЛА рассматривается как мобильный узел, имеющий динамическую зону покрытия радиусом r и соответственно ширина покрываемой полосы равна $2r$.

Площадь покрытия представляет собой прямоугольник и напрямую зависит от расстояния l перемещения БПЛА вдоль полосы, радиуса сигнала r и определяется как $Q=l \cdot 2r$, где l – это расстояние между двумя концами участка, пройденное БПЛА вдоль участка полосы; ширина $2r$ – удвоенный радиус сигнала.

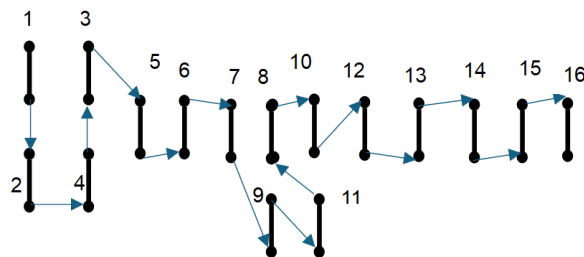


Рис. 4. Графическое представление траектории

Зона покрытия формируется в процессе перемещения БПЛА. При этом границы охвата сигнала расширяются по направлению движения [13, 14].

Робот при перемещении вдоль участка не должен отступать от опорной линии на величину больше δ для исключения недопустимого сдвига зоны покрытия.

Построения оптимальной траектории полёта беспилотного летательного аппарата. Маршрут робота задается упорядоченным списком концов участков, разбивающих маршрут на отрезки. Маршрут БПЛА должен быть спроектирован так, чтобы он последовательно посещал все участки [15].

Предложенные методы направлены на минимизацию длины маршрута, так как реализация любого поворота БПЛА требует замедления перемещения БПЛА по маршруту перед поворотом. БПЛА рассматривается как мобильный узел, имеющий динамическую зону покрытия радиусом r и соответственно ширина покрываемой полосы равна $2r$. Вариант построенной траектории можно увидеть на рис. 2.

В данной статье рассматриваются методы построения оптимальной траектории БПЛА, обеспечивающие эффективный сбор данных датчиками БПЛА с распределенных участков территории. Предложенные методы направлены на минимизацию длины маршрута и полное покрытие участков зонами датчиков за счет учета их радиуса действия.

Для построения оптимальной траектории БПЛА, обеспечивающей эффективный сбор данных датчиками БПЛА с распределенных участков территории, разработан алгоритм на основе модифицированного метода муравьиной колонии. Предложенный метод направлен на минимизацию длины маршрута и полное покрытие участков зонами датчиков за счет учета их радиуса действия и зависимости от их ориентации [16].

Процесс поиска решений итерационный. Каждая итерация l включает три этапа. На первом этапе каждой итерации каждый агент находит решение (строит маршрут на графе $G(X, E)$), определяется оценка решения. На втором этапе каждый агент откладывает феромон в накопительные ячейки, соответствующие ребрам маршрута. Количество феромона, откладываемого агентом на ребрах маршрута, пропорционально оценке маршрута. После построения всеми агентами маршрутов феромон, накопленный в накопительных ячейках добавляется в ячейки основной памяти. На третьем этапе осуществляется испарение феромона в ячейках памяти. Завершается итерация определением лучшего решения, найденного на этой итерации, и лучшего решения среди всех итераций. Формирование k -м муравьем маршрута осуществляется последовательно (пошагово).

Рассмотрим процесс построения агентом маршрута M на множестве участков $U=\{u_i | i=1, 2, \dots, n_u\}$. Формируется исходное множество $K=\{k_i^\alpha | \alpha=1, 2; i=1, \dots, n\}$ всех концов множества участков U .

Построение маршрута по шагам начинается с участка u_i . $t=1$. Определяется координаты начальной p_{1i} и конечной p_{2i} точек рабочего отрезка маршрута, пролегающего над участком u_i , соответствующие его концам. p_{1i} – концу k^1_i . p_{2i} – концу k^2_i , (рис. 5).

После перемещения БПЛА над рабочим участком u_i от точки p_{1i} до точки p_{2i} , точка p_{2i} объявляется аттрактором. Далее среди всех концов (k^1_i и k^2_i), не пройденных роботом рабочих участков, выбирается ближайший к аттрактору p_{2i} свободный конец участка u_j , который помечается как p_{1j} . Холостой отрезок c_{ij} маршрута между точками (p_{2i} , p_{1j}) соответствует пути перелета робота с участка u_i на участок u_j .

Для построенной части маршрута $M = \langle p_{1i}, p_{2i}, p_{1j}, p_{2j}, p_{2k}, p_{1k}, p_{2m}, p_{1m}, \dots \rangle$.

$$MC = \langle u_i, c_{ij}, u_j, c_{jk}, u_k, c_{km}, u_m \dots \rangle.$$

Мониторинг очередного участка u_i выполняется в процессе перемещения БПЛА от одного конца участка к другому. После мониторинга роботом участка u_i осуществляется выбор ближайшего конца (k^1_i или k^2_i) следующего участка u_j , который рассматривается как начальная точка перемещения над участком.

Таким образом, маршрут должен быть спроектирован так, чтобы БПЛА последовательно посещал все участки и собирал данные. Маршрут робота задается упорядоченным списком концов участков [17].

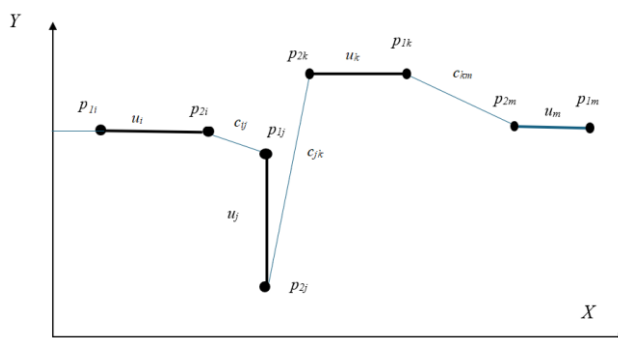


Рис. 5. Формирование маршрута

В состав общей длины S маршрута M входят суммарная длина S_1 рабочих и суммарная длина S_2 холостых отрезков маршрута перемещений робота между рабочими участками. $S = S_1 + S_2$. Суммарная длина S_1 рабочих отрезков маршрута постоянна. Суммарная длина S_2 перемещений робота между участками (холостых отрезков) зависит от порядка обхода участков и варианта стыковки смежных участков в составе маршрута. Используются два режима перемещения робота по маршруту M .

Первый режим заключается в перемещении робота над участком и сопровождается процессом сканирования данных.

Второй режим заключается в перемещении робота между двумя смежными участками в маршруте без сканирования территории.

БПЛА перемещается по прямой и имеет возможность снимать данные, находясь в пределах радиуса радиовидимости. В каждый момент времени t его положение определяется координатами $(x(t), y(t))$.

Суммарная длина непроизводительных перемещений зависит от выбранного маршрута робота.

В данном исследовании предлагается алгоритм, который обеспечивают решение задачи оптимизации траектории методом муравьиной колонии [18].

Для упрощения и повышения эффективности вычислительных процессов вместо двузначной индексации концов (границ) участков автором предложена однозначная индексация. Всего участков – n . На каждом участке две границы (два конца) k^1_i и k^2_i . Следовательно всего $2n$ концов. Представим разбитый на пары список концов в виде упорядоченной последовательности $K^* = k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, \dots, k_{2n-1}, k_{2n}$. Список разбивается на пары: $K^* = (k_1, k_2), (k_3, k_4), (k_5, k_6), \dots, (k_{2n-1}, k_{2n})$. $|K^*| = 2n$.

Двум концам каждого участка u_i соответствует пара (k_b, k_{b+1}) рядом стоящих элементов списка K^* . Причем у первого элемента k_b пары индекс b нечетный, а у второго элемента k_{b+1} пары индекс $(b+1)$ четный. Элемент с нечетным индексом соответствует первому концу участка, а элемент с четным индексом соответствует второму концу участка. Номер i участка определяется как частное от деления индекса второго элемента пары на два. В общем случае конец имеет вид k_{i-} , например, пусть (k_3, k_4) – пара списка K^* . k_3 соответствует первому концу участка u_i , k_4 – второму концу участка u_i , $i=4/2$. Следовательно паре (k_3, k_4) списка K^* соответствует пара концов (k_1^1, k_2^2) ; паре (k_5, k_6) – соответствует пара концов (k_3^1, k_2^2) .

Поиск решения задачи выполняется на полном графе решений $G(X, E)$, где $X=\{x_i | i=1, 2, \dots, 2n\}$ – множество вершин соответствует множеству K^* концов участков, а $E=\{e_{ij} | i=1, 2, \dots, 2n; j=1, 2, \dots, 2n\}$ – множество ребер полного графа, соответствующих отрезкам маршрутов между концами участков [18, 19]. Решение представляется в виде некоторого маршрута M , включающего все вершины на графе решений $G(X, E)$.

Формируется матрица $R=||r_{ii}||_{2n \times 2n}$ расстояний между концами всех участков, где n – число всех участков (рис. 6). Значением элемента r_{ij} является длина расстояния между концами i и j .

Между множеством I_c , $(|I_c|=2n)$ номеров $i \in I_c$ строк матрицы R и множеством имен концов K , $|K|=2n$ устанавливается взаимно однозначное соответствие: $f1: K \rightarrow I_c$, $k=f1(i)$, $i \in I_c$, $k \in K$.

Между множеством J_c , $(|J_c|=2n)$ номеров $j \in J_c$ строк матрицы R и множеством имен концов K , $|K|=2n$ устанавливается взаимно однозначное соответствие: $f2: K \rightarrow J_c$, $k=f2(j)$, $j \in J_c$, $k \in K$, рис. 6. Отметим, что расстояние между двумя концами одного участка принимается равным нулю.

Рассмотрим предлагаемый муравьиный алгоритм построения маршрута передвижения БПЛА.

В начале формируется модель территории. Выбирается стартовый участок. Работа муравьиного алгоритма базируется на использовании коллективной эволюционной памяти (КЭП).

Классическая формулировка муравьиного алгоритма включает процедуру отложения феромона в феромонных точках, в качестве которых обычно служат ребра графов. В качестве коллективной эволюционной памяти (КЭП) используется матрица $\Delta=||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$ в которой для каждого ребра e_{ij} полного графе решений $G(X, E)$, хранится оценка степени пригодности δ_{ij} , определяемая количеством отложенного на ребре феромона.

В начальной части МА для откладывания феромона формируется множество $\Phi=\{\varphi_{ij}\}$ феромонных точек, соответствующих ребрам графа $G(X, E)$. Между Φ и E установлено соответствие $f3: \Phi \rightarrow E$; $\varphi_{ij}=f3(e_{ij})$. $e_{ij} \in E$ – ребро, связывающее концы k_i и k_j участков графа $G(X, E)$. Множество ребер E соответствует множеству связей между концами участков (множество холостых отрезков маршрута).

Матрица $R=||r_{ii}||_{2n \times 2n}$

	i	1		2		3		4		5	
i	k	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2	k_1	k_2
1	k_1			•	•	•	•	•	•	•	•
	k_2			•	•	•	•	•	•	•	•
2	k_1	•	•			•	•	•	•	•	•
	k_2	•	•			•	•	•	•	•	•
3	k_1	•	•	•	•			•	•	•	•
	k_2	•	•	•	•			•	•	•	•
4	k_1	•	•	•	•	•	•			•	•
	k_2	•	•	•	•	•	•			•	•
5	k_1	•	•	•	•	•	•	•	•		
	k_2	•	•	•	•	•	•	•	•		

Рис. 6. Макет матрицы расстояний между концами всех участков

Процесс поиска решений итерационный. Выполняется в виде двух итерационных процессов – внешнего и внутреннего, вложенного во внешний (рис. 7).

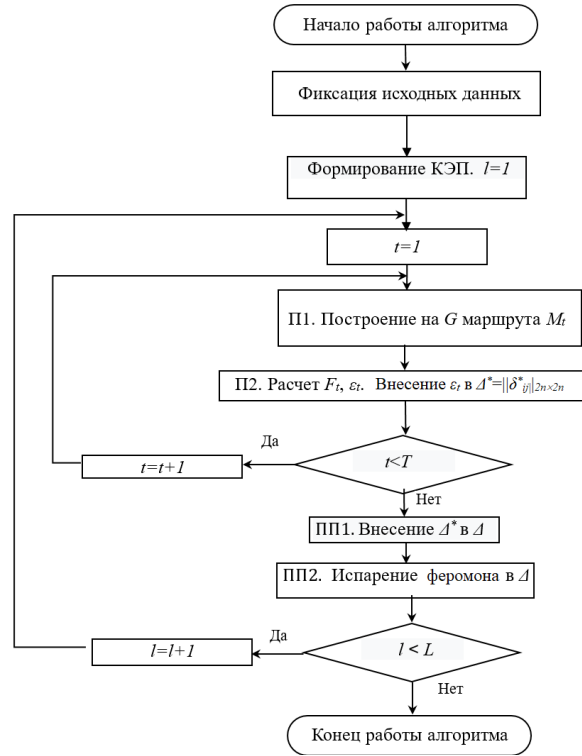


Рис. 7. Структурная схема муравьиного алгоритма

На каждой итерации l внешнего цикла последовательно выполняются процедуры внутреннего цикла и две постпроцедуры ПП1 и ПП2.

На каждой итерации t внутреннего цикла агентом z_t последовательно одна за другой выполняются две процедуры П1 и П2. С помощью процедуры П1 каждый агент z_t строит конструктивным алгоритмом маршрут M_t БПЛА. Определяется множество E_t холостых ребер, входящих в построенный агентом маршрут M_t .

С помощью процедуры П2 агент z_t рассчитывает оценку F_t маршрута M_t и откладывает соответствующее оценке F_t количество феромона ε_t в накопительную матрицу $\Delta^* = ||\delta^*_{ij}||_{2n \times 2n}$ на ребра множества E_t .

В работе используется циклический (ant-cycle) метод муравьиных систем. В этом случае феромон откладывается в ячейки матрицы памяти $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$, соответствующие ребрам маршрута – после полного формирования всеми агентами решений на текущей итерации l . Для накопления феромона, откладываемого агентами на текущей итерации l , используется накопительная матрица $\Delta^* = ||\delta^*_{ij}||_{2n \times 2n}$, структура которой аналогична структуре матрицы памяти $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$. Другими словами, в процессе текущей итерации l внешнего цикла каждый агент z_t после построения маршрута по очереди откладывает феромон, соответствующий оценке F_t построенного маршрута, в накопительную матрицу $\Delta^* = ||\delta^*_{ij}||_{2n \times 2n}$, а после завершения итерации внешнего цикла феромон, накопленный всеми агентами в $\Delta^* = ||\delta^*_{ij}||_{2n \times 2n}$, откладывается в матрицу $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$. Лучшее решение внутреннего цикла запоминается.

После выхода из внутреннего цикла выполняются две постпроцедуры.

Первая постпроцедура ПП1 добавляет в основную матрицу $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$ КЭП феромон, накопленный в накопительной матрице $\Delta^* = ||\delta^*_{ij}||_{2n \times 2n}$ КЭП.

Второй постпроцедурой ПП2 осуществляется испарение феромона в феромонных точках основной матрицы $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$.

Макет матрицы памяти представлен на рис. 8. k_i – первый конец отрезка (k_i, k_j) маршрута, k_j – второй конец отрезка, δ_{ij} – количество феромона, отложенного агентами на отрезке маршрута, пропорциональное оценке предпочтения отрезка. Отметим, что δ_{ij} на ребре e_{ij} между двумя концами одного участка принимается равным нулю.

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}
k_1			•	•	•	•	•	•	•	•
k_2			•	•	•	•	•	•	•	•
k_3	•	•			•	•	•	•	•	•
k_4	•	•			•	•	•	•	•	•
k_5	•	•	•	•			•	•	•	•
k_6	•	•	•	•			•	•	•	•
k_7	•	•	•	•	•	•			•	•
k_8	•	•	•	•	•	•			•	•
k_9	•	•	•	•	•	•	•	•		
k_{10}	•	•	•	•	•	•	•	•		

Рис. 8. Макет матрицы $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$ коллективной эволюционной памяти

Далее формируется модель территории, на базе которой строится маршрут. Исходные данные.

- ♦ K – множество концов k_i^1 и k_i^2 участков.
- ♦ Формируется модифицированное множество K^* всех концов всех участков U . $|K^*| = 2n_u$.
- ♦ Формируется исходная таблица координат позиций, занимаемыми концами участков u_i : для k_i^1 как (x_{1i}, y_{1i}) ; для k_i^2 , как (x_{2i}, y_{2i}) . У всех u_i : $y_{1i} < y_{2i}$; $x_i^1 = x_i^2$, рис. 2.
- ♦ Строится полный граф поиска решений $G(X, E)$, где X множество вершин, соответствующих множеству концов K^* , $(|K^*| = 2n)$ всех участков $U = \{u_i | i = 1, \dots, n_u\}$.
- ♦ В соответствии с топологией территории рассчитывается расстояние r_{ij} между каждой парой концов, принадлежащих различным участкам u_i . Формируется матрица $R = ||r_{ij}||_{2n \times 2n}$.
- ♦ Формируется матрица коллективной эволюционной памяти (КЭП) $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$.
- ♦ Формируется накопительная матрица $\Delta^* = ||\delta_{ij}^*||_{2n \times 2n}$.
- ♦ Задается число L итераций алгоритма муравьиной колонии.
- ♦ Задается число агентов T .

Представим общую процедуру поиска решения в виде двух алгоритмов: **алгоритм 1** поведения муравьиной колонии; **алгоритм 2** поведения агента.

Алгоритм 1 поведения муравьиной колонии.

1. Всем элементам матрицы $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$ коллективной эволюционной памяти (КЭП) присваивается начальное значение, равное Ω .
2. Задается число L итераций алгоритма 1.
3. $l = 1$.
4. Выбирается стартовый участок u_μ .
5. Задается число агентов T . $t = 0$, (t – номер агента).
6. Выполняется алгоритм 2.
7. Если $l < L$, то $l = l + 1$ и переход к п. 4 иначе переход к п. 8.
8. Конец работы алгоритма

Алгоритм 2 – поведения агента.

1. $t = 0$. (номер агента).
 2. $t = t + 1$.
 3. Обнуляется накопительная матрица $\Delta^* = ||\delta_{ij}^*||_{2n \times 2n}$.
 4. Формируется начальное множество концов участков $K^{**} = K^*$, не вошедших в маршрут. $M_t = \emptyset$.
 5. $M_t = \{m_{is} | s=0, 1, 2, \dots, 2n\}$. M_t – маршрут агента z_t .
 6. Фиксируется координаты (x_0, y_0) начальной позиция p_0 на стартовой площадке БПЛА. $s=0$. $m_{is} = p_0$.
 7. Выбирается конец $k_b \in K^{**}$, наиболее близкий к позиции p_0 стартовой площадки БПЛА такой, что $S(k_b, p_0) = \min$.
 8. Если b – четное число, то к п. 7, иначе к п. 8.
 9. Если b – четное число, то переход к п. 9, иначе переход к п. 10.
 10. В соответствии с правилами одно знаковой индексации, индекс участка $i=b \setminus 2$. Конец k_b рассматривается как входной на участок u_i . $s=s+1$. $m_{is} = k_b$. $K^{**} = K^{**} \setminus k_b$. Выходным концом участка u_i является конец k_{b-1} . $s=s+1$. $m_{is} = k_{b-1}$. $K^{**} = K^{**} \setminus k_{b-1}$. $k_b \leftrightarrow k_i^2$. $k_{b-1} \leftrightarrow k_i^1$. Конец k_{b-1} объявляется аттрактором. Фиксируется индекс конца k_{b-1} , объявленного аттрактором, $a=b-1$. Переход к п. 10.
 11. Если b – нечетное число, то в соответствии с правилами одно знаковой индексации, индекс участка $i=b+1 \setminus 2$. Входным концом участка u_i является конец k_b . $s=s+1$. $m_{is} = k_b$. $K^{**} = K^{**} \setminus k_b$. Выходным концом участка u_i является второй конец k_{b+1} . $s=s+1$. $m_{is} = k_{b+1}$. $K^{**} = K^{**} \setminus k_{b+1}$. $k_b \leftrightarrow k_i^1$, $k_{b+1} \leftrightarrow k_i^2$. Конец k_{b+1} объявляется концом – аттрактором. Фиксируется индекс конца k_{b+1} , объявленного аттрактором. $a = b+1$.
 12. Если $K^{**} = \emptyset$, то переход к п. 16, иначе переход к п. 12.
 13. На графе G формируется набор ребер $E_a \in E$, связывающих вершину $x_a \in X$, соответствующую концу k_a , с вершинами $x_v \in X^{**}$, $X^{**} \subset X$, соответствующих K^{**} .
 14. Определяется стоимость $\xi_{av} = \alpha \delta_{av} + \beta r_{av}$ каждого ребра $e_{av} \in E_a$, где α, β – коэффициенты. Параметр δ_{av} извлекается из матрицы памяти $\Delta = ||\delta_{ij}||_{2n \times 2n}$. r_{av} – из матрицы $R = ||r_{ij}||_{2n \times 2n}$. Соотношение между значениями α и β находится экспериментально.
 15. Вероятность P_{av} включения ребра $e_{av} \in E_a$ в формируемый маршрут определяется следующим соотношением $P_{av} = \xi_{av} / \sum_v \xi_{av}$.
 16. Агент с вероятностью P_{av} выбирает одно из ребер $e_{av} \in E_a$, которое связывает конец k_a с концом k_v .
 17. Фиксируется индекс конца k_v . $b=v$. Переход к п. 7.
 18. Маршрут M_t построен. Формируется множество холостых ребер $E_t \in E$ графа G , вошедших в состав маршрута M_t .
 19. Определяется суммарная длина F_t , множества E_t холостых отрезков, входящих в состав маршрута M_t . F_t – оценка маршрута M_t .
 20. В ячейки накопительной матрицы $\Delta^* = ||\delta_{ij}^*||_{2n \times 2n}$, соответствующие всем холостым отрезкам маршрута M_t , добавляется порция феромона в количестве $\tau_t = \mu F_t$, где μ – коэффициент, находится экспериментально.
 21. Если $t < T$, то переход к п. 2, иначе переход к п. 20.
 22. После того, как все агенты сформировали решения и добавили каждый из них свою порцию феромона в накопительную матрицу $\Delta^* = ||\delta_{ij}^*||_{n \times n}$, производится сложение матриц $\Delta = ||\delta_{ij}||_{n \times n}$ и $\Delta^* = ||\delta_{ij}^*||_{n \times n}$. $\Delta = \Delta + \Delta^*$.
 23. На третьем этапе итерации происходит общее испарение феромона на ребрах полного графа R (соответственно в ячейках матрицы Δ КЭП) в соответствии с формулой $\tau_k = \tau_k(1-\rho)$, где ρ – коэффициент обновления.
 24. Среди решений, полученных агентами на текущей итерации l , выбирается лучшее, которое запоминается.
 25. Конец работы алгоритма 2.
- Временная сложность этого алгоритма зависит от времени жизни колонии l (число итераций), количества вершин графа n и числа агентов m , и определяется как $O(l \cdot n^2 \cdot m)$.

Разработка блока управления полетом по заданному маршруту в автоматическом режиме. Приведём теперь кинематическую модель мобильного робота, а также разработанный метод управления его движением вдоль произвольного маршрута [20].

На рис. 9 представлено расположения мобильного робота R_i в абсолютной системе координат OXY и связанная с R_i система координат $O_i X_i Y_i$.

Известен вектор $\mathbf{V}_i = (x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ состояния робота R_i в абсолютной системе координат. В скобках – $(x_i, y_i, \varphi_i, V_i)$ положение и ориентация робота в абсолютной системе координат, и линейная скорость робота соответственно.

Основные результаты исследования связаны с разработкой позиционно-траекторного регулятора ((ПТР). ПТР – это система управления, которая обеспечивает перемещение объекта по заданному маршруту, контролируя его положение в пространстве. Он работает, сравнивая текущее положение объекта с желаемым положением на маршруте и выдает управляющие воздействия, чтобы минимизировать ошибку. Результатом данной работы является разработка полностью децентрализованного правила управления мобильным роботом [5, 7, 17].

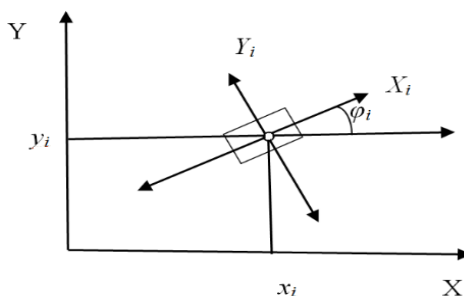


Рис. 9. Координаты мобильного робота

Предусматривается разработка и исследование новых парадигм на основе интеграции моделей адаптивного поведения биологических систем для решения задач мониторинга, разведки и рекогносцировки (для беспилотных летательных аппаратов, роботов **военного** назначения).

Для функционирования системы управления движением мобильного робота необходима информация о его положении относительно окружающей среды. Разработанные алгоритмы управления должны позволять роботу изменять направление движения для исключения столкновений с другими, что повысит маневренность при скоростном передвижении роя роботов [21].

Разработан алгоритм управления перемещением БПЛА на каждом отрезке маршрута от одной опорной точки к другой, обеспечивающий минимальное отклонение от опорной траектории. Для фиксации отклонений должны использоваться датчики системы технического зрения, например, лазерный дальномер со сканирующим лучом [4, 9, 18].

Маршрут состоит из чередующейся последовательности рабочих и холостых отрезков, каждый из которых ограничен опорными точками соответствующих конечных вершин участков. Облет отрезка маршрута всегда начинается с одного конца до другого. На каждом отрезке БПЛА выполняет перемещение по алгоритму, включающему одни и те же правила.

Блок управления перемещением БПЛА между опорными точками: из точки k_a в точку k_b . БПЛА перемещается в трехмерном пространстве на постоянной высоте D . Рассмотрим процесс управляемого перелета летательного аппарата между опорными точками k_a и k_b соответствующими опорным точкам p_a и h_b БПЛА. Фиксируются в двумерной системе координат OXY координаты опорных точек k_a и k_b : (x_a, y_a) и (x_b, y_b) , (рис. 10).

Формируется задающий направление перемещения робота опорный вектор F , связывающий точки k_a и k_b , (рис. 10). Определяется угол α между вектором F и осью абсцисс OX .

БПЛА занимает начальную позицию опорной точки k_a с координатами (x_a, y_a) и разворачивается так, что в точке k_a вектор скорости V БПЛА совпадает с вектором F , а модуль h вектора V в начальной позиции равен нулю.

Обозначим угол между векторами F и V как ω , расстояние между F и V . В начальной позиции $\omega=0$.

Перемещение БПЛА начинается после завершения разворота. На маршруте (k_a, k_b) фиксируются точки (o_1, o_2) (рис. 10). БПЛА перемещается от точки k_a к точке o_1 с ускорением a . При этом $\omega=0$.

После прибытия за время t_1 в точку o_1 скорость БПЛА достигнет значения $h=a \cdot t_1$. БПЛА продолжает перемещаться со постоянной скоростью h до точки o_2 .

Начиная с точки o_2 производится равнозамедленное движение (торможение) до точки k_b со скоростью $h_1 = h - a \cdot t^2/2$. В точке k_b скорость $h_1=0$. Значения отрезков (k_a, o_1) , (o_1, o_2) , (o_2, k_b) и значение ускорения a задаются в соответствии с техническими характеристиками БПЛА.

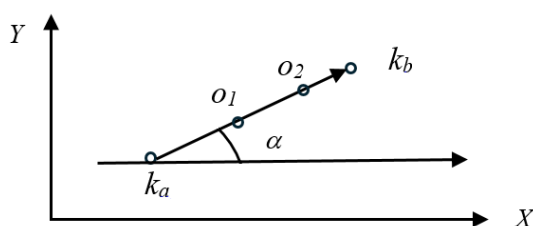


Рис. 10. Перемещение БПЛА на отрезке маршрута

При перемещении БПЛА возможны его столкновения с посторонними объектами. Наиболее эффективным способом исключения столкновения с объектом во время полета – это изменение высоты полета БПЛА с последующим возвратом на рабочую высоту («нырок» или «подпрыгивание»). Возможно торможение или уклонение от столкновения путем смещения траектории вправо или влево. Для этого необходимы сенсоры, анализирующие состояния окружающего пространства. В качестве объекта столкновения могут быть БПЛА или высотные сооружения. Возникает проблема выбора наиболее эффективного маневра избежания столкновений [3, 8, 22].

В работе предложена структуры маневров, выполняемого БПЛА для коррекции отклонений параметров, заключающаяся в следующем. Сначала БПЛА R_i изменяет значение параметра $p_i(t)$ на величину δ_i , затем в течение времени δ_i БПЛА передвигается с новым значением параметра $p^*_i(t)=p_i(t)+\delta_i$. По истечении времени δ_i БПЛА возвращается на маршрут с исходным значением параметра, с которым БПЛА продолжает движение.

Если маневр уклонения от столкновений выполнялся при перемещении между участками на холостом отрезке маршрута, процесс перемещения продолжается. При этом реализуется стратегия скорейшего возвращения робота на маршрут.

Если маневр уклонения от столкновений выполнялся при сканировании участка, процесс сканирования участка необходимо повторить. При этом робот должен вернуть в точку маршрута, предшествующую точке схода с маршрута.

Далее робот под управлением регулятора отслеживает программную траекторию движения робота от одной опорной точки к другой. Для реализации программной траектории используются датчики системы технического зрения, например, лазерный дальнометр со сканирующим лучом [20].

Основной задачей управления является организованное воздействие на объект управления (ОУ), в качестве которого выступает БПЛА или иная техническая система, которая переводит объект в требуемое состояние. Объектом управления является БПЛА, адаптивным устройством управления – специальная подсистема адаптации (рис. 11), БО – блок оценок.

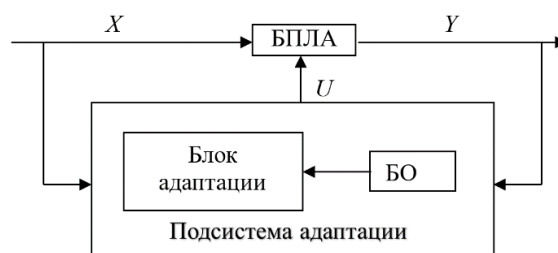
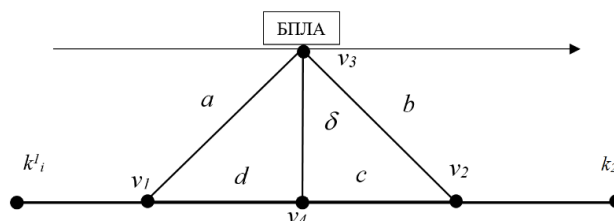


Рис. 11. Специальная подсистема адаптации

Известен вектор $V=(x, y, \varphi, v)$ состояния БПЛА в абсолютной системе координат, где (x, y) – координаты места расположения БПЛА, V – скорость передвижения робота, φ – угол между вектором V и базовой линией Line, h – модуль вектора V . Заданы для БПЛА расстояние D между БПЛА и опорной линией.

Если существуют отклонения: $\varepsilon_h=h_i(t)-h_{i-1}(t)$, $\varepsilon_y=y_i(t)-y_{i-1}(t)$, $\varepsilon_x=x_i(t)-x_{i-1}(t)$, $\varepsilon_h=h_i(t)-h_{i1}(t)$, $\varphi_i(t)>0$, то выполняется адаптивная коррекция. Цель коррекции – минимизация разности $(|\varepsilon_x|-D)$, минимального отклонения от опорной траектории. Ошибкой БПЛА R_i является: $\delta_{Si}=S_i(t)-S_0$, $\omega_{i,i-1}(t)>0$, δx_i , δy_i – отклонения базовой точки.

По середине каждого участка $u_i \in U$ двумя концами k_{1i} и k_{2i} проводится виртуальная опорная линия l_i . Опорная линия l_i служит ориентиром для БПЛА, при перемещении вдоль линии от одного конца участка к другому, в целях полного покрытия участка сигналом сенсора БПЛА. Робот при перемещении вдоль участка не должен отступать от опорной линии на величину больше δ , для полного охвата площади участка, рис. 12.

Рис. 12. Отклонение БПЛА от опорной линии l_i

Расчет величины δ отклонения БПЛА от опорной линии $k_{1i}-k_{2j}$ выполняется следующим образом. Фиксируются координаты точек k_{1i} . В момент времени t БПЛА находится в точке v_3 с координатами (x,y) . На опорной линии $k_{1i}-k_{2j}$ выбираются две точки v_1 и v_2 и определяются их координаты (x_1, y_1) и (x_2, y_2) . Рассчитываются координаты (x_4, y_4) точки v_4 , расположенной на линии посередине между точками v_1 и v_2 .

Из точки v_3 опускается перпендикуляр в точку v_4 . Считаем, что отрезок δ перпендикулярен опорной линии. Дальнейшие рассуждения справедливы только с учетом того, что отрезок δ перпендикулярен опорной линии.

По координатам точек v_1, v_2, v_3 рассчитывается длина $\underline{a}$ отрезков между точками v_1 и v_3 , $\underline{b}$ между точками v_2 и v_3 и $\underline{f}$ между точками v_1 и v_2 . $\underline{f} = d + c$.

Далее с использованием теоремы Пифагора рассчитывается длина отрезка $\underline{d}$ – между точками v_1 и v_4 , и отрезка $\underline{c}$ – между точками v_2 и v_4 , и отклонение $\underline{\delta}$.

Процесс перемещения БПЛА в реальных условиях поддерживается блоком адаптации. Строится опорный вектор, связывающий два связываемых конца k_{1i} и k_{2i} . Задача блока адаптации обеспечить перемещение БПЛА вдоль опорной линии.

Процесс поиска решения реализуется в виде адаптивной системы, работающей на основе моделирования поведения автомата адаптации. Основными компонентами адаптивной системы являются: внешняя среда, объект адаптации и общая структура процесса адаптации [16].

Под воздействием случайных факторов внешней среды возможны отклонения БПЛА от заданного маршрута. В нашем случае в качестве объекта адаптации служит БПЛА. Процесс перемещения БПЛА в реальных условиях поддерживается блоком адаптации. Задача блока адаптации обеспечить перемещение БПЛА по заданному маршруту.

Основные цели адаптации связаны с экстремальными требованиями, предъявляемыми к объекту адаптации в виде максимизации эффективности его функционирования. Процесс адаптации может выполняться некоторыми наборами альтернативных процедур и их последовательностей. Выбор той или иной процедуры осуществляется с помощью некоторого алгоритма на основе информации, полученной после анализа исходного задания. Этот вид адаптации отличается наличием поиска – специально организованного процесса, позволяющего определить необходимое адаптирующее воздействие. Процесс *поисковой* адаптации имеет последовательный многоэтапный характер, реализуется как последовательность управляющих воздействий с учетом промежуточных результатов, полученных на отдельных этапах [16, 18, 20].

В нашем случае в качестве объекта адаптации служат набор параметров $P=\{p_i|i=1,\dots,n_p\}$ непрерывного управления полетом. p_1 – отклонение БПЛА от опорной линии, $p_1=d$, p_2 – угол между вектором перемещения БПЛА и опорной линией текущего участка, $p_2=\varphi$, p – высота полета БПЛА над текущим участком, $p_3=h$.

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения в каждый момент времени t производился перепланирование параметров движения БПЛА R_i , движущегося параллельно к опорному вектору. Ошибкой БПЛА R_i является:

$$\delta i=k_1(|D-(x_i(t)-x_{i-1}(t))|+k_2|(y_i(t)-y_{i-1}(t))|+k_3|(h_i(t)-h_{i-1}(t))|+k_4|(\alpha_i(t)-\alpha_0)|).$$

Ошибка перемещения роботов: $\Delta=\sum_i \delta_i$.

Адаптация БПЛА сводится к адаптации значений параметров управления. В работе предлагается подход к изменению значений параметров на основе метода альтернативной адаптации.

Каждому адаптивному параметру p_i соответствует автомат адаптации A_i , под управлением которого производится адаптивное изменение значения p .

Сложившаяся ситуация характеризуется двумя факторами: состоянием среды, в которой находится объект, и самим объектом адаптации. Процесс поисковой адаптации имеет последовательный многоэтапный характер, на каждом этапе которого определяется адаптирующее воздействие на объект, повышающее его эффективность и оптимизирующее критерии качества [16–18].

Объектами адаптации являются адаптивные параметры управления движением БПЛА. Состоянию параметра в среде соответствует его значение h_i .

Адаптивная система представляется в виде коллектива параметров.

Управление процессом адаптации каждого p_i выполняется автоматом адаптации (АА) A_i , моделирующим поведение объекта в среде, где i – номер параметра.

Автомат адаптации способен воспринимать два входных сигнала: «поощрения» при реализации удачной альтернативы (+) и «наказания» при реализации неудачной альтернативы (-). Под действием этих сигналов осуществляется переход АА в новые состояния. Переходы между состояниями показаны ориентированными ребрами, помеченными входными сигналами (+), (-). В зависимости от состояния АА на его выходе может быть одна из выходных альтернатив (процедур) – сигналов A_1, A_2, A_3 .

V_1 – уменьшение значения h_i на величину ε ;

V_2 – оставить значение параметра без изменений;

V_3 – увеличение значения параметра на величину ε .

С системной точки зрения адаптация представляет собой процесс непрерывной оптимизации. Целью адаптации является нахождение состояния объекта адаптации в среде, обеспечивающего получения наибольшего значения показателя качества F . Важной проблемой является методика выбора автоматом адаптации АА альтернативного адаптирующего воздействия на объект оптимизации.

Первоначально АА находится в одном из начальных состояний. Состояниям АА соответствуют альтернативы, реализацию некоторых процедур над объектом адаптации предписывающих (увеличить, уменьшить, не изменять) значение параметра.

Фиксируются целевые значения объектов адаптации (целевые значения параметров вектора $\mathbf{V}_i$).

На каждом этапе действия выполняются за пять тактов.

На первом такте адаптации фиксируются **состояния объектов адаптации** (текущие значения параметров), которые сравниваются с целевыми значениями.

На втором такте определяется **стремление параметра к изменению** текущего значения (увеличить, уменьшить, не изменять), для уменьшения различия с целевым значением.

На третьем такте вырабатывается управляющий сигнал (отклик среды) «наказание» (-), если **стремление объекта к изменению** не совпадает **предписанием** АА; «поощрение» (+) в противном случае.

На четвертом такте в каждом автомате адаптации a_i под действием подаваемого на его вход отклика q_i осуществляется переход в новое состояние.

На пятом такте для каждого объекта адаптации реализуется альтернатива, предписывающая тип изменения значения параметра, в соответствии с выходами АА.

Для реализации механизма адаптации параметрам вектора $\mathbf{V} = (x, y, \varphi, V)$ состояния робота R в абсолютной системе координат сопоставляется автоматы адаптации (АА) (a^x, a^y, a^φ, a^V) моделирующие поведение объектов адаптации R в среде.

Автомат адаптации A_i , представленный на рис. 13, имеет три группы состояний S_i^1, S_i^2, S_i^3 , соответствующие трем альтернативам изменения значения h_i параметра, и одно промежуточное состояние $\leftrightarrow$.

Если АА находится в одном из состояний группы S_i^k , то реализуется альтернатива (адаптирующее воздействие) V_k .

Состояния группы S_i^1 соответствуют альтернативе V_1 (намерению) увеличения значения параметра на величину ε .

Состояния группы S_i^2 соответствуют альтернативе V_2 отсутствия намерения изменения значения h_i параметра.

Состояния группы S_i^3 соответствуют альтернативе V_3 (намерению) уменьшения значения h_{il} гена g_{il} на величину ε .

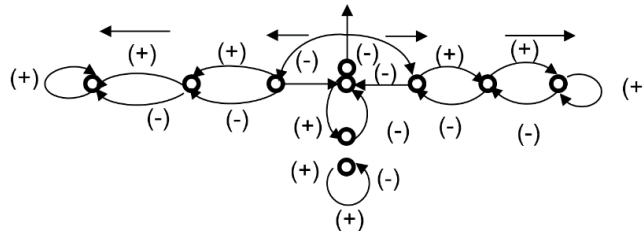


Рис. 13. Граф-схема переходов автомата адаптации

Число состояний АА в каждой группе S_i^k задается параметром α_i^k , называемым глубиной памяти или «степенью доверия», где k – номер группы.

На рис. 13 $\forall k$ ($\alpha_i^k=3$). s_{ic}^k – номер текущего состояния АА меняется в интервале $\langle 3, 2, 1, 0, 0, -1, -2, -3 \rangle$. Группа S_i^1 включает состояния с номерами $\langle 3, 2, 1 \rangle$. Группа S_i^2 включает состояния с номерами $\langle 0, 3, 0, 2, 0, 1 \rangle$. Группа S_i^3 включает состояния с номерами $\langle -1, -2, -3 \rangle$.

Переход АА из одной группы состояний к другой происходит в циклической последовательности $\dots \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_1 \rightarrow \dots$.

Особенностью представленного АА является то, что изменение направления перемещения осуществляется через нейтральное положение. С другой стороны, это может быть тормозом и замедлять процесс изменения направления перемещения в процессе адаптации.

Задача адаптации состоит в том, чтобы сформировать в автомате адаптации последовательность адаптирующих воздействий U , экстремизирующих показатели качества F получаемых решений (критерии адаптации).

В состав каждого АА входит индикатор состояния автомата адаптации. Значения индикатора изменяются от $+N1$ до $-N2$. Если значение индикатора по убыванию в пределах от $+N1$ до $+1$, то реализуется первая альтернатива. Если значение индикатора по возрастанию от $-N1$ до -1 , то реализуется вторая альтернатива.

Изменение значения параметра π в соответствии со структурой АА выполняется по действию управляющего сигнала U . Управляющий сигнал U может иметь два значения $\{+1, -1\}$. Для $N1 = +3, N2 = -3$ шкала S значений параметра π имеет вид:

$S = \langle 3, 2, 1, -1, -2, -3 \rangle$. Пусть $U = +1$, тогда если $N1 > \pi(t) \wedge 1$, то $\pi(t+1) = \pi(t) + 1$;

Если $\pi(t) = N1$, то $\pi(t+1) = N1$; если $\pi(t) = -1$, то $\pi(t+1) = +1$.

Пусть $U = -1$, тогда: если $-1 \wedge \pi(t) > N2$, то $\pi(t+1) = \pi(t) - 1$; если $\pi(t) = N2$, то $\pi(t+1) = N2$; если $\pi(t) = 1$, то $\pi(t+1) = -1$.

Рассмотрим работу АА.

1. Задаются начальные значения h_i параметров БПЛА.

2. Задаются значения параметров АА управления движением:

♦ m – число альтернатив (групп состояний АА);

♦ α_i^k – число состояний в группе S_i^k (степень доверия).

3. Задаются начальное состояние $s_{ic}^k \in S_i^k$ для каждого АА A_i .

4. $t=0, i=0$.

В последующем на каждом шаге (итерации) t работа адаптивного алгоритма выполняется за четыре такта. По своей сути эти четыре такта соответствуют второму, третьему и четвертому этапу процесса адаптации живых систем.

5. $t=t+1$. (номер итерации).

6. $i=i+1$. (номер параметра).

7. На первом такте расчет значения h_i параметра и состояние $s_{ij} \in S_i$ автомата адаптации A_i .

8. На втором такте по значению параметр p_i оценивается состояние объекта адаптации в среде $\delta_i = \text{sgn}[h^{**} - h_i]$, где $\text{sgn}[y]$ – функция знака числа: $\text{sgn}(y)=1$, если $y>0$; $\text{sgn}(y)=0$, если $y=0$; $\text{sgn}(y)=-1$, если $y<0$.

9. Если $\delta_i=1$ или $\delta_i=0$, то объект адаптации – параметр p_i в удовлетворительном состоянии. На основании этого вырабатывается управляющий сигнал $u(+)$ поощрения или (+).

10. Если $\delta_i=-1$, то объект адаптации – параметр p_i в неудовлетворительном состоянии. На основании этого вырабатывается управляющий сигнал $u(-)$ наказания или (-).

11. На третьем такте под действием управляющего сигнала u автомат адаптации A_i переходит в новое состояние $s_{ic}^k \in S_i^k$.

12. На четвертом такте реализуется альтернатива V_k , соответствующая группе состояний S_i^k автомата адаптации A_{ii} .

13. Если $i < n$, то переход к пункту 6, иначе переход к пункту 15.

14. Если $t < T$, то переход к пункту 5, иначе переход к пункту 15.

15. Конец работы алгоритма

Максимальные значения отклонения скорости $\delta V = (V_i(t+1) - V_i(t))$ – и угла «рыскания» $\varphi_{i,i-1}(t+1) - \varphi_i(t) = \alpha_i(t) - \alpha_{i-1}(t)$ устанавливаются системой управления в допустимых пределах.

Разработаны правила устранения расхождения курса робота R_i с курсом робота R_{i-1} .

Если существуют отклонения: $\varepsilon_h = h_i(t) - h_{i-1}(t)$, $\varepsilon_y = y_i(t) - y_{i-1}(t)$, $\varepsilon_x = x_i(t) - x_{i-1}(t)$, $\varepsilon_h = h_i(t) - h_{i-1}(t)$, $\varphi_i(t) > 0$, то выполняется коррекция. Цель коррекции – минимизация разности $(|\varepsilon_x| - D)$.

Задача адаптации состоит в том, чтобы сформировать в автомате адаптации последовательность адаптирующих воздействий U , экстремизирующих показатели качества $F \rightarrow$ получаемых решений (критерии адаптации).

Авторами предложена структуры маневров, выполняемого БПЛА для коррекции отклонений параметров, заключающаяся в следующем. Сначала БПЛА R_i изменяет значение параметра $a_i(t)$ на величину δ_i , затем в течение времени δ_i БПЛА передвигается с новым значением параметра $a_i^*(t) = a_i(t) + \delta_i$. По истечении времени δ_i возвращается исходное значение параметра, с которым БПЛА продолжает движение.

Экспериментальные исследования. Для подтверждения эффективности разработанного алгоритма, а также проведения вычислительного эксперимента был разработан программный комплекс, позволяющий решать определенного класса задачи связанных с интеллектуальным планированием траекторий подвижных объектов в трехмерных неопределенных средах с препятствиями [14, 19].

Основной целью экспериментального исследования является анализ целевых функций, проверка теоретических оценок временной и пространственной сложности алгоритмов (ВСА и ПСА) и определение оптимальных параметров, при которых алгоритмы находят глобальные или близкие к нему решения [14, 16].

Первая часть исследований посвящена исследованию на одной популяции механизмов муравьиной колонии для задачи мониторинга некоторой территории. Для этого исследовалось влияние управляющих параметров, таких как: объем популяции, количество итераций, начальное количество феромона, откладываемого на ребрах графов и т.д. В результате определялось такое сочетание значений этих параметров, которое обеспечивает наивысшую эффективность адаптивных процедур для задачи мониторинга некоторой территории [2, 20, 22].

На основе результатов экспериментальных исследований была построена средняя зависимость степени качества от числа итераций (рис. 14).

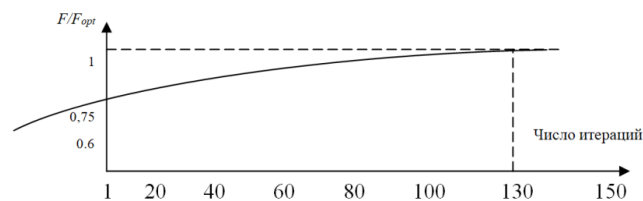


Рис. 14. Зависимость степени качества алгоритма от числа итераций

Каждый пример тестировался на 50 независимых прогонах. При исследовании сходимости алгоритмов для каждого эксперимента запоминался номер генерации, после которой не наблюдалось улучшения оценки. В каждой серии из 50 испытаний определялись среднее значение числа генераций, после которого не наблюдалось улучшения оценки. Для каждой серии испытаний определялось лучшее решение. На основе обработки экспериментальных исследований для алгоритмов была построена средняя зависимость качества решений от числа итераций.

Исследования показали, что число итераций, при которых алгоритм находил лучшее решение, лежит в пределах 120–135. Алгоритм сходится в среднем на 130 итерации. В среднем запуск программы обеспечивает нахождения решения, отличающегося от оптимального менее, чем на 2%. Временная сложность алгоритма при фиксированных значениях M — размер популяции роя и T — число итераций лежит в пределах $O(n)$. Общая оценка временной сложности лежит в пределах $O(n^2)$ – $O(n^3)$.

Для сравнения эффективности разработанного алгоритма мониторинга территории, были использованы 3D-бенчмарки:

- ♦ AirSim Simulation Environments (<https://microsoft.github.io/AirSim/settings>). Продвинутое симулятор для БПЛА от Microsoft, построенный на Unreal Engine. Предоставляет фотореалистичные 3D-окружения (природные ландшафты) с высокой физической точностью. Является основным источником бенчмарков для исследований в области планирования траекторий БПЛА, учитывающих динамику, компьютерное зрение и неопределенность [18, 23].

♦ The UZH-FPV Drone Racing Dataset (<https://fpv.ifi.uzh.ch/datasets>). Этот датасет содержит высокоточные данные о траекториях, позах и 3D-модели трассы. Используется как бенчмарк для агрессивного и высокоскоростного планирования траекторий БПЛА, где ключевую роль играет динамика и минимальное время прохождения.

♦ IROS / ICRA Robotics Challenge Datasets (<https://www.mbzirc.com/grand-challenge>). Материалы крупнейших международных робототехнических соревнований (MBZIRC, DARPA SubT, IROS Drone Racing) служат источником сложных прикладных бенчмарков. Эти сценарии представляют собой тестирования, объединяя планирование, восприятие и управление в условиях неопределенности [15, 20, 23].

Для сравнения качества решений задачи мониторинга территории использовались стандартные тесты (бенчмарки) [20, 22]. Результаты сравнивались с результатами работы существующих алгоритмов, описанных в литературных источниках [15, 23].

В табл. 1 представлены результаты, полученные различными алгоритмами, а также показаны результаты работы разработанного роевого алгоритма мониторинга территорий (рассматриваемый алгоритм).

Из табл. 1 видно, что разработанный алгоритм работает на 10-16 % лучше аналогов.

Графики сравнения качества решения разработанного гибридного алгоритма мониторинга территории (12), метода диаграмм Вороного (2), генетического поиска без картографии (8) и метода планирования с использованием неустойчивых режимов (10), представлены на рис. 15.

Из рис. 15 видно, что разработанный алгоритм и другие, используемые для сравнения алгоритмы, позволяют получить решение, близкое к оптимальному.

Однако разработанный гибридный алгоритм мониторинга территории на основе метода муравьиной колонии и коллективной адаптации обладает большим быстродействием, в том смысле, что для достижения высокого результата требуется меньшее число итераций.

Таблица 1

Результаты сравнительных экспериментов

№№	Методы	Критерии			
		S_m	P_L	t_m	F
1	Метод потенциальных полей	0,105	0,01988	0,01593	0,6
2	Метод диаграмм Вороного	0,44	0,02052	0,01728	0,6
3	Метод реактивной навигации	0,667	0,02421	0,02473	0,8
4	Метод управления с применением нечетких систем	0,4971	0,02511	0,01253	1,0
5	DVN-метод в классическом базисе	0,070	0,0321	0,07007	1,0
6	DVN-метод в базисе формальных нейронов	0,071	0,0317	0,07007	1,0
7	Нейросетевой гибридный метод	0,081	0,0321	0,03796	1,0
8	Генетический поиск без картографии	0,082	0,01349	0,01105	0,4
9	Генетический поиск с картографией	0,5681	0,03089	0,02381	1,0
10	Метод планирования с использованием неустойчивых режимов	0,2981	0,02041	0,01964	0,8
11	Комбинированный метод планирования с использованием неустойчивых режимов и виртуальной целевой точки	0,838	0,02581	0,01669	1,0
12	Разработанный алгоритм	0,3567	0,02025	0,01102	1,0

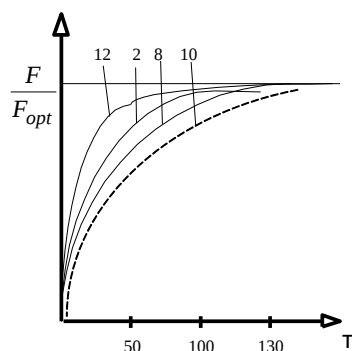


Рис. 15. Графики сравнения качества решения

В результате проведенных исследований было установлено, что предложенная модернизированная методика пошагового проектирования маршрута позволила повысить эффективность решения, что подтверждено результатами экспериментальных исследований. Анализ показал, что значительное влияние на улучшение характеристик проектов оказало использование методов поисковой оптимизации.

Заключение. В работе рассматриваются методы формирования минимального набора участков, полностью покрывающих доступную территорию, подвергаемую исследованиям датчиками БПЛА.

Разработана методология и алгоритм построения на основе метода муравьиной колонии маршрута перемещений БПЛА при исследовании территории.

Разработаны механизмы управления перемещениями БПЛА по маршруту.

Предложенные новая методика и метод построения модели исследуемой территории, в виде разрозненного множества участков, имеющих форму прямоугольников одинаковой ширины и их упорядоченное расположение, что позволяет минимизировать общую длину маршрута БПЛА и общее время сканирования участков.

Повышение эффективности управления автономными подвижными объектами в процессе мониторинга местности в неопределенной динамической среде достигнуто за счет алгоритмов на основе методов поисковой оптимизации.

Способ управления заключается в том, чтобы в процессе движения БПЛА в каждый момент времени производится перепланирование параметров движения БПЛА, движущегося параллельно к опорному вектору.

В работе предлагается подход к изменению значений параметров на основе метода альтернативной адаптации. Изменение параметров заключается в уменьшении различия между текущим и программным значениями.

Применение всех разработанных авторами методов, моделей и алгоритмов управления даст возможность создавать интеллектуальные системы управления автономными подвижными объектами в процессе мониторинга местности в неопределенной динамической среде.

Источником усовершенствования может быть более детальная проработка вопросов, связанных с разработкой структуры маневров, выполняемых БПЛА для коррекции отклонений параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ногин А.А. Основные элементы структурной архитектуры сенсорных узлов // Научный журнал. – 2018. – № 5 (28). – С. 37-39.
2. Марков А.В., Симаньков В.И. Методика расчета траекторий полета беспилотных летательных аппаратов для наблюдения за местностью // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2019. – № 4 (122). – С. 57-63.
3. Ци Ч. Исследование планирования траектории роторного БПЛА для распыления пестицидов // StudNet. – 2021. – Т. 4, № 7. – С. 654-669.

4. Родионов А.С., Маткурбанов Т.А., Хайруллаев У.Б. Оптимизация траектории полета БПЛА для мониторинга сельскохозяйственных земель // Проблемы информатики. – 2025. – № 1 (66). – С. 5-17.
5. Stefan N., Plonski P.A., Isler V. Approximation algorithms for tours of orientation varying view cones // The International Journal of Robotics Research. – 2020. – Vol. 39, No. 4. – P. 389-401.
6. Родионов А.С., Маткурбанов Т.А. Планирование траектории полета БПЛА при мониторинге большой области // Информатика и автоматизация. – 2025. – Т. 24 (3). – С. 791-827.
7. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю., Костюков В.А., Хуссейн Ф., Кадим А. Алгоритмы планирования траекторий в двумерной среде с препятствиями // Информатика и автоматизация. – 2022. – Т. 21 (3). – С. 459-492.
8. Костюков В.А., Медведев М.Ю., Пилюхов В.Х. Планирование движения наземных роботов в среде с препятствиями: алгоритмы построения траекторий в группе при заданном шаблоне // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2023. – Т. 24, № 1. – С. 33-45.
9. Liu B., Xiao X., Stone P. A Lifelong Learning Approach to Mobile Robot Navigation // In IEEE Robotics and Automation Letters. – 2021. – Vol. 6 (2). – P. 1090-1096.
10. Pradhan S., Mandava R.K., Vundavilli P.R. Development of path planning algorithm for biped robot using combined multi-point RRT and visibility graph // International Journal of Information Technology. – 2021. – Vol. 13. – P. 1513-1519.
11. Kamil A.R.M., Shithil S.M., Ismail Z.H., Mahmud M.S.A., Faudzi A.A.M. Path Planning Based on Inflated Medial Axis and Probabilistic Roadmap for Duct Environment // Lecture Notes in Electrical Engineering. – Springer, Singapore, 2022. – Vol. 834.
12. Chen G., Luo N., Liu D., Zhao Z., Liang Ch. Path planning for manipulators based on an improved probabilistic roadmap method // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2021. – Vol. 72.
13. Janos J., Vonasek V., Penicka R. Multi-Goal Path Planning Using Multiple Random Trees // IEEE Robotics and Automation Letter. – 2021. – Vol. 6 (2). – P. 4201-4208.
14. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Бесхмельнов М.И. Моделирование построения траектории подвижного объекта на основе методов многокритериальной оптимизации // Вестник Тверского государственного технического университета. Технические науки. – 2025. – № 3 (27). – С. 103-119.
15. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю. Сравнительный анализ централизованного и децентрализованного алгоритмов движения строем БЛА мультикоптерного типа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 1 (225). – С. 121-139.
16. Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Бесхмельнов М.И. Автономная мультиагентная система управления группой роботов // Тр. XXII Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2025. – СПб.: Изд-во СПб ФИЦ РА, 2025. – Т. 2. – С. 307-319.
17. Медведев М.Ю., Костюков В.А., Пилюхов В.Х. Оптимизация движения мобильного робота на плоскости в поле конечного числа источников-репеллеров // Тр. СПИИРАН. – 2021. – Т. 19 (1). – С. 43-78.
18. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmelnov M.I. Movement of a group of unmanned aerial vehicles using an autonomous intelligent control system // Pattern Recognition and Image Analysis. Journal special issue XXI national conference on artificial intelligence with international participation. Section «Intelligent agent, robots, intelligent control, computer vision». – Pleiades Publishing, Ltd., 2025. – No. 4. – P. 543-548.
19. Байгутлина И.А. Реализация новых сервисов с использованием робототехнических комплексов // Славянский форум. – 2021. – № 4 (34). – С. 162-170.
20. 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.
21. Успанова Р.А. Актуальные проблемы управления группой БПЛА // Тр. тринадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции: в 2х т. Сер. Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». – СПб., 2021. – № 76. – С. 128-130.
22. Beskhmelnov Maksim I., Vyatkin Artem A., Dobrikov Yuriy S., Lebedev Oleg B. Hybrid algorithm for route configuration formation taking into account uncertainty in terrain information // Lecture Notes in Networks and Systems: Proceedings of the IX International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry». – Springer, Czech Republic, 2025. – Vol. 2. – P. 248-265.
23. Чекалина Е.А., Дмитренко М.Е., Попов А.И. Управление роем беспилотных летательных аппаратов в тактическом звене управления // Технологии. Инновации. Связь: Сб. материалов научно-практической конференции. – СПб., 2022. – С. 181-185.

REFERENCES

1. Nogin A.A. Osnovnye elementy strukturnoy arkhitektury sensorykh uzlov [Basic elements of the structural architecture of sensor nodes], *Nauchnyy zhurnal* [Scientific Journal], 2018, No. 5 (28), pp. 37-39.
2. Markov A.V., Siman'kov V.I. Metodika rascheta traektoriy poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya nablyudeniya za mestnost'yu [Methodology for calculating flight trajectories of unmanned aerial vehicles for terrain surveillance], *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki* [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2019, No. 4 (122), pp. 57-63.
3. Tsi Ch. Issledovanie planirovaniya traektorii rotornogo BPLA dlya raspyleniya pestitsidov [Study on trajectory planning of rotary UAV for pesticide spraying], *student*, 2021, Vol. 4, No. 7, pp. 654-669.
4. Rodionov A.S., Matkurbanov T.A., Khayrullaev U.B. Optimizatsiya traektorii poleta BPLA dlya monitoringa sel'skokhozyaystvennykh zemel' [Optimization of UAV flight trajectory for monitoring agricultural lands], *Problemy informatiki* [Problems of Informatics], 2025, No. 1 (66), pp. 5-17.
5. Stefas N., Plonski P.A., Isler V. Approximation algorithms for tours of orientation varying view cones, *The International Journal of Robotics Research*, 2020, Vol. 39, No. 4, pp. 389-401.
6. Rodionov A.S., Matkurbanov T.A. Planirovanie traektorii poleta BPLA pri monitoringe bol'shoy oblasti [Planning the flight trajectory of a UAV when monitoring a large area], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2025, Vol. 24 (3), pp. 791-827.
7. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu., Kostyukov V.A., Khussey F., Kadim A. Algoritmy planirovaniya traektoriy v dvumernoy srede s prepyatstviyami [Algorithms for trajectory planning in a two-dimensional environment with obstacles], *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and Automation], 2022, Vol. 21 (3), pp. 459-492.
8. Kostyukov V.A., Medvedev M.Yu., Pshikhov V.Kh. Planirovanie dvizheniya nazemnykh robotov v srede s prepyatstviyami: algoritmy postroeniya traektoriy v gruppe pri zadannom shablone [Motion planning of ground robots in an environment with obstacles: algorithms for constructing trajectories in a group with a given template], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2023, Vol. 24, No. 1, pp. 33-45.
9. Liu B., Xiao X., Stone P. A Lifelong Learning Approach to Mobile Robot Navigation, *In IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, Vol. 6 (2), pp. 1090-1096.
10. Pradhan S., Mandava R.K., Vundavilli P.R. Development of path planning algorithm for biped robot using combined multi-point RRT and visibility graph, *International Journal of Information Technology*, 2021, Vol. 13, pp. 1513-1519.
11. Kamil A.R.M., Shithil S.M., Ismail Z.H., Mahmud M.S.A., Faudzi A.A.M. Path Planning Based on Inflated Medial Axis and Probabilistic Roadmap for Duct Environment, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pringer, Singapore, 2022, Vol. 834.
12. Chen G., Luo N., Liu D., Zhao Z., Liang Ch. Path planning for manipulators based on an improved probabilistic roadmap method, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, Vol. 72.
13. Janos J., Vonasek V., Penicka R. Multi-Goal Path Planning Using Multiple Random Trees, *IEEE Robotics and Automation Letter*, 2021, Vol. 6 (2), pp. 4201-4208.
14. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Modelirovanie postroeniya traektorii podvizhnogo ob'ekta na osnove metodov mnogokriterial'noy optimizatsii [Modeling the construction of the trajectory of a moving object based on multicriteria optimization methods], *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tver State Technical University. Technical Sciences], 2025, No. 3 (27), pp. 103-119.
15. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu. Sravnitel'nyy analiz tsentralizovannogo i detsentralizovannogo algoritmov dvizheniya stroem BLA mul'tikopternogo tipa [Comparative analysis of centralized and decentralized algorithms for formation movement of multicopter UAVs], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2022, No. 1 (225), pp. 121-139.
16. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Avtonomnaya mul'tiagentnaya sistema upravleniya gruppoy robotov [Autonomous multi-agent control system for a group of robots], *Tr. XXII Natsional'noy konferentsii po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2025* [Proceedings of the XXII National Conference on Artificial Intelligence with International Participation KII-2025]. Saint Petersburg: Izd-vo SPb FITS RA, 2025, Vol. 2, pp. 307-319.
17. Medvedev M.Yu., Kostyukov V.A., Pshikhov V.Kh. Optimizatsiya dvizheniya mobil'nogo robota na ploskosti v pole konechnogo chisla istochnikov-repellerov [Optimization of the motion of a mobile robot on a plane in the field of a finite number of repeller sources], *Tr. SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2021, Vol. 19 (1), pp. 43-78.
18. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Movement of a group of unmanned aerial vehicles using an autonomous intelligent control system, *Pattern Recognition and Image Analysis. Journal special issue XXI national conference on artificial intelligence with international participation. Section «Intelligent agent, robots, intelligent control, computer vision»*. Pleiades Publishing, Ltd., 2025, No. 4, pp. 543-548.

19. Baygutlina I.A. Realizatsiya novykh servisov s ispol'zovaniem robototekhnicheskikh kompleksov [Implementation of new services using robotic systems], *Slavyanskiy forum* [Slavic Forum], 2021, No. 4 (34), pp. 162-170.
20. Lebedev B.K., Lebedev O.B., Beskhmel'nov M.I. Detsentralizovannoe upravlenie gruppoy avtonomnykh podvizhnykh ob"ektov pri formirovaniy traektorii dvizheniya [Decentralized control of a group of autonomous moving objects in the formation of a motion trajectory], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 6, pp. 177-190.
21. Uspanova R.A. Aktual'nye problemy upravleniya gruppoy BPLA [Current problems of managing a group of UAVs], *Tr. trinadtsatoy obshcherossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: v 2kh t. Ser. Biblioteka zhurnala «Voenmekh. Vestnik BGTU»* [Proceedings of the thirteenth all-Russian youth scientific and technical conference: in 2 vol. Ser. Library of the magazine «Voenmekh. Bulletin of BSTU»]. St. Petersburg, 2021, No. 76, pp. 128-130.
22. Beskhmel'nov Maksim I., Vyatkin Artem A., Dobrikov Yuriy S., Lebedev Oleg B. Hybrid algorithm for route configuration formation taking into account uncertainty in terrain information, *Lecture Notes in Networks and Systems: Proceedings of the IX International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry»*. Springer, Czech Republic, 2025, Vol. 2, pp. 248-265.
23. Chekalina E.A., Dmitrenko M.E., Popov A.I. Upravlenie roem беспилотnykh letatel'nykh apparatov v takticheskoy zvene upravleniya [Controlling a swarm of unmanned aerial vehicles at the tactical control level], *Tekhnologii. Innovatsii. Svyaz': Sb. materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technologies. Innovation. Communication: Collection of materials of the scientific and practical conference]. St. Petersburg, 2022, pp. 181-185.

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.: 8908-5135512; кафедра информатики Института компьютерной безопасности и цифровых технологий РТУ МИРЭА; д.т.н.; профессор.

Lebedev Boris Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: lebedev.b.k@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: +79282897933; V.M. Kureichik Computer-Aided Design Systems Department; 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, Institute of Computer Security and Digital Technologies RTU MIREA; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 004.853

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-173-185

В.Д. Матвеев, Д.С. Кобзарь, Я.Д. Лапкин, Р.Р. Богданов, А.С. Изюмов

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕМАНТИКИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА

Реализовать управление роботами можно большим количеством различных интерфейсов – от традиционных пультов до технологий дополненной реальности. Однако у всех подобных интерфейсов существует ряд ограничений, особенно остро возникающих в сервисной робототехнике. Они связаны с длительным обучением человека-оператора, не интуитивным для человека управлением и необходимостью полного вовлечения человека. С другой стороны, сегодня появилась новое направление, связанное с большими языковыми моделями, которые способны обрабатывать естественный язык с последующим его переводом в команды управления роботом. Существует ряд работ, демонстрирующих возможность использования языковых моделей в задачах планирования действий робота. На основе анализа существующих работ предложен новый метод управления мобильным роботом, объединяющий преимущества других методов. Метод позволяет планировать сценарии для робота, получая на вход миссию от человека на естественном языке, ТОП робота и информацию с его датчиков. В статье также описана последовательность настройки системы с использованием большой языковой модели для решения данной задачи – представлено три варианта инструкции для нейронной сети, поэтапно улучшающих достижимость формируе-