

## АВТОНОМНАЯ МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ РОБОТОВ

Б.К. Лебедев (*lebedev.b.k@gmail.com*)

О.Б. Лебедев (*lebedev.ob@mail.ru*)

М.И. Бесхмельнов (*m\_beskhmelnov@mail.ru*)

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

В работе рассмотрены методы управления группой беспилотных летательных аппаратов, обладающих свойствами автономности. Проведен анализ основных стратегий управления и их особенностей. Определены общие принципы и механизмы, необходимые для разработки алгоритма обеспечивающего групповое управление коллектива воздушных роботов, позволяющие каждому роботу автономно ориентироваться в пространстве. При этом каждый робот должен сам, устанавливая свое местоположение, используя данные с камеры или лидара идентифицировать препятствия, а также формировать наиболее рациональный маршрут и принимать решения, направленные на достижения цели и выполнения задачи.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, автономность, искусственный интеллект, децентрализованное управление, роевая стратегия.

### Введение

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в составе групп, или, как принято говорить, роев, представляет собой одно из наиболее перспективных направлений развития современной робототехники [Пшихопов и др., 2015], [Нейдорф и др., 2016].

Главная задача при организации роя БПЛА – существенно повысить эффективность управления формированием и поддержанием заданной геометрической структуры, или строя, в котором каждый аппарат занимает строго определенное место относительно других. Это особенно важно при выполнении разнообразных задач, начиная от мониторинга больших территорий и заканчивая поисково-спасательными операциями. Для достижения этой цели необходимо разработать эффективные методы и алго-

ритмы децентрализованного управления, что повышает надежность системы. В случае отказа одного или нескольких аппаратов, весь рой продолжает функционировать, адаптируясь к изменившимся условиям.

Ключевой принцип децентрализованного управления заключается в том, что основная вычислительная нагрузка распределяется между самими аппаратами. Каждый БПЛА в рое принимает решения на основе локальной информации, получаемой от своих непосредственных «соседей». Полностью децентрализованное управление подразумевает, что каждый дрон в группе самостоятельно определяет свою позицию в строю, опираясь только на данные, полученные от ближайших дронов.

Существуют разные подходы к децентрализованному управлению роем дронов, включая коллективный, стайный и роевой методы.

В коллективном подходе дроны действуют скоординировано, придерживаясь общих правил, установленных централизованно, но при этом сохраняют некоторую самостоятельность в принятии решений.

Стайный подход отличается большей гибкостью и адаптивностью. В этом случае каждый дрон реагирует на движения соседних аппаратов, приспосабливаясь к меняющимся условиям окружающей среды.

Роевая стратегия подразумевает наибольшую степень децентрализации, где аппараты взаимодействуют исключительно с ближайшими соседями, не имея ясного представления о глобальной структуре строя. Определение строя – это задание требуемого взаимного расположения аппаратов на плоскости или в пространстве.

Ключевой аспект при разработке такой системы – способность не просто формировать группы БПЛА с назначением «ведущего» аппарата, но и автономно планировать выполнение сложных полетных заданий, учитывая множество переменных факторов. Взаимодействие между аппаратами критически важно для координации действий всего роя и обеспечения успешного выполнения миссии [Котов и др., 2024].

Во-первых, система непрерывно измеряет текущее состояние каждого БПЛА и всего роя в целом. Это включает в себя множество параметров: координаты, высоту, скорость, углы ориентации, статус бортовых систем, данные с целевого оборудования и уровень заряда батареи.

Во-вторых, система сравнивает текущее состояние с желаемым состоянием, определенным на основе заданной миссии. Разница между этими состояниями представляет собой отклонение, которое система стремится минимизировать [Лебедев и др., 2024].

В-третьих, на основе анализа этого отклонения система вычисляет необходимые управляющие воздействия, передаваемые каждому БПЛА для корректировки его положения и действий [Лебедев и др., 2024].

Для получения эффективного результата, при разработке системы такого уровня, необходимо решить задачи в сфере искусственного интеллекта, анализа и обработки больших объемов данных и надежного программного и аппаратного обеспечения [Карпенко, 2021].

## **1. Использование интеллектуальных технологий для решения задач планирования и управления**

В контексте возрастающей сложности задач планирования и управления интеллектуальные технологии приобретают первостепенное значение как средство их эффективного решения и оптимизации. Неопределенность, которая является неотъемлемой частью любой сложной системы, компенсируется использованием интеллектуальных алгоритмов, анализирующих огромный объем данных и принимающих решения в условиях неполной информации [Городецкий, 2016].

Одним из наиболее распространенных сформировавшихся подходов являются экспертные системы (ЭС).

Вторым подходом является разработка программных продуктов, которые воспроизводят некоторые когнитивные возможности человека: распознавание естественного языка, распознавание образов в виде изображений, логические рассуждения и т.д.

В качестве альтернативы используют третий подход – создание искусственных нейронных сетей (ИНС), способных эффективно решать задачи, быстро выполнять обучение на больших объемах данных и обладающих свойством адаптивности к реальным условиям.

Наиболее эффективным является комбинированный подход, объединяющий преимущества разных методов, и позволяющий решать сложные задачи управления и планирования с наилучшим результатом.

## **2. Интеллектуальная система управления группой роботов**

В данной работе предлагается система управления, которая представляет собой интеграцию нескольких ключевых компонентов: ЭС, набора специализированных компьютерных программ, ИНС, а также блока адаптации, основанного на принципах конечных автоматов. Основная цель этой системы заключается в том, чтобы, например, обучить рой БПЛА, не только объединяться в группы и выбирать лидера, но и разрабатывать стратегические планы для выполнения поставленных задач.

Эффективность работы группы БПЛА обеспечивается благодаря наличию заранее подготовленного перечня действий, который представлен в виде набора правил, встроенных в ЭС. Эти правила позволяют БПЛА выполнять различные задачи, адаптируясь к меняющимся условиям на местности.

Оператор задаёт полётное задание, а группа БПЛА задействует полученные от него данные, и сведения из окружающей среды для выполнения задач. Разработана система правил, при помощи которой БПЛА контролируют расстояние между собой и не дают им сблизиться с препятствиями [Веселов и др., 2021].

Авторами разработаны алгоритмы на основе коллективной альтернативной адаптации (КАА), позволяющие БПЛА откликаться на изменения в окружающей среде, что повышает взаимодействие между БПЛА, адаптирует их поведение к текущим условиям, что особенно важно для успешного выполнения задачи в нетривиальных и изменяющихся условиях. Ключевая идея разработанной системы состоит в оптимальном построении маршрута передвижения каждого робота для достижения общей цели, предполагающее определение наиболее эффективной конфигурации траектории, учитывающей ряд ограничений: особенности самой цели, встречающиеся препятствия, расстояние между роботами.

Наиболее простым способом, позволяющим коллективу роботов эффективно выполнять задачи, является его разделение на кластеры, которое происходит по разным критериям, например, местоположения роботов в пространстве или разновидность решаемых задач. Кластеру присваивается индивидуальный номер, по которому происходит определение местоположения и выполнение действий каждого робота в текущий момент времени. При этом алгоритм работает последовательно и заключается в передаче информации по цепочке, т.е. каждый робот получает команды от предыдущего и передает их следующему. Такой подход обеспечивает согласованность действий, минимизирует конфликты и позволяет оптимизировать весь процесс. Разработана система управления, которая решает задачу автоматического перестроения группы в условиях неопределенности, т.е. роботы должны уметь адаптироваться к динамически изменяющимся условиям, избегая столкновений и сохраняя общую цель [Байгутлина, 2021].

Построение группы БПЛА в воздухе осуществляется на основе заранее разработанных шаблонов (схем), представляющих собой набор правил, заданных в определенном формате и загруженных в облачную систему. Эти шаблоны определяют желаемую конфигурацию группы БПЛА в зависимости от выполняемой задачи.

Для решения задачи управления группой мобильных роботов был использован подход, основанный на принципах коллективного интеллекта. Система должна обеспечивать автоматическое перестроение роботов в динамической среде с препятствиями, координируя их действия для достижения общей цели. Рой должен эффективно распределять задачи между своими роботами, а также при выходе из строя одного или нескольких роботов выполнить переназначение задач среди оставшихся.

В основе управления каждым БПЛА лежит конфигурация, объединяющая нейронную сеть и конечный автомат. Нейронная сеть выполняет роль «сенсорного анализатора» и «классификатора» – она обрабатывает множество вещественных входных данных от различных датчиков (скорость, положение, расстояние до препятствий, данные от других БПЛА), переводя их в дискретное логическое представление, более удобное для работы конечного автомата. Конечный автомат, в свою очередь, используя эти логические сигналы, вырабатывает управляющие воздействия, определяющие параметры движения БПЛА. Такая гибридная система позволяет сочетать адаптивность нейронной сети к непредсказуемым ситуациям с детерминированностью и предсказуемостью конечного автомата [Успанова и др., 2021]. Конфигурация системы строится на мультиагентном подходе, где каждый БПЛА рассматривается как самостоятельный агент, который функционирует как с окружающей средой, так и с другими представителями группы, что дает возможность решать сложные задачи коллективного управления [Лебедев и др., 2024], [Морозова, 2015], [Веселов и др., 2021].

### 3. Управление движением группы роботов

В данной работе представлено исследование инновационного метода управления группой автономных мобильных роботов, организованных в линейный строй. Ключевая особенность этого подхода – децентрализованный характер управления. Каждый робот, за исключением ведущего, обладает полной автономностью и принимает решения, основываясь исключительно на информации, полученной от своих непосредственных соседей. Роботы выстроены в линию и пронумерованы от  $R_0$  (ведущий робот) до  $R_n$  (замыкающий робот). Такая организация требует от каждого робота  $R_i$  (где  $i=1,2,\dots,n$ ), кроме ведущего  $R_0$ , поддержания строго определенного поведения: движения параллельно траектории предшествующего робота  $R_{i-1}$  с постоянной скоростью  $V_i$ , равной скорости ведущего робота  $V_0$ , и поддержания неизменного расстояния  $D$  между собой и роботом  $R_{i-1}$ . Таким образом, каждый робот  $R_i$  непрерывно корректирует свою траекторию, «выравниваясь» по траектории робота  $R_i$ , обеспечивая тем самым поддержание строя.

Каждый робот описывается вектором состояния  $W_i=(x_i, y_i, \alpha_i, h_i, V_i)$ , где  $(x_i, y_i)$  – координаты робота в абсолютной системе координат,  $V_i$  – его скорость,  $\alpha_i$  – угол между вектором скорости  $V_i$  и базовой линией, а  $h_i$  – модуль вектора скорости (по сути, скалярная величина скорости). Для начала движения задаются параметры ведущего робота: угол  $\alpha_0$  между вектором его скорости и базовой линией, а также постоянное расстояние  $D$  между роботами в строю. Суть децентрализованного управления заключается в достижении равенства условий движения для каждого робота относительно своего предшественника [Морозова, 2015].

Каждый ведомый робот  $R_i$  стремится выполнить два основных условия: поддержание постоянного расстояния  $D$  до робота  $R_{i-1}$  и движение параллельно траектории робота  $R_{i-1}$ . Это достигается за счет постоянного обмена информацией между соседними роботами, позволяющего каждому роботу оценивать своё положение относительно соседа и корректировать свою скорость и направление движения. В алгоритме управления учитывается информация о текущем положении и скорости как самого робота, так и робота, идущего впереди него. Таким образом, каждый робот автономно регулирует свою траекторию, стремясь к идеальному выполнению условий поддержания строя, при этом основываясь лишь на данных от своего непосредственного предшественника. Это исключает необходимость глобального планирования траекторий и повышает устойчивость системы к сбоям отдельных роботов. В случае, если один из роботов выходит из строя, остальные продолжают двигаться в соответствии с установленными правилами, адаптируясь к изменившимся условиям. Таким образом, децентрализованный подход обеспечивает робастность и масштабируемость системы управления группой мобильных роботов [Лебедев и др., 2024], [Морозова, 2015].

Основная идея при управлении ведомыми роботами заключается в выполнении (достижении  $R_i$  курса робота  $R_{i-1}$ ) равенств 3.1:

$$\begin{aligned} 1. & V_{i-1}(t) = V_i(t) \\ 2. & h_{i-1}(t) = h_i(t) \\ 3. & x_i(t) - x_{i-1}(t) = D \\ 4. & y_i(t) = y_{i-1}(t) \\ 5. & \alpha_i(t) = \alpha_{i-1}(t) = \alpha_0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$\varphi_i(t) = \alpha_i(t) - \alpha_{i-1}(t)$  — угол между  $V_{i-1}(t)$  и  $V_i(t)$ .

Система управления группой роботов, движущихся параллельно, основана на непрерывном пересчете параметров движения каждого робота в режиме реального времени. Представьте себе колонну роботов, где каждый робот  $R_i$  движется рядом с предыдущим  $R_{i-1}$ . Задача системы – поддерживать заданное расстояние и направление движения между роботами, корректируя их траекторию. Ключевым элементом является вычисление ошибки каждого робота, обозначаемой  $\delta_i$ . Эта ошибка представляет собой сумму отклонений по различным параметрам: горизонтальное расстояние ( $x$ ), вертикальное расстояние ( $y$ ), высота ( $h$ ) и угол ориентации ( $\alpha$ ). Каждое отклонение взвешивается соответствующим коэффициентом ( $k_1, k_2, k_3, k_4$ ), отражающим важность данного параметра для поддержания строя. Общая ошибка всей группы роботов  $\Delta$  является суммой индивидуальных ошибок  $\delta_i$  каждого робота:  $\Delta = \sum_i \delta_i$ .

$$\delta_i = k_1(|D - |x_i(t) - x_{i-1}(t)|| + k_2|y_i(t) - y_{i-1}(t)| + k_3|h_i(t) - h_{i-1}(t)| + k_4|\alpha_i(t) - \alpha_0|). \quad (3.2)$$

Система управления стремится минимизировать общую ошибку  $\Delta$ , ограничивая при этом максимальные значения отклонений скорости  $\delta V$  и угла «рыскания» ( $\varphi_{i,i-1}(t+1)$ ). Угол «рыскания»  $\varphi_i(t)$  – это разница в углах ориентации соседних роботов  $q(t)-\alpha_{i-1}(t)$ . Система использует четыре основных правила коррекции [Веселов Г.Е. и др., 2021].

**Правило 1:** Коррекция угла ориентации. Если угол рыскания  $\varphi_i(t)$  между роботом  $R_i$  и его предшественником  $R_{i-1}$  больше нуля (т.е., робот  $R_i$  отклоняется от курса  $R_{i-1}$ ), система корректирует угол ориентации  $\alpha_i(t)$  робота  $R_i$ , стремясь уменьшить  $\varphi_i(t)$  до нуля. Эта коррекция выполняется в соответствии с определенным алгоритмом (равенства 3.1). Цель – выравнивание курса робота  $R_i$  с курсом  $R_{i-1}$ .

**Правило 2:** Коррекция высоты. Если существует вертикальное расхождение  $\varepsilon_h = h_i(t) - h_{i-1}(t)$  между высотами роботов  $R_i$  и  $R_{i-1}$ , и это расхождение не превышает заданного порога, система корректирует скорость изменения высоты  $h_i(t)$  робота  $R_i$ , используя выражение  $h_i(t+1) = h_i(t) + \zeta_v$ . Параметр  $\zeta_v$  представляет собой корректировку скорости, вычисляемую исходя из величины расхождения  $\varepsilon_h$ . Задача – сгладить разницу высот между роботами. Время отработки отклонения критический фактор – его превышение приведет к отказу от коррекции.

**Правило 3:** Коррекция по вертикальному смещению. Если существует вертикальное смещение  $y_i(t) - y_{i-1}(t) = \varepsilon_y$  между роботами  $R_i$  и  $R_{i-1}$ , и это смещение больше нуля, система выполняет мгновенную коррекцию вертикальной координаты робота  $R_i$ :  $y_i(t+1) = y_i(t) + \zeta_y$ . Параметр  $\zeta_y$  – это величина корректировки, зависящая от  $\varepsilon_y$ . Цель – минимизировать  $|\varepsilon_y|$ , приводя к выравниванию вертикального положения роботов.

**Правило 4:** Коррекция по горизонтальному смещению. Если горизонтальное расстояние  $x_i(t) - x_{i-1}(t) = \varepsilon_x$  между роботами  $R_i$  и  $R_{i-1}$  больше заданного расстояния  $D$ , система корректирует горизонтальную координату  $x_i(t)$  робота  $R_i$ :  $x_i(t+1) = x_i(t) + \zeta_x$ . Параметр  $\zeta_x$  служит для внесения поправок в траекторию робота, основываясь на разнице между абсолютной величиной ошибки расстояния ( $|\varepsilon_x|$ ) и целевым расстоянием  $D$ . Цель состоит в минимизации  $|\varepsilon_x| - D$ . Коррекция реализуется путем кратковременного изменения угла ориентации робота  $R_i$  на величину  $\delta_i$ , рассчитанную на основе ошибки. В течение короткого интервала времени  $\delta_i$  робот движется под скорректированным углом  $\alpha_i^*(t) = \alpha_i(t) + \delta_i$ , после чего возвращается к исходному углу  $\alpha_i(t)$ . Такой подход обеспечивает плавную коррекцию траектории. Система непрерывно контролирует и корректирует ошибки для поддержки заданного строя. Важно отметить, что конкретные значения параметров  $k_1, k_2, k_3, k_4, D, \zeta_v, \zeta_x, \zeta_y$  и алгоритм коррекции угла (3.1) определяют эффективность и точность управления системой. Выбор этих параметров зависит от характеристик роботов, условий окружающей среды и требований к точности движения, рис. 1.

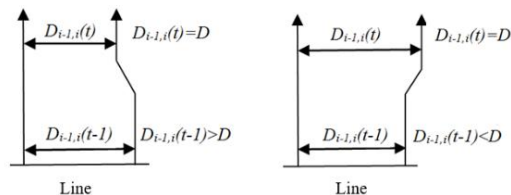


Рис. 1. Схема маневра, выполняемого роботом для коррекции параметра  $x_i(t)$

Первый маневр предназначен для решения задачи управления при условии оказания управляющего воздействия на направление перемещения робота, а второй – при условии оказания управляющего воздействия на скорость агента [Веселов и др., 2021].

#### 4. Движение роботов на основе коллективной адаптации

Система управления группой роботов осуществляется алгоритмом КАА. В данном контексте, объектом адаптации для каждого отдельного робота  $R_i$  служит вектор  $W_i$ , определяющий его состояние в пространстве. Этот вектор включает в себя несколько параметров: координаты робота  $(x_i, y_i)$  в абсолютной системе координат, его ориентацию  $\alpha_i$  (угол поворота относительно оси  $Z$ ), высоту  $h_i$  (робот имеет вертикальную степень свободы) и, наконец, его линейную скорость  $V_i$ .

Совокупность всех векторов  $W_i$  для каждого робота в группе составляет коллективный объект оптимизации. Другими словами, цель управления – найти оптимальное сочетание параметров всех роботов, обеспечивающее эффективное выполнение групповой задачи. Для достижения этой цели, каждому параметру  $p_{ij}$  вектора  $W_i$  (где  $p_{ij}$  может представлять собой  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $h_i$  или  $V_i$ ) присваивается свой собственный автомат адаптации (АА) [Котов и др., 2024], [Городецкий, 2016].

Каждый АА моделирует поведение объекта адаптации в окружающей среде, используя для этого конечный автомат с двумя группами состояний. Первая группа,  $C_1 = \{c_{1l} | l=1, 2, \dots, g\}$  и вторая группа,  $C_2 = \{c_{2l} | l=1, 2, \dots, g\}$ , представляют две альтернативные стратегии поведения:  $A_1$  – изменение значения параметра и  $A_2$  – сохранение его текущего значения. Параметр « $g$ » определяет глубину памяти автомата, т.е., сколько предыдущих состояний учитывается при принятии решения. Выходной алфавит автомата  $A = \{A_1, A_2\}$  отражает эти две стратегии.

В качестве входного сигнала автомат использует отклики среды, представленные алфавитом  $Q = \{+, -\}$ . Символ «+» обозначает «поощрение» (ситуация, когда изменение параметра приблизило систему к цели), а символ «-» обозначает «наказание» (ситуация, когда изменение параметра ухудшило результат). Переходы между состояниями автомата определяются этим входным сигналом. Схема представлена на рис. 2.



Рассмотрим функционирование одного АА. Начальное состояние выбирается случайным образом. Автомат получает сигнал «поощрение» (+) или «наказание» (-), в зависимости от того, улучшило ли изменение параметра общее состояние системы. На основе полученного сигнала и текущего состояния, автомат переходит в новое состояние, выбирая либо  $A_1$  (изменение параметра), либо  $A_2$  (без изменений). Локальная цель каждого АА – достижение состояния, при котором его «оценка» равна нулю. Оценка определяет степень близости текущего значения параметра к его оптимальной конфигурации [Котов и др., 2024].

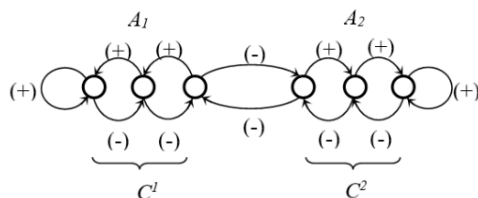


Рис. 2. Схема переходов автомата адаптации

Каждый автономный агент (робот) стремится к локальной оптимизации своего параметра. Глобальная оптимизация поведения всей группы роботов достигается за счет эмерджентного взаимодействия этих локальных оптимизаций. Механизм адаптивен к динамике окружающей среды, обеспечивая непрерывную корректировку параметров как на уровне отдельных агентов, так и на уровне системы в целом, что гарантирует эффективное и гибкое управление групповым поведением. Глубина памяти «g» является критическим параметром, определяющим способность системы к обучению на основе «исторических» данных. Увеличение «g» расширяет горизонт планирования и адаптации. Процесс КАА, который управляет передвижением группы роботов, выстроенных в линию, осуществляется в рамках четко определенной структуры, состоящей из четырех последовательных тактов для каждого отдельного робота на каждом временном шаге  $t$ . Основной локальной целью данного процесса является достижение состояния, при котором оценка адаптации объекта равняется нулю. В то же время глобальная цель всего коллектива роботов заключается в достижении определенного состояния  $S$ , то есть таких значений параметров для роботов, при которых будет минимизирована «Ошибка перемещения». В рамках процесса КАА, который управляет движением группы роботов, необходимо отметить, что перепланирование параметров движения для каждого робота, обозначенного как  $R$  происходит в каждый момент времени  $t$ .

В ходе первого такта коллективной адаптации для каждого параметра  $R_i$  вычисляются значения вектора  $W_i$ , который представляет собой набор данных, необходимых для дальнейшего анализа.

На втором такте происходит генерация откликов среды для каждого автомата адаптации, которые могут быть классифицированы как «поощрение» или «наказание», в зависимости от того, насколько успешно робот выполняет поставленные задачи.

На третьем этапе каждый механизм адаптации переходит в новое состояние, основываясь на полученной информации об окружающей среде. Это позволяет роботам реагировать на изменения и подстраивать свои действия.

На четвертом этапе, в зависимости от состояния механизма адаптации, принимается решение о дальнейших действиях:

- Если механизм адаптации показывает, что текущая стратегия работает хорошо (состояние группы  $C^1_{ij}$ ), то параметры поведения робота прежние.
- Если же механизм адаптации сигнализирует о необходимости изменений (состояние группы  $C^2_{ij}$ ), то параметры поведения корректируются пропорционально отклонению  $\mu_{ij}(t)$ , чтобы адаптироваться к новым условиям [Котов Д.В. и др., 2024].

## 5. Экспериментальные исследования

Для тестирования алгоритмов управления коллективом автономных БПЛА были заданы следующие условия полетного задания: горизонтальный полет (автономный); высота не меняется (постоянная); коллектив осуществляет полет из точки взлета до указанной цели с огибанием встречных препятствий и последующим возвратом в точку взлета. Коллектив БПЛА содержит до шести аппаратов. Расстояние между БПЛА в коллективе варьируется от 0,5 метра до 40 метров. Определенная цель находится на расстоянии от 1 до 10 километров от точки взлета. Максимальная скорость – до 130 км/ч. Типы препятствий включают: прямоугольные формы (моделирующие строения, дома) или круглые формы (моделирующие деревья, лес), рис. 3. Коллектив воздушных роботов при выполнении задания, осуществляет полет в виде неких геометрических фигур: линия, колонна, треугольник и т.д. рис. 4.

В качестве критерия была использована аддитивная свертка, в которой параметрами, позволяющими оценить качество выполнения задачи при движении коллектива БПЛА являются: длина траектории ( $P_L$ ), показатель безопасности ( $S_m$ ), время выполнения задания ( $t_m$ ), коэффициент успешности миссии ( $M$ ) [Пшихопов и др., 2015].

При этом степень важности того или иного параметра определяется при помощи коэффициентов  $K_1, K_2, K_3$ , и  $K_4$ .

$$F=\kappa_1P_L+\kappa_2S_m+\kappa_3t_m+\kappa_4M. \quad (5.1)$$

При этом необходимо повысить показатель безопасности ( $S_m$ ) и коэффициент успешности миссии ( $M$ ), а показатели длина траектории ( $P_L$ ), время выполнения задания ( $t_m$ ) – понизить.

Проведя сравнительный анализ полученных после тестирования результатов (в тестах применялся полученный новый метод управляющий коллективом БПЛА в строе), было установлено, что при его использовании результативность реализации поставленной задачи увеличилась на 18-20 процентов.



Рис. 3. Обход препятствий



Рис. 4. Построение группы БПЛА

В табл. 1 указаны усредненные значения используемых в работе параметров и сравнение их с существующими методами. Оценка временной сложности представленного метода составляет

Таблица 1

Методы	Показатели			
	$S_m$	$P_L$	$t_m$	F
Метод потенциальных полей 1	0,104	0.01975	0.01593	0,6
Метод потенциальных полей 2	0,028	0,00665	0,00532	0,2
Метод диаграмм Вороного	0,44	0,02052	0,01728	0,6
Метод реактивной навигации	0,656	0.02412	0.02473	0,8
Метод управления с применением нечетких систем	0,495	0,02507	0,01253	1,0
DVN-метод в классическом базисе	0,068	0.0313	0.07008	1,0
DVN-метод в базисе формальных нейронов	0,068	0,0313	0,07008	1,0
Нейросетевой гибридный метод	0,076	0.0317	0.03795	1,0
Генетический поиск без картографии	0,074	0,01353	0,01103	0,4
Генетический поиск с картографией	0,565	0.03094	0.023 73	1,0
Метод планирования с использованием неустойчивых режимов	0,317	0,02032	0,01964	0,8
<b>Разработанный метод</b>	<b>0,176</b>	<b>0.0324</b>	<b>0.0162</b>	<b>1.0</b>

## Заключение

В данной работе представлено исследование новых методов, предназначенных для моделирования движения группы роботов.

Ключевым элементом разработанной системы управления является алгоритм коллективной альтернативной адаптации. Разработанная структура процесса КАА обеспечивает согласованное движение всей группы ро-

ботов. Суть механизма адаптации заключается в сопоставлении каждому параметру вектора состояния робота своего собственного автомата адаптации. Эти автоматы, работая параллельно и взаимодействуя друг с другом, обеспечивают гибкое и эффективное управление.

Каждый робот принимает решения автономно, основываясь на информации о своем собственном состоянии и состоянии ближайших соседей, что обеспечивает высокую устойчивость. Система способна автоматически корректировать отклонения, обеспечивая поддержание заданного построения. Для компенсации отклонений в работе роботов разработан специальный маневр, представляющий собой последовательность управляющих действий, которые автоматически рассчитываются на основе текущей ситуации. Проведены тестовые испытания и сравнения с существующими методами и алгоритмами, подтвердившие эффективность разработанного метода.

### Список литературы

- [Пшихопов и др., 2015] Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В. Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // Проблемы управления, 2015. – С. 66-74. *(статья в журнале, авторов не более трех)*.
- [Нейдорф и др., 2016] 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. – С. 127-143. *(статья в журнале, авторов более трех)*.
- [Котов и др., 2024] Котов Д.В., Лебедев О.Б. Управление передвижением группы БПЛА с соблюдением геометрической структуры строя на основе альтернативной коллективной адаптации // Известия ЮФУ. Технические науки. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2024. – С. 155-167. *(статья в журнале, авторов не более трех)*.
- [Лебедев и др., 2024] Лебедев Б.К., Лебедев О.Б., Бесхмельнов М.И. Децентрализованное управление группой автономных подвижных объектов при формировании траектории движения // Известия ЮФУ. Технические науки. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2024. – С. 177-190. *(статья в журнале, авторов не более трех)*.
- [Карпенко, 2021] Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. – 3-е изд. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 448 с. *(книга, авторов не более трех)*.
- [Городецкий, 2016] Городецкий В.И. Управление коллективным поведением роботов в автономной миссии // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – С. 40-54. *(статья в журнале, авторов не более трех)*.
- [Байгутлина, 2021] Байгутлина И.А. Реализация новых сервисов с использованием робототехнических комплексов // Славянский форум, 2021. – С. 162-170. *(статья в журнале, авторов не более трех)*.

- [**Морозова, 2015**] Морозова Н.С. Децентрализованное управление движением строя роботов при динамически изменяющихся условиях // Искусственный интеллект и принятие решений, 2015. – С. 65-74. *(статья в журнале, авторов не более трех)*.
- [**Веселов и др., 2021**] Веселов Г.Е., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Управление движением группы мобильных роботов в колонне // Научно-практический журнал Информатизация и связь. – 2021. – № 3. – С. 7-11. *(статья в журнале, авторов не более трех)*.
- [**Успанова и др., 2021**] Успанова Р.А. Актуальные проблемы управления группой БПЛА // Труды тринадцатой общероссийской молодежной научно-технической конференции: в 2х т. Сер. Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», 2021. – С. 128-130. *(статья в журнале, авторов не более трех)*.