

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

УДК 004.7

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ В ГИБРИДНОЙ СРЕДЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

И. А. Черноиваненко, аспирант ВГТУ, Воронеж, Россия;
orcid.org/0009-0007-8510-4683, e-mail: chernoivanenko2000@mail.ru

О. Я. Кравец, д.т.н., профессор кафедры АВС ВГТУ, Воронеж, Россия;
orcid.org/0000-0003-0420-6877, e-mail: csit@bk.ru

Быстрая и эффективная доставка автономных мобильных объектов (АМО) становится одновременно жизненно важной и сложной задачей. Для решения этой проблемы предлагается система совместного планирования траекторий и распределения задач с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и беспилотных наземных транспортных средств (БНТС). В разработанной системе применяется генетический алгоритм (GA) для распределения задач между несколькими БПЛА и БНТС и используется усовершенствованный алгоритм быстрого исследования случайных деревьев (информированный RRT) для создания траекторий без препятствий. Для дальнейшего повышения эффективности выполнения задач и маршрутизации используется эволюционная стратегия адаптации ковариационной матрицы (CMA-ES). Предлагаемая интеграция этих подходов может использоваться для координации гетерогенных групп АМО, что значительно повышает скорость и эффективность миссий.*

Ключевые слова: гибридная среда, распределение задач, планирование траекторий, координация, автономный мобильный объект, генетический алгоритм, адаптация ковариационной матрицы, информированный алгоритм RRT*.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-51-60

Введение

Гибридные среды, объединяющие беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и беспилотные наземные транспортные средства (БНТС), привлекают все больший интерес ученых. Такая кооперация использует уникальные преимущества обеих платформ – БПЛА могут быстро оценивать недоступные зоны и доставлять необходимые товары, в то время как БНТС обеспечивают надежную логистическую поддержку на местах [1].

Эффективное распределение задач имеет важное значение для обеспечения оптимального использования имеющихся ресурсов. Различные подходы, такие как генетический алгоритм (GA), оптимизация роя частиц (PSO), алгоритм светлячков (FA), оптимизация на основе муравьиных колоний (ACO), были тщательно изучены на предмет их способности динамически распределять задачи в неопределенных и быстро меняющихся условиях.

Планирование траектории и оптимизация маршрута также важны для повышения безопасности и эффективности миссий с участием нескольких автономных мобильных объектов (АМО). Известные подходы, такие как RRT*, вероятностная дорожная карта (PRM) и поиск A*, широко используются для создания безопасных навигационных маршрутов в условиях сложных препятствий. В работе [2] авторы расширили RRT*, чтобы учесть ограничения движения нескольких АМО при выполнении скоординированных операций. Другие стратегии, такие как PRM, были дополнены методами оптимизации – например, в [3] предложен гибридный подход, сочетающий оптимизацию искусственных пчелиных семей (ABC) с

PRM, известный как ABC-PRMEP. Кроме того, для улучшения качества траектории, сокращения расстояний и времени выполнения миссий были использованы методы уточнения траектории, такие как эволюционная стратегия адаптации ковариационной матрицы (СМА-ES). Таким образом, интеграция четкого распределения задач и усовершенствованного планирования маршрута имеет решающее значение для успеха совместных миссий с участием нескольких объектов.

Несмотря на прогресс в области взаимодействия нескольких АМО, распределения задач и оптимизации траектории движения остается несколько важных проблем:

- частое использование однородных групп АМО, ориентированных исключительно на беспилотные летательные аппараты. Это не учитывает преимущества интеграции разнородных платформ;

- зависимость от статичных сред и предопределенных наборов задач. Многие из существующих подходов к распределению задач не учитывают непредсказуемую природу реальных условий, когда задачи могут возникать внезапно, а условия окружающей среды могут быстро меняться;

- при оптимизации траектории, как правило, делается упор только на практическую осуществимость или минимизацию длины траектории, однако не учитываются плавность хода, непрерывность и энергоэффективность.

Для решения этих проблем в данной статье представлена новая интегрированная система, разработанная специально для совместных операций гибридной среды. Ниже кратко излагаются основные результаты этой работы:

- динамическое распределение задач: разрабатывается улучшенная стратегия распределения задач на основе генетических алгоритмов, позволяющая динамически распределять задачи между разнородными группами БПЛА и БНТС. Это значительно повышает эффективность выполнения задач и межплатформенную координацию;

- гибридная оптимизация траектории: сочетание планирования траектории с использованием информированного алгоритма RRT* и стратегии СМА-ES для создания эффективных траекторий без столкновений в динамичных средах.

Постановка задач исследований

Система использует разнородный рой V , состоящий из беспилотных летательных аппаратов и наземных транспортных средств. В свою очередь, гетерогенный рой V состоит из БПЛА, которые сгруппированы в набор $U = \{U_1, \dots, U_{N_u}\}$ и БНТС $Y = \{Y_1, \dots, Y_{N_y}\}$. Каждая категория АМО имеет свои особенности и эксплуатационные ограничения, которые необходимо учитывать для обеспечения реалистичного и эффективного планирования.

БПЛА обладают значительными преимуществами в маневренности и скорости благодаря своей подвижности в воздухе. Однако воздушные АМО по своей сути ограничены максимальной грузоподъемностью $W_{\text{БПЛА}, \max}$ и ограниченным ресурсом, который обычно определяется временем автономной работы или запасами топлива [4]. Эти факторы накладывают ограничения либо на общую дальность перемещения $D_{\text{БПЛА}, \max}$, либо на продолжительность перемещения $T_{\text{БПЛА}, \max}$. Следовательно, любой запланированный маршрут перемещения БПЛА должен удовлетворять следующему ограничению:

$$\sum_{i=0}^{n-1} d(P_i, P_{i+1}) \leq D_{\text{БПЛА}, \max}, \quad (1)$$

где P_i обозначаются путевые точки, а d представляет собой евклидово расстояние между последовательными путевыми точками. Кроме того, на БПЛА накладываются кинематические ограничения, такие как ограничения скорости, радиуса поворота и ускорения. Обычно они решаются либо с помощью упрощенных моделей движения, либо с помощью последующей обработки для сглаживания траекторий. Крайне важно, чтобы БПЛА также соблюдали

безопасную дистанцию от препятствий окружающей среды и других объектов, чтобы избежать столкновений.

В отличие от этого БНТС работают исключительно на земле и должны полностью обходить все определенные препятствия, часто на более низких скоростях, чем их воздушные аналоги. Их основные преимущества заключаются в большей грузоподъемности $W_{\text{БНТС},\text{max}}$ и повышенной долговечности, что позволяет преодолевать большие расстояния $D_{\text{БНТС},\text{max}}$ или время работы $T_{\text{БНТС},\text{max}}$. Планирование маршрута БНТС также должно соответствовать следующему ограничению:

$$\sum_{i=0}^{n-1} d(P_i, P_{i+1}) \leq D_{\text{БНТС},\text{max}}. \quad (2)$$

Как и беспилотные летательные аппараты, транспортные средства также подвержены кинематическим ограничениям, которые могут включать ограничения, связанные с движением и проходимостью по местности. Обеспечение предотвращения столкновений как со статическими препятствиями, так и с другими объектами остается фундаментальным требованием.

Успешная работа этой разнородной гибридной среды зависит от разумного использования преимуществ каждой платформы – скорости и доступности БПЛА, а также грузоподъемности и долговечности БНТС. Эффективные стратегии координации необходимы для оптимального распределения задач и их эффективного и бесконфликтного выполнения в общей среде. Такая координация предполагает наличие надежных каналов связи между транспортными средствами и базовой станцией (БС) для поддержки управления, мониторинга и обмена информацией.

Основная цель предлагаемой системы состоит в том, чтобы рассчитать оптимальное распределение задач между БПЛА и БНТС и спланировать безопасные, эффективные и выполнимые траектории каждого автономного объекта для выполнения поставленных перед ним задач.

Первая задача – минимизировать общее время выполнения миссии $T_{\text{выполн.}}$, определяемое как время, необходимое последнему АМО для завершения своего маршрута и возвращения на базу:

$$\min T_{\text{выполн.}} = \min \left(\max_{V_i \in V} \{T_{\text{миссия},i}\} \right), \quad (3)$$

где $T_{\text{миссия},i}$ обозначает продолжительность миссии для объекта V_i .

Вторая задача – минимизировать общее расстояние перемещения $L_{\text{общ.}}$, представляющее совокупную длину пути для всех АМО:

$$\min L_{\text{общ.}} = \min \left(\sum_{V_i \in V} L_i \right), \quad (4)$$

где L_i – расстояние, пройденное объектом V_i . Этот показатель напрямую связан с потреблением энергии и износом системы.

Хотя желательно минимизировать как время, так и расстояние, на практике они могут противоречить друг другу. Таким образом, эта структура поддерживает многокритериальную оптимизацию с помощью таких методов, как формулирование взвешенной суммы или определение приоритетности одной задачи при одновременном рассмотрении других в качестве ограничений.

Важно отметить, что все разработанные методы должны удовлетворять строгим требованиям безопасности и технико-экономического обоснования, включая навигацию без столкновений (как со статическими препятствиями, так и с другими объектами), а также соблюде-

ние всех ограничений, характерных для конкретного транспортного средства, таких как выносливость, грузоподъемность и кинематические ограничения.

Следовательно, проблема сформулирована как сложная задача по распределению для нескольких АМО и оптимизации траектории движения.

Распределение задач с помощью усовершенствованного генетического алгоритма

В разрабатываемой среде существует несколько отдельных местоположений задач M , определенных набором $T = \{T_1, T_2, \dots, T_M\}$. Каждая точка выполнения задания представляет собой место, требующее вмешательства, например при доставке или оценке обстановки на месте. Для целей данного исследования места выполнения задания рассматриваются как статичные в процессе планирования.

Задача распределения сформулирована как проблема комбинаторной оптимизации, в которой набор T должен быть распределен между разнородным роом объектов $V = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$. На каждое средство V_i накладываются определенные ограничения, включая максимальную дальность перемещения и грузоподъемность. Каждая задача должна быть возложена только на один мобильный объект, а общая цель состоит в том, чтобы минимизировать затраты на выполнение миссии при соблюдении всех ограничений.

Цель оптимизации выражается следующим образом:

$$\min_X \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=0}^{n_i-1} d(P_{ij}, P_{i(j+1)}) \right), \quad (5)$$

где X представляет собой полное решение задачи, P_{ij} – местоположение j -й задачи назначенному АМО V_i (где P_{i0} обозначает базовую станцию), а d – евклидово расстояние между двумя точками [5].

Каждое решение должно соответствовать следующим условиям:

$$\bigcup_{i=1}^N T_i = T, \quad T_i \cap T_j = \emptyset \quad \forall i \neq j, i = 1, \quad (6)$$

где T_i является обеспечением уникального назначения каждой задачи.

Для решения этой проблемы используется усовершенствованный генетический алгоритм. Каждая частица в популяции кодирует возможное назначение задачи в виде последовательности индексов, разделенных в соответствии с назначениями АМО. Функция пригодности оценивает общую стоимость пути на основе уравнения (5):

– выбор проводится с использованием стратегии конкурентного отбора, чтобы продвигать объекты с более низкой стоимостью при сохранении генетического разнообразия;

– переход осуществляется путем частичного обмена подмножествами задач между двумя объектами. Для сохранения уникальности задач после перехода применяется механизм восстановления;

– трансформация включает случайную замену задач между АМО или перестановку задач в рамках маршрута одного объекта.

Чтобы динамически сбалансировать поиск и эксплуатацию, вероятность трансформации μ уменьшается в соответствии с выражением (7):

$$\mu(g) = \mu_0 \times \left(-\alpha \frac{g}{G} \right), \quad (7)$$

где μ_0 – начальная вероятность трансформации, g – номер текущего поколения, G – максимальное число поколений, а α – постоянная скорости уменьшения.

ЕГА выполняется итеративно до тех пор, пока не будет выполнено условие завершения (например, достижение заданного числа поколений или наблюдение за сходимостью показателей). Благодаря этим усовершенствованиям алгоритм грамотно использует обширное и

сложное пространство решений, присущее распределению задач между несколькими АМО, создавая высокоэффективные планы, которые сводят к минимуму продолжительность перемещения и энергопотребление.

Формирование траектории с помощью информированного алгоритма RRT*

После распределения задач каждый АМО должен проложить возможный маршрут, по которому он последовательно посещает назначенные ему места выполнения задач, избегая при этом препятствий. Для эффективного планирования этих путей в условиях беспорядка и ограничений используется информированный алгоритм RRT* – усовершенствованное планирование на основе выборки, которое ускоряет сходимость, фокусируя усилия на поиске перспективных областей конфигурационного пространства.

С учетом начальной точки $P_{нач.}$ и конечной точки $P_{кон.}$ задача состоит в том, чтобы найти траекторию, свободную от столкновений:

$$P = \{P_0, P_1, \dots, P_k\}, P_0 = P_{нач.}, P_k = P_{кон.}, \quad (8)$$

при соблюдении ограничения: $P_i \notin O, \forall i = 0, \dots, k$, где O обозначает множество областей препятствий.

Информированный алгоритм RRT* улучшает классический алгоритм RRT*, ограничивая выборку узлов эллипсоидальной областью после того, как найдено первоначальное приемлемое решение. Эта область определяется начальной и конечной позициями, минимально возможной стоимостью пути $c_{мин.}$ и текущей стоимостью наилучшего решения $c_{луч.}$:

$$X_{инф.} = \left\{ x \in R^2 \mid x - x_{нач.} \cdot x - x_{кон.} \leq c_{луч.} \right\} \quad (9)$$

Это ограничение фокусирует выборку на областях, где вероятны улучшения текущего наилучшего пути, что значительно сокращает вычислительные затраты и повышает эффективность.

Для каждой пары последовательных заданий, назначенных АМО, вычисляется локальная траектория с использованием информированного метода RRT*. Затем путем объединения всех траекторий строится полный маршрут миссии для каждого объекта. Общая стоимость траектории для транспортного средства V_i выражается как:

$$C_i = \sum_{j=0}^{n_i-1} c(P_{ij}, P_{i(j+1)}), \quad (10)$$

где c обозначает функцию стоимости – евклидово расстояние между двумя последовательными путевыми точками.

Для повышения плавности траектории и соответствия реальным условиям применяется этап последующей обработки. Этот процесс устраняет лишние путевые точки и слегка сглаживает траекторию, сохраняя при этом возможность обхода препятствий. В результате получается траектория, которая является не только приемлемой с точки зрения безопасности и кинематики, но и практичной для использования автономными мобильными объектами. Используя технологию информированного алгоритма RRT*, предлагаемая система обеспечивает эффективное и надежное формирование траектории, обеспечивая прочную основу для последующих этапов уточнения и выполнения траектории.

Оптимизация траектории с помощью CMA-ES

Как только будут сгенерированы возможные траектории, соединяющие назначенные точки задачи, начнется дальнейший этап оптимизации для повышения общей эффективности миссии. Важным фактором на этом этапе является порядок выполнения задач, поскольку он напрямую влияет на общее пройденное расстояние, время выполнения задания и потребление энергии. Для решения этой проблемы используется стратегия развития адаптации кова-

риационной матрицы, позволяющая оптимизировать последовательность выполнения задач для каждого объекта.

Задача оптимизации траектории для АМО V_i сформулирована как задача оптимизации перестановок, цель которой состоит в определении последовательности задач π_i , которая минимизирует общую стоимость траектории:

$$\min_{\pi_i} C_i(\pi_i) = \sum_{j=0}^{n_i-1} d(P_{\pi_i(j)}, P_{\pi_i(j+1)}), \quad (11)$$

где $\pi_i(j)$ указывает индекс j -й задачи в последовательности, а d обозначает евклидово расстояние между двумя последовательными местоположениями задач.

Поскольку СМА-ES работает в непрерывном пространстве поиска, в то время как проблемная область дискретна (ввиду перестановок), применяется стратегия непрерывной релаксации. Каждое возможное решение кодируется в виде вещественного вектора, а порядок π_i определяется путем сортировки элементов вектора – сопоставления непрерывного представления с определенной перестановкой.

СМА-ES итеративно уточняет многомерное нормальное распределение в пространстве решений. Этот подход используется для адаптации ковариационной матрицы и вектора среднего значения на основе выбранных решений, что позволяет осуществлять эффективный поиск и эксплуатацию. В данном методе отбирается совокупность векторов отдельно для каждого поколения, далее они оцениваются с помощью $C_i(\pi_i)$ и в конечном итоге происходит обновление параметров m и C :

$$m_{g+1} = \sum_{k=1}^{\lambda} w_k x_k^{(g)}, \quad (12)$$

$$c_{g+1} = (1 - c_1 - c_\mu) C_g + c_1 p_c p_c^T + c_\mu \sum_{k=1}^{\mu} w_k (x_k^{(g)} - m_g)(x_k^{(g)} - m_g)^T, \quad (13)$$

где $x_k^{(g)}$ – выбранные потомки в поколении g ; w_k – веса рекомбинации, а c_1 , c_μ – скорости обучения для обновлений первого ранга и μ -ранга. Траектории развития и коэффициенты обучения позволяют алгоритму динамически адаптировать свою стратегию выборки в зависимости от условий пригодности.

Процесс оптимизации продолжается до тех пор, пока не будет выполнен критерий остановки, например не будет достигнуто максимальное количество поколений или не будет наблюдаться стагнация в повышении производительности. Затем для восстановления траектории движения АМО используется окончательная оптимизированная последовательность задач π_i^* . Применяя СМА-ES для оптимизации последовательности выполнений задач АМО, система эффективно сокращает количество лишних путей, уменьшает продолжительность миссии и повышает эффективность траектории перемещения, тем самым повышая общую эффективность гибридной среды в различных операциях.

Интегрированная система совместного планирования

Предлагаемая структура начинается с определения набора областей препятствий O , мест выполнения задач T и базовой станции B . Первый этап включает в себя использование усовершенствованного генетического алгоритма для распределения набора задач среди различного рода БПЛА U и БНТС Y с целью максимизации общей эффективности миссии.

Как только распределение задач завершено, информированный алгоритм RRT* используется для генерации начальных траекторий без столкновений $P_i(t)$ для каждого объекта, обеспечивая соответствие пространственным ограничениям и особенностям АМО. За этим

следует применение CMA-ES, которое уточняет последовательность выполнения задачи π_i для каждого транспортного средства, чтобы минимизировать общее время выполнения миссии $T_{\text{общ.}}$ и совокупные затраты на маршрут или потребление энергии $\sum C(P_i)$. Затем окончательное решение проверяется на соответствие всем эксплуатационным ограничениям, включая минимальные безопасные расстояния $d_{\text{безоп.}}$, динамику АМО, энергетические ограничения E_i и полный охват задач.

Преимущество этого подхода заключается в структурированной интеграции специализированных компонентов, каждый из которых решает отдельную подзадачу:

- EGA выполняет глобальное распределение задач, учитывая неоднородность роя, включая параметры, характерные для конкретного объекта (например, скорость, дальность перемещения, полезную нагрузку). Итоговые задания X могут служить исходными данными для следующих этапов планирования;

- информированный алгоритм RRT* действует как уровень технико-экономического обоснования, создавая пути обхода препятствий, учитывающие ограничения окружающей среды и возможности движения АМО. Стоимость этих маршрутов также может использоваться для первоначальных оценок при распределении задач, хотя в текущей реализации эта обратная связь необязательна;

- CMA-ES выполняет локальную оптимизацию, точно настраивая порядок выполнения задач для каждого объекта, чтобы сократить количество лишних путей и повысить эффективность траектории. В основе оптимизации лежит базовая геометрия и, где это применимо, информация о возможностях подключения от RRT*.

Такая последовательная декомпозиция – от глобального назначения задач до локального планирования траектории и уточнения ее параметров – позволяет системе решать многомерные задачи многоагентного планирования простым и масштабируемым способом.

Система изначально разработана для поддержки кооперации между БПЛА и БНТС. При распределении задач метод EGA учитывает уникальные возможности каждой платформы, позволяя беспилотникам выполнять срочные доставки и поиск, в то же время поручая БНТС более сложные задачи, требующие больших затрат времени. Это позволяет системе в полной мере использовать взаимодополняющие преимущества двух платформ, повышая адаптивность и эффективность выполнения задач.

Для координации действий между АМО в гибридной среде информированный подход RRT* обеспечивает обход препятствий, в то время как неявное пространственно-временное устранение столкновений достигается за счет обеспечения безопасных границ разделения.

Экспериментальная часть

Чтобы оценить эффективность предложенного метода распределения задач на основе EGA, были проведены сравнительные эксперименты с несколькими базовыми стратегиями, включая случайное распределение и кластеризацию с использованием К-средних значений. Цель состояла в том, чтобы оценить относительную эффективность EGA в минимизации ключевых показателей миссии в реалистичных условиях, связанных с ограничениями. На рисунке 1 показаны результаты сравнения длин траекторий в зависимости от выбранного алгоритма.

По полученным гистограммам видно, что EGA значительно превосходит существующие методы. Общая длина маршрута стала меньше, соответственно можно сделать вывод о сокращении общего времени завершения миссии, поскольку эти критерии взаимосвязаны друг с другом. Эти усовершенствования подчеркивают способность EGA более эффективно распределять задачи с учетом ограничений, особенно в сложных и разнородных условиях роя, где необходимо учитывать как ограничения АМО, так и экологические препятствия.

Важнейшим компонентом предлагаемой системы является этап оптимизации траектории, реализуемый с помощью стратегии эволюции адаптации ковариационной матрицы. На этом

этапе уточняется последовательность выполнения назначенных задач для каждого АМО для повышения общей эффективности маршрута. Чтобы оценить влияние этой оптимизации, был проведен сравнительный анализ.

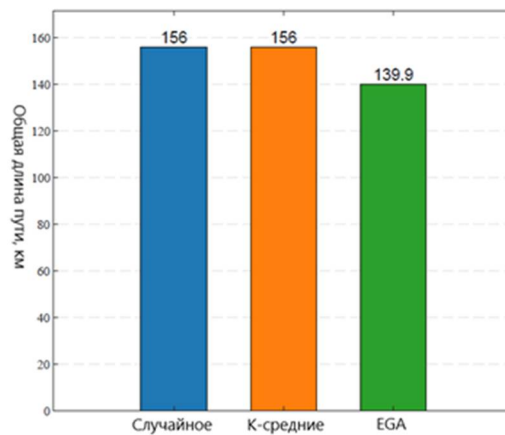


Рисунок 1 – Сравнение общих длин маршрутов
Figure 1 – Path lengths comparison

Сравнение было сосредоточено на оценке эффективности конечных траекторий, сгенерированных после оптимизации СМА-ES, по сравнению с исходными возможными траекториями, созданными непосредственно информированным алгоритмом RRT* с использованием неоптимизированных последовательностей задач. Результаты этого сравнения представлены на рисунке 2, который иллюстрирует ключевой показатель производительности – общую длину пути – до и после применения СМА-ES.

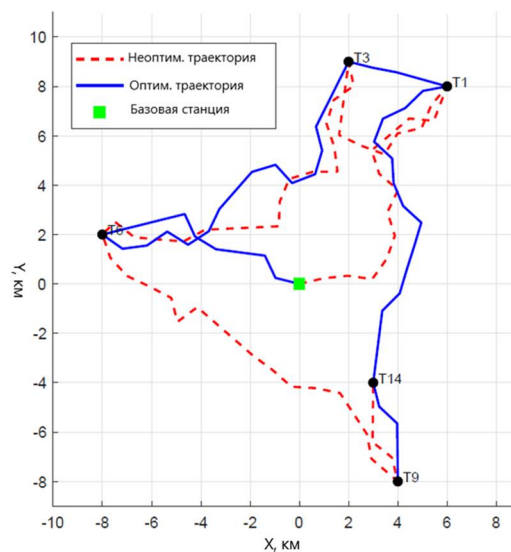


Рисунок 2 – Сравнение траекторий
Figure 2 – Path comparison

Данные на рисунке 2 наглядно показывают, что СМА-ES позволяет значительно сократить общую длину пути, подтверждая свою эффективность в оптимизации порядка выполнения задач. Это улучшение подчеркивает дополнительную ценность интеграции в систему специальной фазы оптимизации последовательности, помимо простого создания возможных путей.

Для наглядной демонстрации результатов полного планирования миссии на рисунке 3 показаны окончательные траектории как для БПЛА, так и для БНТС, работающих в моделируемой обстановке.

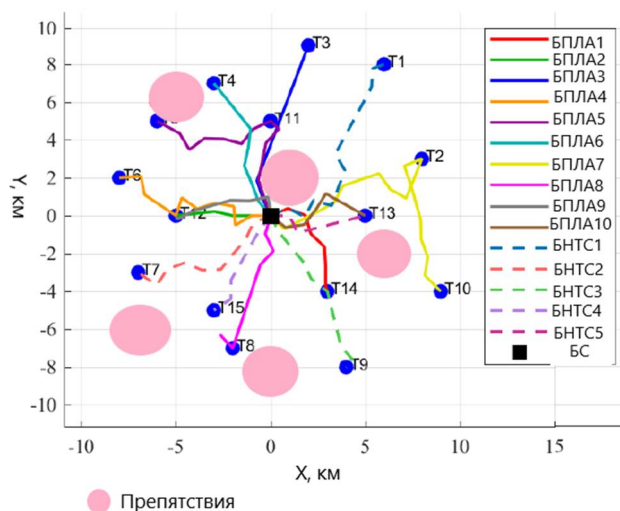


Рисунок 3 – Траектории перемещения объектов гибридной среды
Figure 3 – Trajectories movement of objects in hybrid environment

Все объекты успешно обходят препятствия без столкновений, что удовлетворяет требованиям, установленные информированным алгоритмом RRT*. Коллективный характер этого решения также очевиден – БПЛА, как показано, используют более прямые воздушные маршруты, в то время как БНТС следуют по более длинным наземным маршрутам, что отражает успешное разделение труда, основанное на преимуществах разнородных АМО.

Заключение

Таким образом, представленная гибридная система планирования задач обеспечивает несколько ключевых преимуществ:

- разбивает сложную, взаимосвязанную задачу оптимизации на специализированные, управляемые подкомпоненты;
- используется разнообразный набор стратегий оптимизации – генетический алгоритм для эффективного распределения задач EGA, информированный RRT* для создания выполнимых траекторий, позволяющих избежать препятствий, и CMA-ES для уточнения последовательности выполнения задач;
- создаются скоординированные на глобальном уровне и оптимизированные на локальном уровне траектории, которые являются безопасными, выполнимыми и эффективными.

Благодаря систематической интеграции этих алгоритмов система предлагает практичное и мощное решение для координации разнородных групп из нескольких АМО, что значительно повышает скорость и эффективность миссий.

Библиографический список

1. Черноиваненко И.А., Кравец О.Я. Проблемы и особенности управления автономными мобильными объектами // Информационные технологии в экономике и управлении. Махачкала. 2024. С. 18-26.
2. Sababha B.H., Al-mousa A., Baniyounisse R., Bdour J. Sampling-based unmanned aerial vehicle air traffic integration, path planning, and collision avoidance // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2022. Vol. 19. № 2.
3. Kothari M., Postlethwaite I. A probabilistically robust path planning algorithm for UAVs using rapidly-exploring random trees // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2012. Vol. 71. № 2. PP. 231-253.
4. Черноиваненко И.А., Кравец О.Я., Атласов И.В. Математическое обеспечение распределенного управления роем автономных мобильных объектов с применением технологий искусственного интеллекта // Системы управления и информационные технологии. 2025. Т. 99. № 1. С. 71-77.
5. Черноиваненко И.А., Кравец О.Я. О децентрализованном решении задачи одновременного прибытия автономных мобильных объектов к финальной точке с использованием анализа больших данных // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024. Т. 12. № 4.

UDC 004.7

MATHEMATICAL SUPPORT FOR TASK DISTRIBUTION IN A HYBRID ENVIRONMENT OF NON-STATIONARY AUTONOMOUS OBJECTS

I. A. Chernoiivanenko, post-graduate student, VGTU, Voronezh, Russia;

orcid.org/0009-0007-8510-4683, e-mail: chernoivanenko2000@mail.ru

O. Ja. Kravets, Dr. in technical sciences, full professor, VSTU, Voronezh, Russia;

orcid.org/0000-0003-0420-6877, e-mail: csit@bk.ru

The fast and efficient delivery of autonomous mobile objects (AMO) is becoming a vital and challenging task. To address this issue, a system for collaborative path planning and task distribution using unmanned aerial vehicles (UAV) and unmanned ground vehicles (UGV) is proposed. The system developed makes use of genetic algorithm (GA) to distribute tasks among multiple UAV and UGV and improved rapid random tree search algorithm (informed RRT) to create obstacle-free trajectories. To further improve the efficiency of task execution and routing an evolutionary strategy for adapting covariance matrix (CMA-ES) is used. The proposed integration of these algorithms can be used to coordinate heterogeneous groups of AMO which significantly increases speed and efficiency of missions.*

Keywords: hybrid environment, task distribution, path planning, coordination, autonomous mobile object, genetic algorithm, covariance matrix adaptation, informed RRT* algorithm.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-51-60

References

1. **Chernoivanenko I.A., Kravets O.Ja.** Problems and features of autonomous mobile objects management. *Information Technologies in Economics and Management, Makhachkala*. 2024, pp. 18-26. (in Russian).
2. **Sababha B.H., Al-mousa A., Baniyounisse R., Bdour J.** Sampling-based unmanned aerial vehicle air traffic integration, path planning, and collision avoidance. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2022, vol. 19, no. 2.
3. **Kothari M., Postlethwaite I.** A probabilistically robust path planning algorithm for UAVs using rapidly-exploring random trees. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2012, vol. 71, no. 2, pp. 231-253.
4. **Chernoivanenko I.A., Kravets O.Ja., Atlasov I.V.** Mathematical support for distributed control of a swarm of autonomous mobile objects using artificial intelligence technologies. *Control Systems and Information Technologies*. 2025, vol. 99, no. 1, pp. 71-77. (in Russian).
5. **Chernoivanenko I.A., Kravets O.Ja.** On the decentralized solution of the problem of simultaneous arrival of autonomous mobile objects to the final point using big data analysis. *Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2024, vol. 12, no. 4. (in Russian).