

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ВЫПУКЛОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Бурый А.С., д-р техн. наук, Российский институт стандартизации, г. Москва

Шевкунов М.А., соискатель, Российский институт стандартизации, г. Москва

В статье рассматриваются подходы к оптимизации покрытия территории, исследуемой беспилотными летательными аппаратами в составе группы.

Целью исследования является синтез алгоритмов планирования маршрута, направленный на минимизацию энергопотребления и сокращение времени выполнения миссии при гарантированном выполнении требований к качеству наблюдения.

Методы: на основе выпуклой декомпозиции предложен усовершенствованный метод и описана методика построения маршрута движения для группы беспилотных летательных аппаратов.

Результаты: предлагаемый подход позволяет решать комплекс задач, связанных с оптимальным планированием маршрутов. Он обеспечивает сбалансированное распределение рабочей нагрузки между аппаратами в группе, учитывает их энергетические ограничения и гарантирует выполнение миссии, даже в случае выхода из строя отдельных летательных аппаратов, за счет перераспределения зоны ответственности и маршрутов между аппаратами при возникновении нештатных ситуаций.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, выпуклая декомпозиция, оптимизация траектории, построение маршрута, группа автономных БПЛА, обработка аварийных ситуаций.

Цитирование: Бурый А.С., Шевкунов М.А. Метод оптимизации построения маршрута движения группы беспилотных летательных аппаратов на основе выпуклой декомпозиции // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 3(84). С. 88–97.

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят широкое применение в задачах мониторинга и наблюдения за территорией, а также в постоянно расширяющемся списке прикладных задач [1]. Организация группового выполнения целевых задач требует разработки алгоритмов перераспределения целей, ресурсов и управляющих воздействий [2]. Для планирования и анализа выполняемых функций в составе группы, когда итоговый результат обеспечивается за счет кооперации, взаимосвязи членов группы, взаимозависимости, что обеспечивает наибольший эффект и эмерджентное качество совместных действий, часто используют многоагентные системы [3].

Для задачи мониторинга БПЛА ключевой проблемой является оптимизация траектории полета, обеспечивающая полное покрытие заданной области при соблюдении эксплуатационных ограничений. При этом актуальной целевой задачей выступает синтез алгоритмов планирования маршрута покрытия (ПМП), направленный на минимиза-

цию энергопотребления и сокращение времени выполнения миссии при гарантированном соблюдении требований к качеству наблюдения.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКРЫТИЯ ТЕРРИТОРИИ БПЛА НА ОСНОВЕ ВЫПУКЛОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Для области мониторинга, являющейся простым выпуклым многоугольником, эффективным решением задачи покрытия является метод бустрофедона [4]. Данный метод предполагает движение вдоль одной из сторон многоугольника (рис. 1).

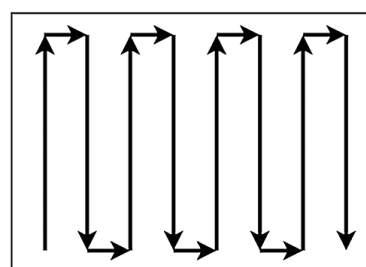


Рис. 1. Схема движения по методу бустрофедона

Ключевой принцип данного метода – минимизация количества поворотов, что обусловлено их высокой энергоемкостью по сравнению с прямолинейным движением [5]. Таким образом, оптимальная стратегия заключается в выборе направления движения, параллельного наиболее длинной стороне многоугольника (рис. 2).

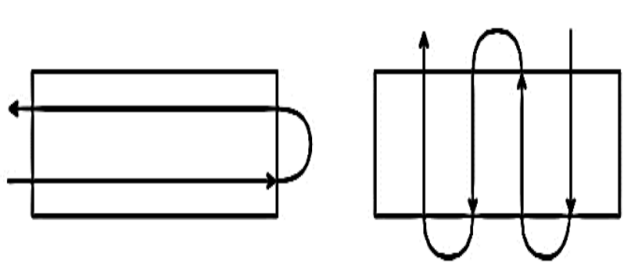


Рис. 2. Количество поворотов в зависимости от направления движения

По мере усложнения области мониторинга у фигуры могут появиться вогнутости. В таком случае метод бустрофедона теряет эффективность, как показано на рис. 3. Для вогнутого многоугольника траектория с единственным направлением покрытия (слева) требует больше поворотов, чем мультидирекционный подход (справа).

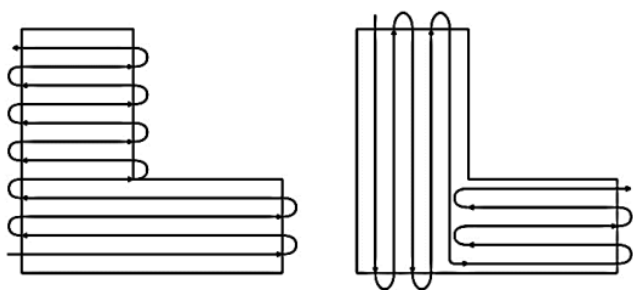


Рис. 3. Количество поворотов в зависимости от направления движения

Решением является декомпозиция исходной области на выпуклые многоугольники (клеточное разбиение), представленная на рис. 4 [6], где:

- (а) – исходная область делится на непересекающиеся выпуклые подобласти (ячейки);
- (б) – к каждой ячейке применяется метод бустрофедона;
- (в) – отдельные траектории объединяются в глобальный маршрут.

Клеточное разбиение также является неотъемлемой частью сценариев с координированным использованием группы БПЛА. Например, в сценариях поиска или составления карты с использованием нескольких БПЛА интересующая область должна быть разделена между БПЛА таким образом, чтобы обеспечить оптимальное распределение зон ответственности между агентами и минимизировать дублирование областей покрытия, учитывая энергетические ограничения за счет сокращения маневров.

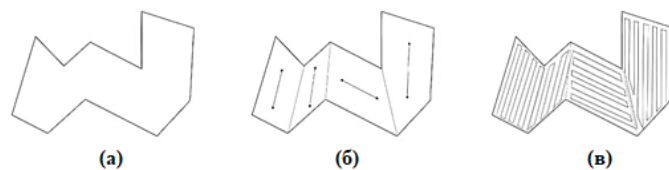


Рис. 4. Концепция клеточного разбиения

Таким образом, клеточное разбиение обеспечивает решение следующих задач:

1. Оптимизация траектории покрытия: метод обеспечивает существенное снижение энергозатрат за счет минимизации количества маневренных операций и, как следствие, уменьшение времени выполнения миссии.
2. Масштабируемость для группового применения: декомпозиция территории позволяет эффективно распределять зоны ответственности между несколькими БПЛА, обеспечивая равномерное распределение рабочей нагрузки и минимизацию пересечений маршрутов.

При этом метод демонстрирует высокую эффективность в поисковых операциях (позволяет покрывать сложные территории с гарантированным обнаружением объектов), картографировании (обеспечивает полное и непересекающееся покрытие зоны съемки), мониторинге (адаптация к изменяющимся условиям и нештатным ситуациям за счет модульности разбиения).

Дальнейшее развитие метода связано с автоматизацией процесса декомпозиции, с учетом динамических ограничений БПЛА, и интеграцией с системами реального времени.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВЫПУКЛОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ: АНАЛИЗ ПОДХОДОВ И ИХ ОГРАНИЧЕНИЙ

В области декомпозиции вогнутых многоугольников значительное внимание уделяется методам, основанным на принципе линейной развертки. Наиболее распространенным среди них является классический метод трапециевидного разбиения [7], который предполагает использование направленной линии развертки, параллельной одной из осей координат. При пересечении данной линией вершин исходного многоугольника происходит его разделение на трапециевидные элементы. Несмотря на вычислительную эффективность данного подхода, он обладает существенным недостатком – склонностью к избыточному разбиению, что приводит к образованию большого числа подмногоугольников¹.

В ответ на это ограничение в работе [8] был предложен усовершенствованный вариант алгоритма, включающий следующие ключевые модификации:

1. Многократное выполнение процедуры развертки с различными направлениями, перпендикулярными сторонам исходного многоугольника.

¹ Картези Ф. Введение в конечные геометрии. – М.: Наука, 1980 (с. 16).

2. Разработку критериев для последующего объединения избыточных подобластей.
3. Механизм выбора оптимального направления развертки, минимизирующего количество конечных элементов разбиения.

На рис. 5 показаны различия между результатами трапециевидного разложения и метода линии развертки, предложенного в [8], с направлением развертки слева направо.

Дальнейшее развитие метод линии развертки получил в работе [9], где авторы реализовали новый подход, заключающийся в:

- 1) независимом выполнении множества процедур развертки с различными направлениями;
- 2) наложении полученных вариантов разбиения;
- 3) итеративном объединении подмногоугольников на основе анализа их геометрических характеристик (суммы ширин конечных подмногоугольников).

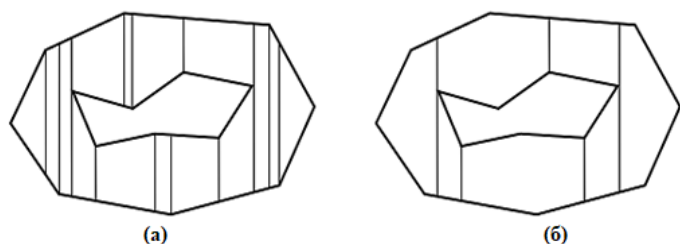


Рис. 5. Сравнение (а) трапециевидного разложения и (б) усовершенствованного метода разложения

Однако, несмотря на улучшенные показатели качества разбиения, предложенный алгоритм демонстрирует экспоненциальный рост вычислительной сложности, что существенно ограничивает его практическую применимость для задач обработки сложных геометрических форм.

Анализ рассмотренных подходов позволяет выявить ряд принципиальных ограничений, присущих всем методам, основанным на линейной развертке:

1. Ограничение на обработку вершин: алгоритмы способны корректно обрабатывать только ситуации, когда линия развертки пересекает не более одной вершины многоугольника одновременно. Это требование существенно снижает эффективность методов при работе с многоугольниками, имеющими участки с высокой плотностью вершин.
2. Проблема выбора направления: отсутствие универсальных критериев для определения оптимального направления развертки, особенно для многоугольни-

ков со сложной конфигурацией, включающей множественные вогнутости.

3. Низкая эффективность для специфических форм: методы демонстрируют существенное ухудшение производительности при обработке многоугольников с протяженными прямолинейными участками границ.

В качестве альтернативы методам линейной развертки в литературе представлены несколько иных подходов:

ячеистая декомпозиция на основе метода Морзе [10] представляет собой более общий метод декомпозиции, который может работать с фигурами, не являющимися многоугольниками. Метод не ограничивается работой с полигональными формами, позволяет использовать криволинейные траектории разбиения и обеспечивает большую гибкость при обработке сложных геометрических форм;

эвристические подходы к выпуклой декомпозиции [5, 11]. Разработанные на основе «жадных стратегий», эти подходы реализуют рекурсивную процедуру разбиения по вогнутым вершинам, ориентированы на минимизацию количества поворотов в результирующей траектории и демонстрируют полиномиальную вычислительную сложность. Однако их эффективность существенно зависит от конкретной конфигурации обрабатываемого многоугольника.

Проведенный обзор современных методов выпуклой декомпозиции позволяет выделить следующие системные проблемы:

1. Проблема оптимальности: большинство алгоритмов не обеспечивают минимизацию ключевых параметров, таких как суммарная ширина результирующих подмногоугольников.
2. Вычислительная сложность: существующие решения либо обладают неприемлемо высокой вычислительной сложностью (экспоненциальные алгоритмы), либо демонстрируют нестабильную эффективность (эвристические методы).
3. Ограничения по применимости: многие подходы демонстрируют снижение эффективности при работе со сложными геометрическими формами или требуют выполнения строгих предварительных условий.

В настоящей работе предлагается иной метод декомпозиции, обеспечивающий конкурентоспособное решение в сравнении с представленными выше подходами, при этом более простой вычислительно и применимый к любой форме искомой области.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Рассмотрим последовательно основные этапы исследования. На предварительном этапе оператор задает исследуемую область на карте в специализированном программ-

ном обеспечении (СПО) путем последовательного указания вершин многоугольника и точки взлета/посадки БПЛА. После этого группа БПЛА автоматически выполняет облет области и возвращается в исходную позицию (рис. 6).



Рис. 6. Пример указаний оператора

ЭТАП 1: декомпозиция исследуемой области. Алгоритм декомпозиции многоугольника включает следующие шаги:

1.1. Определение внутренних углов многоугольника, превышающих 180°

Нахождение таких углов происходит с применением выражения:

$$\alpha = \arccos(\cos \widehat{ab}). \quad (1)$$

При этом в зависимости от направления обхода исследуемой области оператором СПО и расставления вершин многоугольника при проведении вычислений вместо внутренних углов могут быть посчитаны внешние, так как выражение (1) не различает внутренние и внешние углы. Для корректировки данной ситуации производится проверка суммы внутренних углов на соответствие теореме о сумме углов n -угольника в соответствии с (2):

$$\sum \alpha_n = 180 * (n - 2). \quad (2)$$

Если равенство (2) не выполняется, вычисленные углы являются внешними. В этом случае их заменяют на сопряженные (внутренние).

1.2. Декомпозиция многоугольника в вершинах с выпуклыми углами

Стороны многоугольника, образующие выпуклый угол, продлеваются до точки пересечения с другими сторонами. При этом все подмногоугольники, образованные за счет продления сторон, являются выпуклыми (см. рис. 7).

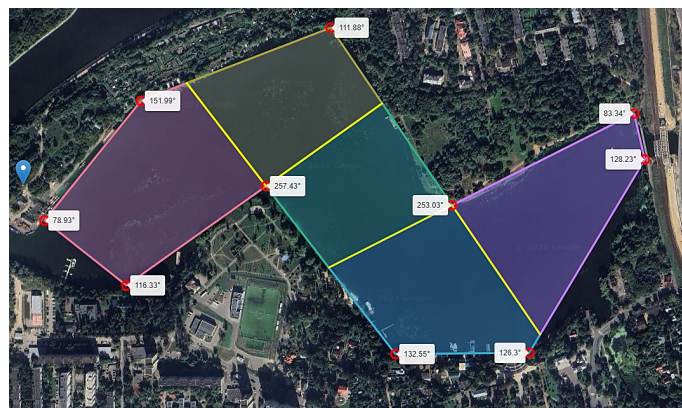


Рис. 7. Пример декомпозиции исследуемой области посредством внутреннего расширения границ

1.3. Оптимальное объединение подмногоугольников

Смежные подмногоугольники объединяются, если результат сохраняет выпуклость. Основной целью выпуклой декомпозиции является объединение подмногоугольников для уменьшения количества конечных подмногоугольников и суммы ширин подмногоугольников (рис. 8).

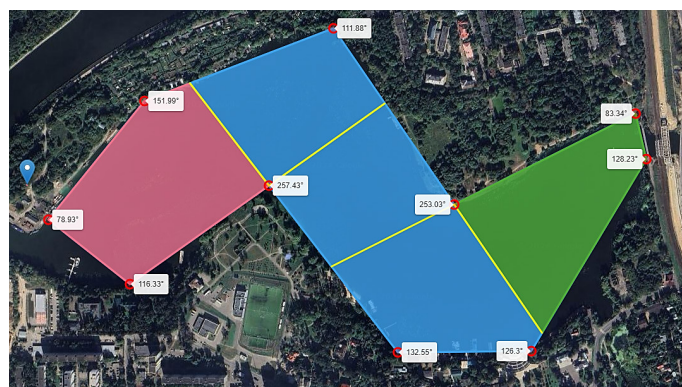


Рис. 8. Пример объединения подобластей

Среди возможных вариантов объединения предпочтение отдается тому, где количество подмногоугольников минимально, а сумма длин самых протяженных сторон подмногоугольников максимальна. Это объясняется тем, что длинные прямые участки позволяют БПЛА двигаться с постоянной скоростью, сокращая энергозатраты на разгоны и повороты.

Задача оптимального выпуклого объединения подмногоугольников формализуется как дискретная оптимизационная задача [12]. Рассмотрим множество $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ исходных подмногоугольников и множество $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ допустимых вариантов их выпуклого объединения. Для каждого варианта $X_j \in X$ определим:

количество объединенных подмногоугольников $|X|$;

суммарную длину сторон t_k для каждого образованного выпуклого многоугольника $w_k \in X_j$.

Целевая функция оптимизации имеет вид:

$$F(X_j) = \sum t_k \rightarrow \max, \text{ при условии } \min(|X_j|), \quad (3)$$

где $i \in [1, n]$ – индексы исходных подмногоугольников; $j \in [1, m]$ – индексы вариантов объединения; $k \in [1, u]$ – индексы результирующих многоугольников.

Данная задача по своей вычислительной сложности, как показано в исследованиях [13], относится к классу NP -полных задач, что означает экспоненциальный рост сложности с увеличением количества исходных подмногоугольников. Для практического решения этой проблемы в работе предлагается использовать вероятностный подход.

Метод основан на генерации множества случайных, но допустимых вариантов объединения с последующим выбором наилучшего из них по заданным критериям. Такой подход, относящийся к методам Монте-Карло, обладает несколькими важными преимуществами. Во-первых, он позволяет получить решение за приемлемое время даже для относительно больших задач (больших данных, разнообразных методах моделирования [14]). Во-вторых, при достаточном количестве испытаний вероятность нахождения оптимального или близкого к нему решения становится достаточно высокой [15].

Особенность алгоритма заключается в том, что он балансирует между геометрической оптимальностью (минимум фигур), эксплуатационной эффективностью (максимум прямолинейных участков) и приемлемым временем решения задачи. Это особенно важно для автономных БПЛА, где каждый поворот увеличивает время выполнения миссии и расход энергии, а время на подготовку исходных данных ограничено.

ЭТАП 2: построение маршрута движения БПЛА

Построение маршрута внутри итоговых подмногоугольников происходит с использованием метода бустрофедона и может разбито на три этапа: построение путевых линий, определение направления обхода и объединение маршрутов.

При построении путевых линий определяют прямые участки пути в каждой подобласти в отдельности. Построение осуществляется путем создания параллельных путевых линий внутри каждого подмногоугольника, соединенных последовательно и ориентированных вдоль наиболее протяженной стороны подмногоугольника. Расстояние между путевыми линиями определяется техническими параметрами съемки: высотой полета, характеристиками камеры и тре-

буемым перекрытием кадров. Как показано на рис. 9, если предположить, что сенсор камеры параллелен плоскости земли, то, зная ширину датчика изображения l , фокусное расстояние f объектива камеры в миллиметрах и расстояние между камерой и подстилающей поверхностью H (высоту полета) в метрах, можно вычислить ширину зоны покрытия камеры в метрах по формуле:

$$L = H \frac{l}{f}. \quad (4)$$

Расстояние между путевыми линиями в случае необходимости корректируется в соответствии с коэффициентом горизонтального перекрытия кадров.

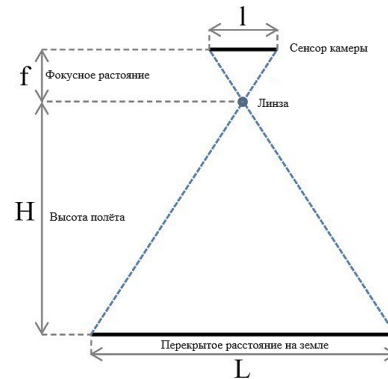


Рис. 9. Соотношение между размером сенсора камеры, высотой полета и шириной полосы сканирования подстилающей поверхности

После построения путевых линий итеративно по подмногоугольникам осуществляют определение направления обхода и объединение маршрутов. Начальная подобласть маршрута избирается по минимальному расстоянию между точкой взлета и крайними точками первой и последней путевых линий подобластей, являющимися возможными точками входа в подмногоугольник. В зависимости от избранной точки входа, следуя путевой линии, определяют направление обхода подмногоугольника. Дальнейшее построение маршрута происходит аналогично, начиная с поиска точки входа относительно текущего конца пути до исчерпания подмногоугольников. Пример построенного маршрута представлен на рис. 10.

Такой подход обеспечивает несколько ключевых преимуществ. Во-первых, ориентация путевых линий вдоль длинных сторон минимизирует количество поворотов. Во-вторых, итеративный принцип построения гарантирует создание единого связного маршрута даже для сложных территорий с множеством подобластей. В-третьих, автоматический расчет расстояния между параллельными путевыми линиями в зависимости от параметров съемки позволяет точно соблюдать технические требования к качеству съемки. В результате получается энергоэффективная траектория, обеспечивающая полное покрытие заданной области с минимальными холостыми перелетами.

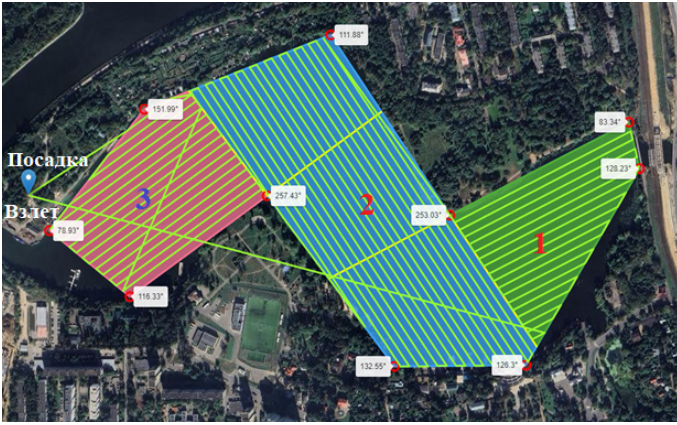


Рис. 10. Итоговый маршрут

При организации групповой работы автономных БПЛА применяется подход к распределению области исследования, основанный на принципе равномерного разделения маршрута. Общий путь делится на равные части по количеству доступных аппаратов. Такой подход сознательно не учитывает участки перелета от точки взлета до зоны исследования и обратно, поскольку в реальных условиях эти временные затраты незначительны по сравнению с продолжительностью основного этапа исследования местности.

Пример разбиения маршрута на части для двух БПЛА представлен на рис. 11. Кроме равномерной нагрузки на БПЛА в группе данный подход также позволяет избежать пересечения траекторий, что особенно важно для безопасности полетов, а четкое зонирование значительно упрощает управление группой и снижает вычислительную нагрузку на систему управления.

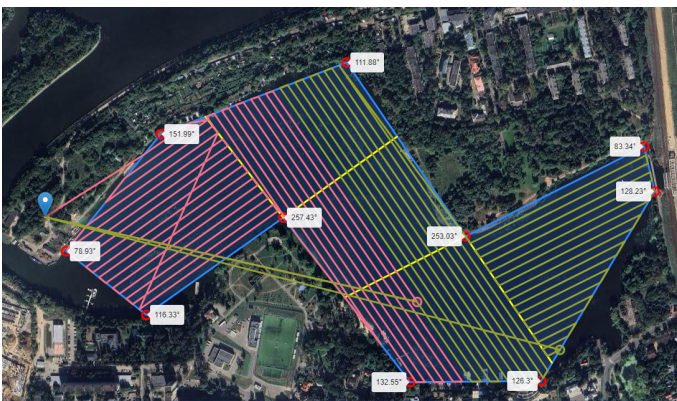


Рис. 11. Пример разбиения маршрута для двух аппаратов

ЭТАП 3: оценка выполнимости полетного задания для БПЛА

Заключительным этапом представленной методики является анализ возможности выполнения построенного маршрута с учетом технических ограничений БПЛА. Основным лимитирующим фактором выступает ресурс аккумулятор-

ной батареи, который определяет максимально доступное время полета.

Ожидаемое полетное время t_{max} определяется в соответствии со следующим выражением:

$$t_{max} = \frac{C_{acc}}{I_{supply}}, \quad (5)$$

где C_{acc} – емкость аккумуляторной батареи; I_{supply} – ток, отдаваемый аккумуляторной батареей для питания двигателя и другого оборудования.

Дополнительно в расчетах учитываются эксплуатационные характеристики двигательной системы, оказывающие существенное влияние на летные возможности аппарата. Эти параметры включают соотношение между фактической и требуемой мощностью силовой установки для заданных условий полета и баланс между доступной и необходимой тяговыми характеристиками:

$$(T_{BLA} > T_{req}) \wedge (P_{BLA} \geq P_{req}), \quad (6)$$

где T_{BLA} и P_{BLA} – тяга и мощность, развиваемые двигателями БПЛА; T_{req} и P_{req} – требуемые тяга и мощность в соответствии с условиями полетного задания и массой аппарата.

Приведенные в (6) параметры рассчитываются согласно представленным ниже выражениям и справедливы для БПЛА с вертикальным расположением винтомоторной группы, с трехфазными бесколлекторными электродвигателями, совершающими горизонтальный полет [16]:

$$T_{BLA} = N \frac{\rho C_t D^4 \omega^2}{4\pi^2}, \quad (7)$$

где N – количество двигателей БЛА; ρ – плотность воздуха; C_t – коэффициент тяги винта; D – диаметр винта; ω – угловая скорость винта;

$$T_{req} = \sqrt{(g(M))^2 + A^2}, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения; M – масса БЛА с учетом нагрузки; A – сила сопротивления воздуха;

$$P_{BLA} = \sqrt{3}UI \cos(\varphi)\eta, \quad (9)$$

где U – номинальное напряжение электродвигателя; I – номинальный ток электродвигателя; $\cos(\varphi)$ – коэффициент мощности (отношение активной мощности к полной); η – коэффициент полезного действия;

$$P_{req} = \frac{T_{req} V_{BLA}}{\eta}, \quad (10)$$

где V_{BLA} – скорость БЛА; η – коэффициент полезного действия.

Необходимо отметить, что приведенные расчетные зависимости носят упрощенный характер и не охватывают ряд существенных факторов, влияющих на реальные летные характеристики БПЛА. В частности, в расчетах не учитываются:

- нелинейные процессы разряда аккумуляторных батарей, приводящие к снижению их эффективной емкости;
- сложные аэродинамические эффекты, включая влияние угла атаки, индуктивные скорости воздушных потоков от движителей, их взаимное влияние при групповом расположении;
- конструктивные особенности винтов – распределение хорды, геометрическая крутка, реальные аэродинамические характеристики профилей.

На практике планирование полетных заданий осуществляется на основе паспортных характеристик БПЛА с обязательным введением эксплуатационных поправочных коэффициентов, учитывающих естественную деградацию аккумуляторов (обычно применяют 15–20%-ный запас по емкости); возможные нештатные ситуации (закладывают 20–25%-ный резерв времени полета); накопленный опыт эксплуатации конкретной модели аппарата.

В разработанном СПО для планирования маршрута БПЛА реализован удобный интерфейс для работы с параметрами полета. Программа позволяет оператору выбрать конкретную модель БПЛА из выпадающего списка или добавить новый БПЛА со своими параметрами, после чего автоматически подгружает все сохраненные технические характеристики данного аппарата, включая максимально возможное время полета.

При проверке выполнимости маршрута программное обеспечение сравнивает максимально возможное время полета выбранного БПЛА и расчетную продолжительность выполнения облета по построенному маршруту. Если анализ показывает, что требуемое время превышает доступный ресурс аппарата, система сигнализирует об этом оператору. В таком случае существуют три варианта решения проблемы:

1. Корректировка зоны мониторинга:
 - уменьшение площади обследуемой территории;
 - пересмотр и оптимизация маршрутных точек.
2. Увеличение количества БПЛА:
 - добавление дополнительных аппаратов в миссию;
3. Замена оборудования:
 - выбор моделей БПЛА с увеличенным временем автономной работы;
 - учет дополнительных технических характеристик, позволяющих увеличить максимально возможное время полета.

ОБРАБОТКА АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Обработка аварийных ситуаций подразумевает продолжение выполнения полетного задания по облету области мониторинга при выходе из строя одного или нескольких БПЛА посредством переопределения маршрутов оставшихся аппаратов с целью покрытия необработанных участков. Задача предполагает минимизацию суммарных затрат БПЛА с последующей переоценкой выполнимости.

Этот тип задачи похож на известную «задачу коммивояжера», где нужно найти оптимальный маршрут между точками. Но в данном случае есть важное отличие: все участники (БПЛА) работают сообща для достижения общей цели – покрытия необработанных участков маршрута вышедших из строя аппаратов.

Из-за такой особенности задачу можно рассматривать как вариант классической задачи коммивояжера, но с дополнительными условиями:

- все БПЛА действуют согласованно;
- зоны ответственности должны распределяться эффективно;
- необходимо учитывать ограниченные ресурсы БПЛА (заряд батарей, время полета).

Такие задачи по сложности относятся к классу NP [17], и их точное решение требует больших вычислений. На практике используют упрощенные алгоритмы, применяют методы оптимизации, дающие приближенный, но достаточно точный результат. По сути это задача оптимального «захвата» территории группой БПЛА, где каждый аппарат должен обработать свой участок, учитывая общие цели и ограниченные ресурсы всей системы.

Рассматриваемая задача имеет важную особенность – строгий порядок обхода точек маршрута. На примере аварийного маршрута (рис. 12) видно, что БПЛА должны посещать точки последовательно, соблюдая заданную очередность.

При этом действуют правила:

- каждую точку маршрута можно посетить только один раз (условие – см. (12) ниже);
- система имеет естественные потери (например, расход энергии).

Таким образом, основная цель – это найти оптимальное решение, минимизирующее общую длину маршрутов или суммарное время выполнения задачи. Математически это выражается через минимизацию целевой переменной z , которая объединяет все ключевые параметры задачи.

Для N точек маршрута и M аппаратов, если

$$x_{jim} = \begin{cases} 1, & \text{если БЛА}_m \text{ посещает точку } i \text{ после } j \\ 0, & \text{если иначе} \end{cases}, \quad (11)$$

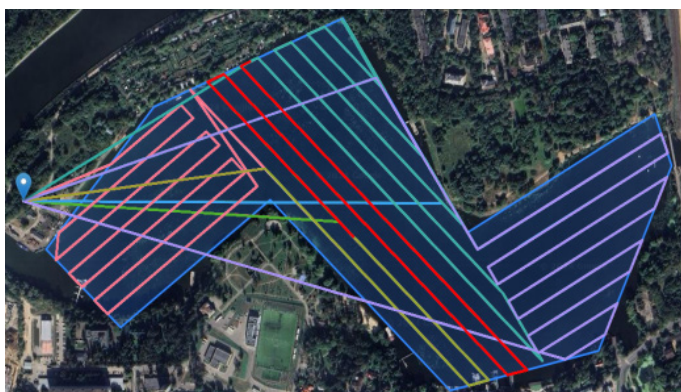


Рис. 12. Оставшийся путь аварийного БПЛА (красным)

то существуют следующие условия:

$$\sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M x_{jim} = 1, i = 1, \dots, N \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N x_{jim} \leq z, \forall m \in M. \quad (13)$$

Такой подход позволяет найти баланс между точным соблюдением маршрута и эффективностью использования ресурсов.

В данном исследовании используется практический алгоритм маршрутизации, который учитывает следующие ключевые аспекты:

1. Расчет оптимальных точек входа. Для каждого рабочего БПЛА определяется ближайшая точка на аварийном маршруте, каждому функционирующему БПЛА назначается точка входа, являющаяся оптимальной с точки зрения минимизации ресурсов.
2. Адаптивное распределение задач. На каждом шаге анализируются остаточные ресурсы БПЛА (время полета), при недостатке ресурсов аварийный участок делится на две равные части и производится переоценка. Процедура повторяется до достижения выполнимых отрезков. Аналогичный подход применяется и при наличии БПЛА, оставшихся без назначения, в целях соблюдения условия (13).
3. Интеграция маршрутов. Полученные отрезки аварийного пути добавляются к текущим заданиям функционирующих БПЛА.

Важно отметить, что данный метод не гарантирует абсолютно оптимального решения, а позволяет получить работоспособный вариант за полиномиальное время и обеспечивает баланс между качеством решения и скоростью его получения.

Рассмотренный методический подход особенно ценен в критических ситуациях, когда важна не идеальная опти-

мальность, а оперативное получение практически реализуемого плана действий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время наблюдается рост потребности в эффективном мониторинге обширных территорий для решения различных прикладных задач – от экологического контроля морских акваторий до оперативного обнаружения очагов лесных пожаров и детального картографирования местности. В связи с этим особую актуальность приобретают методы оптимального планирования подобных операций.

Разработанный метод, хотя и не является исключительно ориентированным на беспилотные летательные аппараты, тем не менее находит свое наиболее эффективное применение именно в этой области. Особенно ярко его преимущества проявляются при организации мониторинга с использованием группы автономных БПЛА, где беспилотные технологии демонстрируют неоспоримые преимущества перед традиционными пилотируемыми решениями.

Предлагаемый подход, основанный на принципах выпуклой декомпозиции территории, позволяет решать комплекс задач, связанных с оптимальным ПМП. Он обеспечивает сбалансированное распределение рабочей нагрузки между аппаратами в группе, учитывает их энергетические ограничения и гарантирует выполнение миссии даже в случае выхода из строя отдельных летательных аппаратов за счет перераспределения зоны ответственности и маршрутов между аппаратами при возникновении нештатных ситуаций.

С практической точки зрения метод обладает высокой степенью универсальности. Полученные с его помощью результаты могут быть непосредственно использованы в большинстве современных систем управления полетами, работающих с географическими координатами. Это делает метод совместимым с широким спектром серийных БПЛА, поддерживающих стандартный режим полета по точкам маршрута.

Важным преимуществом решения является его способность учитывать различные эксплуатационные требования, включая необходимые параметры съемки и высоту полета.

Таким образом, предложенная методика не только повышает эффективность планирования мониторинговых операций, но и существенно увеличивает их надежность, что особенно важно при работе в сложных условиях и при выполнении ответственных задач.

Список использованных источников и литературы/References

1. Бурый А.С., Шевкунов М.А. Оценка качества беспилотных авиационных систем мониторинга окружающей среды // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2017. № 6 (40). С. 4. / Buryi A.S., Shevkunov M.A. Ocenka kachestva bespilotnykh aviacionnykh sistem monitoringa okruzhayushchej sredy. Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation, 2017, no. 6(40), P. 4. (In Russ.).
2. Халимов Н.Р., Мефедов А.В. Распределенная сетцентрическая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 1–13. / Khalimov N.R., Mefedov A.V. Raspredelennaya setetsentricheskaya sistema upravleniya gruppoj udarnykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov. Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti, 2019, no. 3, pp. 1–13. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10301> (In Russ.).
3. Шевкунов М.А. Формирование беспилотных систем на основе гибридных архитектур интеллектуальных агентов // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2023. № 3/4(73). С. 42–50. / Shevkunov M.A. Formirovanie bespilotnykh sistem na osnove gibridnykh arhitektur intellektual'nykh agentov. Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation. 2023, no. 3/4(73), pp. 42–50. (In Russ.).
4. Avellar G.S.C. et al. Multi-UAV routing for area coverage and remote sensing with minimum time. Sensors, 2015. Vol. 15, no. 11, pp. 27783–27803.
5. Li Y. et al. Coverage path planning for UAVs based on enhanced exact cellular decomposition method. Mechatronics, 2011. Vol. 21, no. 5, pp. 876–885.
6. Galceran E., Carreras M. A survey on coverage path planning for robotics. Robotics and Autonomous systems, 2013. Vol. 61, no. 12, pp. 1258–1276.
7. Slater M. Trapezoidal Decomposition. 1997. – URL: <http://www0.cs.ucl.ac.uk/staff/m.slater/Teaching//CG/1997-98/Solutions/Trap/> (дата обращения: 17.03.2025).
8. Yu X. Optimization approaches for a dubins vehicle in coverage planning problem and traveling salesman problems: дис. – Auburn University, 2015.
9. Huang W.H. Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms. Proceedings 2001. ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164). – IEEE, 2001. Vol. 1, pp. 27–32.
10. Acar E.U., Choset H., Rizzi A.A., Atkar P.N., Hull D. Morse decompositions for coverage tasks. The international journal of robotics research, 2002. Vol. 21, no. 4. pp. 331–344.
11. Jiao Y.S., Wang X.M., Chen H., Li Y. Research on the coverage path planning of UAVs for polygon areas. Proceedings of the 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – IEEE, 2010, pp. 1467–1472.
12. Костин В.Н., Калинин А.Н. Методы оптимизации в примерах и задачах: учебное пособие. – Оренбург: ОГУ, 2008. – 153 с. / Kostin V.N., Kalinin A.N. Metody optimizacii v primerah i zadachah: uchebnoe posobie. Orenburg: OGU Publ., 2008, 153 p. (In Russ.).
13. Johnson D.S., Garey M.R. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness. WH Freeman, 1979.
14. Бурый А.С., Шевкунов М.А. Суррогатное моделирование распределенных информационных систем по большим данным // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2019. № 5 (51). С. 43–50. / Buryi A.S., Shevkunov M.A. Surrogatnoe modelirovanie raspredelennykh informacionnykh sistem po bol'shim dannym. Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation, 2019, no. 5(51), pp. 43–50. (In Russ.).
15. Скиена С.С. Алгоритмы. Руководство по разработке. 3-е изд., пер. – СПб.: БХВ-Петербург, 2022. – 848 с. / Skiena S. Algoritmy. Rukovodstvo po razrabotke. Saint Petersburg: BHV-Peterburg Publ., 2022, 848 p. (In Russ.).
16. Махонин А.А., Аль-Духэйдахави М.А.Л., Аль-Карави Р.Д.С. Анализ энергопотребления беспилотного летательного аппарата малых размеров // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2021. № 3. С. 1–9. / Mahonin A.A., Al-Duhejdahavi M.A.L., Al-Karavi R.D.S. Analiz ener-gopotrebleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata malyh razmerov. Matematicheskoe modelirovanie, komp'yuternyj i naturnyj eksperiment v estestvennykh naukah, 2021, no. 3, pp. 1–9. (In Russ.).
17. Германчук М.С. Знание-ориентированные модели многоагентной маршрутизации: специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. – Воронеж, 2022. – 16 с. / Germanchuk M.S. Knowledge-oriented multi-agent routing models. Extended abstract of candidate's thesis. Voronezh, 2022, 16 p. (In Russ.).

METHOD FOR OPTIMIZING THE ROUTE CONSTRUCTION OF A FOR A GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON CONVEX DECOMPOSITION

Buryi A.S., Doctor of Sciences in Technology, Russian Standardization Institute

Shevkunov M.A., degree applicant, Russian Standardization Institute

The article discusses approaches to optimizing the coverage of the territory explored by unmanned aerial vehicles as part of a group.

The aim of the study is to synthesize route planning algorithms aimed at minimizing energy consumption and reducing mission completion time while ensuring compliance with surveillance quality requirements.

Methods: based on convex decomposition, an improved method is proposed and a method for constructing a route for a group of unmanned aerial vehicles is described.

Results: the proposed approach allows solving a set of tasks related to optimal route planning. It ensures a balanced distribution of workload between the vehicles in the group, takes into account their energy limitations and guarantees mission performance even in the event of failure of individual aircraft, by redistributing the area of responsibility and routes between vehicles in case of emergency situations.

Keywords: unmanned aerial vehicles, convex decomposition, trajectory optimization, route planning, group of autonomous UAVs, emergency handling.

For citation: Buryi A.S., Shevkunov M.A. Method for optimizing the route construction of a for a group of unmanned aerial vehicles based on convex decomposition. Information and Economic Aspects of Standardization and Technical Regulation. 2025; 3(84): 88–97. (In Russ.).