

# ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТОВ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ

Бурый А.С., Шевкунов М.А.

Российский институт стандартизации, Москва, Россия

alexbury@mail.ru, misha\_shev@mail.ru

*Аннотация.* Рассматривается оптимизация контроля крупномасштабных объектов комплексными беспилотными системами, включающими наземные транспортные платформы (ТП) и беспилотные авиационные системы. Задача планирования маршрута направлена на минимизацию энергопотребления и сокращение времени выполнения миссии при заданном качестве наблюдения. Формирование маршрутов беспилотных летательных аппаратов осуществляется основе выпуклой декомпозиции зоны обслуживания и сценарного планирования маршрутов движения ТП.

*Ключевые слова:* беспилотные летательные аппараты (БПЛА), двухуровневое планирование, сценарии маршрутов наземных транспортных платформ, информационно-логическое моделирование, маршрутизация групп БПЛА с учетом технического состояния.

## Введение

Современные крупномасштабные системы, такие как топливно-энергетические комплексы, крупные транспортно-логистические центры, промышленные производства и объекты критической инфраструктуры, характеризуются высокой степенью территориальной распределенности, сложностью внутренних взаимосвязей и повышенными требованиями к безопасности и живучести. Управление такими системами требует постоянного мониторинга их состояния, что традиционными методами (стационарные датчики или выездные проверки) зачастую оказывается трудоемким, дорогостоящим и недостаточно оперативным. В этой связи беспилотные летательные аппараты (БПЛА), наряду с другими робототехническими средствами [1], становятся важным инструментом для мониторинга окружающей среды, геоинформационного обеспечения [2], сбора актуальных данных, позволяя проводить регулярный или экстренный осмотр труднодоступных объектов, включая трубопроводы, линии связи, высотные здания и т.п. без непосредственного участия человека.

Однако эффективное использование группы БПЛА для мониторинга крупномасштабных систем влечет необходимость оптимального распределения задач между аппаратами [3, 4]. Простое параллельное развертывание беспилотных аппаратов приводит к значительному перерасходу ресурсов. Некоторые участки в зоне контроля могут обследоваться несколькими БПЛА одновременно, в то время как другие остаются без внимания, что снижает общую эффективность миссии.

Повысить эффективность мониторинга распределенных в пространстве объектов удастся за счет комплексного использования транспортных платформ и БПЛА [5]. При этом транспортная платформа (ТП) может быть наземным или водным транспортным средством, оснащенным аппаратурой связи и управления, зарядной станцией, устройством запуска БПЛА и другим вспомогательным оборудованием, обеспечивая режим проактивного мониторинга объектов контроля зоны обслуживания [6]. Это позволяет оперативно прогнозировать возможное развитие обстановки, а также обеспечивать поддержку принятия решений по перепланированию маршрутов, как в автономном режиме полета, так и в управляемом [7], например, наземным оператором.

За счет оптимизации маршрутов движения наземных ТП и БПЛА удастся значительно увеличить зону обслуживания, сократить время перелетов от мест размещения БПЛА до зоны обслуживания, тем самым повысить оперативность выполнения задач наблюдения, что крайне важно в зонах стихийных бедствий и ликвидаций аварийных ситуаций [8].

Сокращение времени наблюдения при выполнении задач БПЛА обеспечивается на основе реализации метода выпуклой декомпозиции в ходе планирования маршрута, оперативного перераспределения задач при отказах оборудования [9], что исключает дублирование в наблюдении отдельных участков зоны обслуживания. Это позволяет минимизировать время выполнения миссии, снизить энергозатраты бортового оборудования и обеспечить максимальный охват контролируемой территории без избыточного дублирования.

Сочетание методов сценарного планирования в ходе комплексирования ТП с группами БПЛА дает возможность повысить автономность управления БПЛА в режимах наблюдения, обмена информацией при работе в труднодоступной местности, в условиях сложной помеховой обстановки.

## 1. Формирование возможных сценариев взаимодействия

Динамику функционирования ТП будем представлять в виде набора задач, решаемых в контрольных точках (узлах маршрута):

$$M^{ТП} = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_K\}, \quad (1)$$

где  $Z_k$  – задачи, выполняемые в узлах маршрута,  $k = \overline{1, K}$ , а  $K$  – общее число узлов маршрута ТП. Так в узле  $Z_1$  осуществляется подготовка к запуску БПЛА (I) и запуск, например, в узле  $Z_2$  – операции по посадке/запуску нового БПЛА (II) (см. рис. 1). В процессе движения ТП осуществляется контроль и оперативное управление прохождением маршрута БПЛА, при необходимости решаются задачи перепланирования целей, а также подготовка к запуску очередных БПЛА (III, ...).

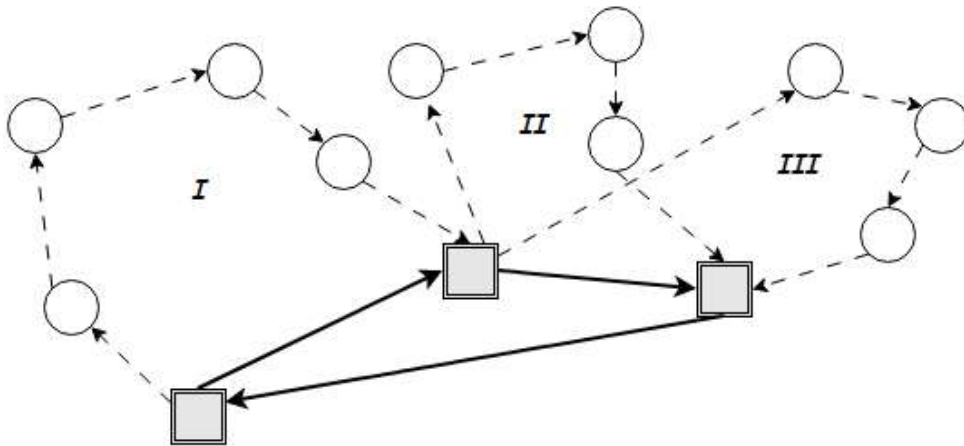


Рис. 1. Пример циркуляции ТП с возвращением в точку отправления: I, II, III – маршруты движения БПЛА; □ – узлы маршрута ТП; ○ – узлы маршрутов БПЛА

В зависимости от решаемых задач беспилотной системой мониторинга, зоны обслуживания, оперативной обстановки, различных формальных характеристик для формирования маршрута движения транспортной платформы целесообразно применить сценарный подход [8], причем модельный мета набор зависит от ресурсных ограничений БПЛА, зоны обслуживания, оперативной обстановки и ряда других факторов. Однако даже в условиях существующей неопределенности будем рассматривать два типовых сценария формирования маршрута движения ТП, на основе которых строится логика управления беспилотными летательными аппаратами: а) маршрут на основе циркуляции ТП, когда точка старта и финиша совмещены (рис. 1); б) маршрут с разнесенными точками старта и финиша ТП. Второй сценарий наиболее характерен, например, при ликвидации последствий аварий или, например, когда ТП использует речной транспорт для контроля обширных территорий (рис. 2), когда контролируемые участки составляют типовую программу контроля по заданной временной шкале и заранее «привязанными» точками стоянок ТП.

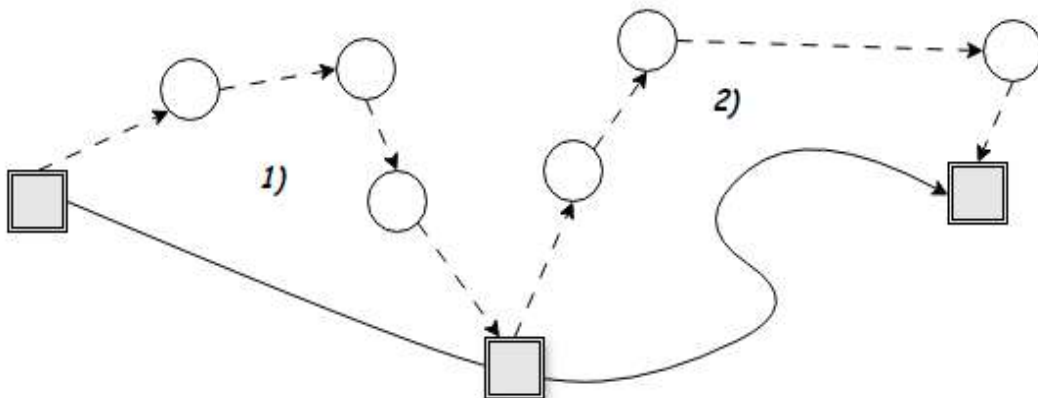


Рис. 2. Пример движения ТП без возвращения в исходную точку: 1) и 2) – типовые маршруты движения БПЛА

## 2. Особенности маршрутизации БПЛА в автономном режиме

Продолжая структурный синтез системы «транспортные платформы – беспилотные аппараты», на уровне функционально-логического представления, будем рассматривать маршрут БПЛА, по аналогии с (1), в виде последовательности выполняемых функциональных задач:

$$M^{\text{БП}} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_l, \dots, Y_L\}, \quad (2)$$

где  $Y_l$ ,  $l = \overline{1, L}$  – задачи целевого применения БПЛА, в которые, кроме видеонаблюдения и поиска характерных целей, входят задачи передачи данных, информационного взаимодействия между БПЛА при выполнении задач в составе группы и другие.

Каждая задача  $Y_l$  включает ряд подзадач  $S_l$  и правил перехода  $P_l$  между задачами, определяемыми бортовым планировщиком БПЛА:

$$Y_l = \{S_l, P_l\}, \quad (3)$$

где множество  $S_l$  также может дробиться в соответствии с технологиями выполнения конкретной подзадачи на ряд единичных подзадач, число которых обозначим через  $c_l$ , причем дальнейшее дробление единичных задач не предусмотрено, тогда

$$S_l = \{s_{l1}, s_{l2}, \dots, s_{lc_l}\} = \{s_{lr}\}, \quad r = \overline{1, c_l}, \quad (4)$$

где атрибуты единичной задачи определяются заданным состоянием бортового планировщика  $\overline{P}_{lr}$  БПЛА и логикой возможных переходов между единичными подзадачами –  $P_{lr}$ , что представим, как

$$s_{lr} = \{\overline{P}_{lr}, P_{lr}\}.$$

Для некоторой подзадачи  $s_{lr}$ , например, фотосъемки наземных объектов,  $\overline{P}_{lr}$  может содержать их координаты, а  $P_{lr}$  – последовательность выполнения съемки. На этом этапе не учитываются технологические обеспечивающие задачи, по оптимизации бортового оборудования, путем реконфигурации бортовых систем, парирования возникающих отказов и другие [9, 10].

Представленные типовые сценарии (см. рис. 1 и 2) соответствуют штатной процессу мониторинга. Количество сценариев значительно возрастает, когда от планового наблюдения за площадными зонами обслуживания (периодический контроль трубопроводных структур, энергетических линий передачи) переходят, например, к ликвидации последствий аварий, локализации лесных пожаров, когда возможны потери в составе группы БПЛА, потери информации, вследствие чего требуется оперативное перепланирование и повторное проведение съемки.

Сценарий проведения мониторинга для рассматриваемой системы ТП-БПЛА, основываясь на выражениях (1) и (2), запишем в виде:

$$S_c^{(q)} = \begin{cases} M_q^{\text{ТП}} \{Z_{q1}, \dots, Z_{qe}\}, e = \overline{1, K}; \\ M_q^{\text{БП}} \{Y_{q1}, \dots, Y_{qw}\}, w = \overline{1, L}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $S_c^{(q)}$  – сценарий мониторинга,  $q = \overline{1, Q}$  – номер сценария.

Если для ТП маршрутизация больше нацелена на обеспечивающие задачи (процессы подготовки, пуска, связи, контроль состояния БПЛА), то для системы мониторинга на базе БПЛА, при важности технического состояния бортового оборудования, основной акцент делается на выполнение целевой задачи – получение и доставка видеоданных о контролируемом объекте.

Таким образом, для целевых задач мониторинга анализируются информационно-логические структуры выполняемых операций в рассматриваемом сценарном пространстве [11], в котором модель представления маршрута  $M_q^{\text{БП}}$  из выражения (5) уточняется, исходя из информационных задач, свойственных процессу мониторинга.

Получаемые данные в ходе решения задач мониторинга представим в виде:

$$D_{qw} = (Y_{qw}, Md_q^{\text{БЗ}}), \quad (6)$$

где  $D_{qw}$  – полученные данные в ходе выполнения  $w$ -й задачи по  $q$ -му сценарию, а  $Md_q^{\text{БЗ}}$  – модель базы знаний для информационной поддержки выполнения  $q$ -го сценария, включая типовые настройки измерительной аппаратуры, учет метеорологической обстановки в районе наблюдения [8] и ряд других факторов управления, в частности правила переходов  $P_{lr}$  между единичными подзадачами (см. выражения (3) и (4)).

Формирование массива данных  $D_{qw}$  осуществляется за счет измерительных функций бортовых аппаратных средств БПЛА. Однако для крупномасштабных объектов, характеризующихся большой протяженностью, разнообразными режимами и диапазонами съемки, важной является интегрирующая функция, для объединения разнотипных данных для дальнейшего информационного анализа.

Планирование групповой работы БПЛА сводится к разделению общей длины маршрута на приблизительно равные части по количеству привлекаемых к задачам наблюдения БПЛА. Пример разбиения маршрута на части для двух БПЛА представлен на рис. 3, на котором маршрут каждого БПЛА показан своим цветом [9].

Окончательная продолжительность целевого использования БПЛА на маршруте определяется его энергетикой, относительной близостью ТП, а также применяемым навесным оборудованием.

Минимизация суммарной длины маршрута, а, следовательно, и времени наблюдения или времени выполнения миссии может быть представлено, как минимизация выбранной целевой эффективности – Э при выполнении следующих ограничений [9, 12].



Рис. 3. Пример формирования маршрута для двух БПЛА

Индикаторная функция последовательности прохождения контрольных узлов (точек) маршрута, общее число которых  $N$ , а количество БПЛА равно  $M$ , имеет вид:

$$x_{i/i+1}^m = \begin{cases} 1, & \text{если } m - \text{й БПЛА посещает точку } i + 1 \text{ после } i; \\ 0, & \text{если иначе} \end{cases}, \quad (7)$$

когда выполняются следующие условия:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M x_{i/i+1}^m = 1, \quad i = 1, \dots, N; \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N x_{i/j}^m \leq \Theta, \quad \forall m \in M. \quad (9)$$

Таким образом, формирование маршрута в рассматриваемой задаче мониторинга заданной зоны ответственности включает два уровня планирования:

1. Выбор сценария формирования маршрута движения транспортной платформы, выполняющей функции технической и технологической поддержки задач проактивного мониторинга группой БПЛА заданного района.

2. Оптимизация маршрутов БПЛА в составе группы путем перераспределения задач в условиях временных ограничений и возможных технических отказов в составе БПЛА, вызванных сложными условиями наблюдения [8] (контроль зон пожаров и других чрезвычайных ситуаций).

Относительная близость ТП к зоне обслуживания выступает важным фактором безусловного выполнения задач мониторинга в условиях возможного значительного сокращения группировки беспилотных аппаратов.

### 3. Заключение

Преимущества рассмотренного подхода, основанного на двухэтапной маршрутизации, как наземных транспортных платформ, выступающих в роли подвижных пунктов обслуживания и управления группой БПЛА (на первом этапе), так и непосредственно маршрутизацией группы БПЛА (второй этап).

Разработка возможных сценариев применения ТП требует дальнейшего развития в направлении комбинирования оперативного перемещения ТП, с учетом выполнения целевых задач и динамики развития чрезвычайных ситуаций.

Высокая степень универсальности метода маршрутизации БПЛА, построенного на принципах выпуклой декомпозиции участков местности в текущем времени с адаптацией к реальной местности, обеспечивающая при этом высокий уровень технической отказоустойчивости и живучести в контексте безусловного выполнения задач мониторинга заданных объектов и территорий, особенно важна при работе в сложных условиях и при выполнении ответственных задач в крупномасштабных системах. При использовании БПЛА в масштабных миссиях фокус первостепенных проблем составляют связь (взаимодействие), координация, автономность, масштабируемость, надежность и безопасность, которые остаются ключевыми в задачах управления беспилотными объектами.

### Литература

1. *Солдатов Е.С., Солдатов А.С.* Интеллектуальные робототехнические средства мониторинга состояния промышленного оборудования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 8. – С. 319–323.
2. *Ознамец В.В.* Пространственная съемка и моделирование с использованием беспилотных летательных аппаратов // Образовательные ресурсы и технологии. – 2020. – № 1(30). – С. 83–91.
3. *Кутахов В.П., Плякота С.И., Екимов А.И.* Управление программой развития роботизированных авиационных систем как крупномасштабной организационно-технической системой // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): труды Девятой междунар. конф.: в 2 т. – М.: ИПУ РАН, 2016. – Т. 2. – С. 25–32.
4. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.
5. *Liu Y., Luo Z., Liu Z., et al.* Cooperative routing problem for ground vehicle and unmanned aerial vehicle: The application on intelligence, surveillance, and reconnaissance missions // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 63504–63518.
6. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1(162). – С. 162–174.
7. *Бурый А.С., Шевкунов М.А.* Подход к построению систем поддержки принятия решений при управлении беспилотными летательными аппаратами // Транспортное дело России. – 2015. – № 6. – С. 199–202.
8. *Мецераков Р.В., Саломатин А.А., Сенчук Д.В., Широков А.С.* Сценарий поиска, выявления и тушения пожара в лесном массиве // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8, № 4. – С. 25.
9. *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. <https://doi.org/10.24412/2311-1348-2025-3-88-97>
10. *Орехович Р.А.* Методика функциональной реконфигурации комплекса бортового оборудования беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. – 2024. – № 136. – С. 10.
11. *Кульба В.В., Кононов Д.А., Чернов И.В., Роцин П.Е., Шулигина О.А.* Сценарное исследование сложных систем: анализ методов группового управления // Управление большими системами: сборник трудов. – 2010. – № 30–1. – С. 154–186.
12. *Скиена С.С.* Алгоритмы. Руководство по разработке. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2022. – 848 с.