

УДК 629.7.05:519.876.5

DOI 10.35211/1990-5297-2025-4-299-79-83

*Р. Ф. Файзуллин, Е. А. Магид***РАЗМЕЩЕНИЕ ЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ГРУППЫ
ГОМОГЕННЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
В МИССИЯХ ПОКРЫТИЯ БОЛЬШИХ ТЕРРИТОРИЙ*****Казанский (Приволжский) федеральный университет**

fzllnrm@gmail.com, magid@it.kfu.ru

В статье рассмотрена задача размещения зарядных станций и планирования маршрутов для группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), выполняющих покрытие больших территорий. Предложен алгоритм, оптимизирующий распределение задач между БПЛА и расстановку зарядных станций для снижения времени выполнения миссии с учетом уровня заряда батареи БПЛА и числа станций.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, задача покрытия, генетический алгоритм, зарядная станция.

*R. F. Faizullin, E. A. Magid***PLACEMENT OF CHARGING STATIONS FOR A GROUP
OF HOMOGENEOUS UNMANNED AERIAL VEHICLES
IN LARGE-AREA COVERAGE MISSIONS****Kazan (Volga region) Federal University**

The article deals with the problem of placing charging stations and planning routes for a group of UAVs covering large areas. We propose an algorithm that optimizes a distribution of tasks between UAVs and a placement of charging stations to reduce mission time, taking into account a charge level of a UAV battery and a number of charging stations.

Keywords: unmanned aerial vehicle, coverage problem, genetic algorithm, charging station.

Введение

Решение задачи покрытия широко востребовано в различных областях, связанных с мониторингом и сбором данных. Под покрытием территории понимается процесс, при котором один робот или группа мобильных роботов должны последовательно посетить или обследовать заданную область. Примеры практических приложений задачи покрытия включают обследование инфраструктуры, мониторинг и опрыскивание полей в сельском хозяйстве, аэрофотосъемку, выявление лесных пожаров, поисково-спасательные операции. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно применяются в задачах покрытия, так как позволяют оперативно собирать данные в недоступных или труднодоступных для наземных роботов местах. Для уменьшения времени выполнения миссий покрытия на больших площадях применяется одновременно группа БПЛА. Для этого часто зону покрытия разделяют на несколько участков, и каждый БПЛА производит облет своего участка.

Многороторные БПЛА являются наиболее популярными благодаря простоте управления, высокой маневренности и точному трехмерному перемещению, а также возможности вертикального взлета и посадки без взлетно-посадочных полос или пусковых установок. Массовое производство основных компонентов БПЛА (электродвигателей, контроллеров, аккумуляторов) привело к снижению цен и упрощению технического обслуживания. Несмотря на перечисленные достоинства, многороторные БПЛА характеризуются повышенным энергопотреблением и сравнительно небольшим временем полета на одном заряде аккумулятора. Это создает проблему при покрытии крупных территорий, так как требует частой смены батареи или подзарядки.

Одним из решений данной проблемы является размещение стационарных зарядных станций [1]. Такой подход позволяет избежать необходимости возвращения БПЛА на исходную позицию для зарядки или замены аккумуляторов. Статические зарядные станции эффективно

© Файзуллин Р. Ф., Магид Е. А., 2025.

* Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

применять, когда требуется регулярный мониторинг территории. Однако с внедрением зарядных станций усложняется задача планирования маршрутов и координации полетов группы БПЛА, так как необходимо учитывать временные затраты на подзарядку и координацию полетов, чтобы свести к минимуму время простоя БПЛА и избежать падения уровня заряда батареи БПЛА ниже критического порога.

В данной работе предлагается алгоритм, сочетающий в себе оптимизацию распределения задач среди группы гомогенных БПЛА и расстановку стационарных зарядных станций на территории [2]. Алгоритм направлен на повышение эффективности автоматизированного мониторинга больших территорий, обеспечивая сокращение общего времени миссии. С помощью выбора параметров алгоритма учитывается баланс между количеством зарядных станций, их расположением и временем, затрачиваемым на перемещение БПЛА к станциям.

Постановка задачи

Подлежащая охвату территория P представляет собой многоугольник с наложенной на нем сеткой, с ячейками единичного размера $P = \{p_1, p_2 \dots p_N\}$. Для проведения охвата используется k гомогенных БПЛА $U = \{U_1, U_2 \dots U_k\}$ с одинаковым объемом заряда батареи, позволяющим пролететь расстояние T . Каждый БПЛА начинает движение в стартовой точке D , расположенной вне области P . В области P возможно расположить статичные зарядные станции [3] в количестве не более чем m . Предполагается, что объем заряда станции не ограничен, зарядная станция может устанавливаться в любой ячейке области P и одновременно обслуживать до q БПЛА. Учитывая большие площади подлежащей охвату территории, расход заряда БПЛА считается пропорциональным пройденному расстоянию, пренебрегая увеличенным расходом при совершении маневров поворота, разворота, взлета и посадки.

В процессе выполнения покрытия области P БПЛА перемещаются от центра своей текущей ячейки к центру соседней ячейки в одном из восьми следующих направлений: вверх, вниз, влево, вправо или по диагонали; в задачах покрытия – это ограничение позволяет не оставлять промежутков в покрытии (например, между ячейками). Вне территории P БПЛА передвигаются по кратчайшему расстоянию между точками старта и назначения (по прямой). Пе-

релет к зарядным станциям и возвращение в зону покрытия подразумевается также по прямой траектории. В данной задаче предполагается использование многороторных БПЛА с вертикальным взлетом и посадкой, каждый из которых занимает уникальный фиксированный эшелон, и не способен к совершению столкновения с другими БПЛА.

Решением задачи следует считать траектории путей покрытия для каждого БПЛА $path_i$ для $\forall i: 1 \leq i \leq k$, которая является последовательностью ячеек области P с фиксированной точкой старта $s_i \in P$, и последовательность номеров ячеек для установки зарядных станций $ChS = \{p_1, p_2 \dots p_w\}$, где $w \leq m$.

Все БПЛА вылетают одновременно из стартовой точки D , двигаются с фиксированной скоростью прямолинейно к точке старта $s_i \in P$, далее производят индивидуальное покрытие согласно назначенному пути $path_i$. При падении уровня заряда батареи БПЛА производит приостановку выполнения миссии покрытия и движется к ближайшей по прямой зарядной станции [4], производит зарядку батареи и возвращается к месту на пути $path_i$, на котором прервалась задача покрытия. После завершения покрытия своего участка БПЛА возвращается к стартовой точке D . На протяжении всей миссии заряд ни одного БПЛА не должен опускаться ниже критического порога заряда батареи λ .

Алгоритм покрытия

Вначале для всей области P генерируется общий маршрут покрытия [5] для одного агента. Поскольку алгоритм предназначен для покрытия больших территорий без учета препятствий или непокрываемых областей внутри области P , БПЛА в процессе покрытия движется преимущественно по прямолинейным траекториям. Для построения маршрута используется алгоритм бустрофедона, основанный на разбиении области покрытия на параллельные полосы, которые затем последовательно обходятся зигзагообразным движением; подход минимизирует количество разворотов и позволяет эффективно покрывать заданную территорию. В алгоритме сравнивается несколько вариантов построения покрытий с различными углами поворота от 0 до 90 градусов (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90) и выбирается тот, который содержит минимальное количество маневров для БПЛА (на рис. 1 представлено сравнение для горизон-

тального и вертикального в 90 градусов угла поворота), что способствует снижению затрат энергии и повышению эффективности покрытия области P . Результатом работы является

маршрут покрытия всей области P одним БПЛА, который обозначим как $CvgPath$. Его длина равна общему количеству ячеек области P и будет обозначаться через $|CvgPath|$.

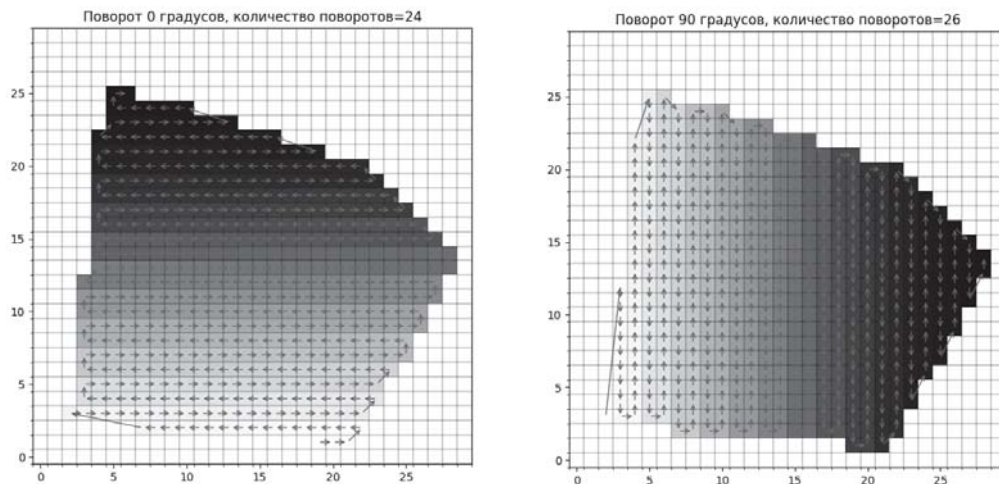


Рис. 1. Подсчет количества поворотов БПЛА при покрытии под углами 0 и 90 градусов

Далее маршрут разбивается на k непрерывных сегментов, чтобы каждый БПЛА мог последовательно покрыть свой участок. Задаются границы сегментов; первый сегмент начинается с первой ячейки $CvgPath$, а последний сегмент завершается на ячейке $|CvgPath|$. Таким образом:

$$1 = s_1 < s_2 < s_3 < \dots < s_k < s_{k+1} = |CvgPath|. \quad (1)$$

Тогда БПЛА U_i последовательно покрывает ячейки $\{p_{s_i}, p_{s_i+1}, \dots, p_{s_{i+1}-1}\}$. Каждый БПЛА U_i начинает в стартовой точке, производит покрытие (при необходимости отклоняясь от маршрута для зарядки), а затем возвращается в точку старта, затрачивая на это время $Time_i$. Полное время выполнения миссии определяется как

$$Time = \max_{1 \leq i \leq k} (Time_i). \quad (2)$$

Основная цель состоит в снижении общего времени $Time$ (2) за счет планирования полетных маршрутов БПЛА и одновременной расстановки достаточного числа зарядных станций. Множество зарядных станций задается номерами ячеек, на которых они будут установлены, $ChS = \{p_1, p_2, \dots, p_w\}$, где $w \leq m$. Задача сводится к одновременному поиску множества $S = \{s_2, s_3, \dots, s_k\}$ из (1) и набора зарядных станций $ChS = \{p_1, p_2, \dots, p_w\}$ для минимизации значения $Time$ (2). Эта задача, как и построение

маршрутов покрытия в общем случае, является NP-сложной, и ее вычислительная сложность экспоненциально возрастает с увеличением размеров исходных данных.

Для решения предлагается использовать генетический алгоритм [6]; для этого определим его основные компоненты. Хромосома решения представляет собой последовательность точек, разделяющих маршрут $CvgPath$, а также последовательность координат зарядных станций (рис. 2). Стоит отметить, что обе части хромосомы упорядочены в соответствии с нумерацией ячеек области.

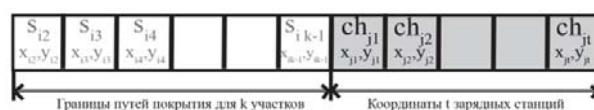


Рис. 2. Структура хромосомы решения

Начальная популяция формируется случайным образом: часть особей генерируется путем разбиения маршрута $CvgPath$ на равные сегменты со случайным отклонением на каждом из них, а координаты для расположения t зарядных станций выбираются произвольно.

Оператор скрещивания формирует новую хромосому на основе двух родительских, поразному обрабатывая границы сегментов и координаты зарядных станций. Границы сегментов подвергаются одноточечному скрещиванию в случайно выбранном гене, тогда как для за-

рядных станций используется покомпонентное скрещивание: с фиксированной вероятностью станция наследуется от одного из родителей. Представление воздействия оператора скрещивания приведено на рис. 3.

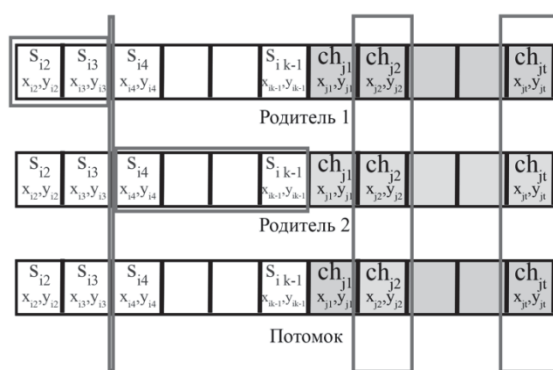


Рис. 3. Реализация оператора скрещивания

Оператор мутации случайным образом сдвигает границы сегментов, а также удаляет или добавляет зарядные станции. Выделяются три разновидности мутации, каждая из которых применяется с фиксированной вероятностью. Для уменьшения общего числа зарядных станций после мутации дополнительно применяется оператор, который объединяет близко расположенные станции в одну и удаляет те, которые не были задействованы при покрытии области P .

Функция приспособленности оценивает время завершения миссии $Time$ (2) и общее количество зарядных станций $|Ch|$ по формуле:

$$F = \alpha \cdot Time + \beta \cdot |Ch|, \quad (3)$$

где весовые коэффициенты α и β задают приоритет между временем выполнения миссии и числом зарядных станций. В качестве механизма отбора в алгоритме используется турнирная селекция, основанная на значениях функции приспособленности (3) для всех особей популяции.

Прототип программного обеспечения для генетического алгоритма разработан на языке Python с использованием научных библиотек для визуализации данных. Для проверки корректности и эффективности разработанного подхода были проведены вычислительные эксперименты на различных тестовых наборах данных (рис. 4.). В частности, было проведено сравнение временных затрат и структуры расстановки зарядных станций при различных параметрах α и β функции приспособленности. Вычислительные эксперименты подтвердили

возможность снижения общего времени миссии за счет эффективного распределения сегментов маршрута и выбора координат зарядных станций.

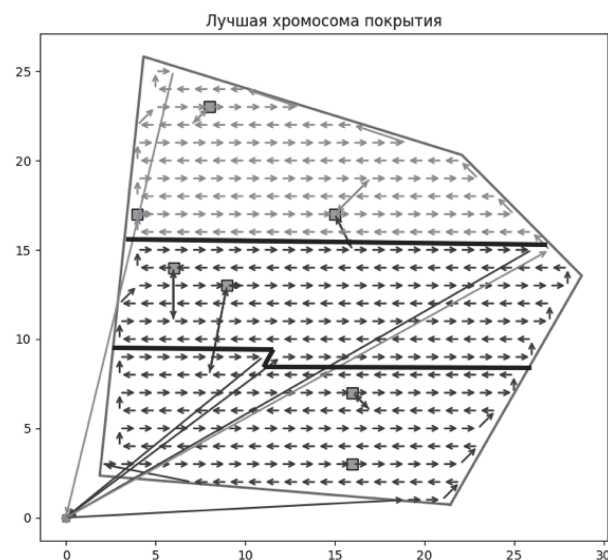


Рис. 4. Работа программы на случайной карте. Стрелками показаны пути покрытия для трех БПЛА. Квадратами обозначены зарядные станции

Для анализа эффективности предложенного генетического алгоритма покрытия территории (ГАПТ) было проведено сравнение с двумя альтернативными методами размещения зарядных станций и распределения зоны покрытия. Первый метод (алгоритм Алг1) предусматривает разделение маршрута между БПЛА на равные участки и случайное расположение зарядных станций при условии их равномерного размещения на территории покрытия. Второй метод (алгоритм Алг2) использует принцип разделения маршрута на равные участки, но станции размещались по «жадной» схеме: после случайного выбора первой зарядной станции каждая последующая ставилась максимально далеко от уже установленных.

Для сравнения эффективности Алг1, Алг2 и ГАПТ было сгенерировано 30 различных многоугольных карт размером от 500 до 10000 квадратных ячеек. На каждой карте алгоритмы запускались с одинаковыми начальными параметрами (количество БПЛА, объем заряда). Оценивались суммарное пройденное нефункциональное расстояние (которое БПЛА пролетают при полете к зарядным станциям и возвращении в точку продолжения миссии, без учета полета непосредственного выполнения покрытия; единицы измерения – количество

ячеек), количество установленных зарядных станций, количество произведенных зарядок на одной станции, количество поколений до сходимости (только для ГАПТ), время выполнения алгоритма. Вычислительные эксперименты

проводились на компьютере MacBook Air (M1), 8-core CPU, 8GB RAM. В таблице представлены средние значения показателей для тридцати запусков алгоритмов, по одному на каждой карте.

Средние значения показателей

Показатель	Алг1	Алг2	ГАПТ
Суммарное пройденное расстояние, ячейки	34,58	31,65	9,3
Количество станций	4,97	5,1	8,84
Количество зарядок на одной станции	1,39	1,21	2,03
Число поколений	–	–	7,07
Время работы, с	0,53318	0,76003	1,10980

Таблица показывает, что у ГАПТ средние значения суммарного нефункционального расстояния ниже, чем у базовых методов Алг1 и Алг2. С параметрами $\alpha = 0,9$ и $\beta = 0,1$ функции приспособленности (3) ГАПТ генерирует большее число зарядных станций, и каждая станция используется интенсивнее, но это не ведет к увеличению общего пройденного нефункционального расстояния всеми БПЛА. Несмотря на несколько большее время вычислений, применение генетического алгоритма повышает эффективность покрытия большой площадной территории группой БПЛА, сокращая общее время миссии. Более того, изменения акцента с минимизации нефункционального расстояния на минимизацию числа зарядных станций достигается варьированием параметров функции (3).

Заключение

Предложенный генетический алгоритм решает задачу планирования маршрутов группы БПЛА и расстановки стационарных зарядных станций на больших территориях. Подход учитывает энергопотребление БПЛА и позволяет снизить общее время миссии за счет рационального размещения станций и распределения участков покрытия между БПЛА. Результаты

вычислительных экспериментов показали эффективность и гибкость метода при оптимизации времени миссии и количества зарядных станций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wei, M. Coverage path planning under the energy constraint / M. Wei, V. Isler // IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. – 2018. – P. 725–731.
2. Huang, H. A method of optimized deployment of charging stations for drone delivery / H. Huang, A.V. Savkin // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2020. – Vol. 6, № 3. – P. 510–518.
3. Yu, K. Algorithms for routing of unmanned aerial vehicles with mobile recharging stations / K. Yu, A.K. Budhiraja, P. Tokekar // Системы анализа и обработки данных. – 2024. – № 1(93). – С. 54–65.
4. Tseng, C.-M. Flight tour planning with recharging optimization for battery-operated autonomous drones / C.-M. Tseng, C.-K. Chau, K. Elbassioni, M. Khonji // arXiv preprint arXiv:1703.10049. – 2017.
5. Trotta, A. Joint coverage, connectivity, and charging strategies for distributed UAV networks / A. Trotta, M. Di Felice, F. Montori, K.R. Chowdhury, L. Bononi // IEEE Transactions on Robotics. – 2018. – Vol. 34, № 4. – P. 883–900.
6. Файзуллин, Р. Ф. Применение генетического алгоритма для решения задачи покрытия территории группой беспилотных летательных аппаратов при поддержке наземной мобильной зарядной станции: формирование хромосомы / Р. Ф. Файзуллин, Е. А. Магид // Известия ЮФУ. – 2024. – № 1. – С. 134–141.