

# Планирование маршрутов полета БПЛА в задачах группового патрулирования больших протяженных территорий

А. Б. Филимонов<sup>1,2</sup>, Н. Б. Филимонов<sup>3,4</sup>, К. Ф. Фам<sup>4</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (научно-исследовательский университет)

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>4</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

filimon\_ab@mail.ru, nbfilimonov@mail.ru, hvkts1421996@gmail.com

**Аннотация.** Рассматривается задача оптимального планирования маршрутов полета однотипных БПЛА при групповом патрулировании территорий большой протяженности. Предполагается, что патрулируемая территория имеет вытянутую форму и разбита на цепочку смежных зон патрулирования, предписанных отдельным БПЛА. Оптимизационный аспект планирования маршрутов полета БПЛА состоит в минимизации сроков выполнения полетных заданий, либо минимизации длины маршрута. Рассматриваемая задача группового патрулирования ставится как множественная задача коммивояжера, которая сводится к задаче целочисленного линейного программирования. Для решения последней предложен генетический алгоритм, реализованный в среде MATLAB. Вычислительные эксперименты подтверждают эффективность предложенных алгоритмических решений.

**Ключевые слова:** групповое патрулирование, планирование маршрутов полета, целочисленное линейное программирование, генетический алгоритм, среда программирования MATLAB

## I. ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) (беспилотники, дроны; англ. Unmanned Aerial Vehicles, UAV) приобрели огромную популярность в различных сферах человеческой деятельности благодаря их очевидным преимуществам: большая экономичность, простота в эксплуатации, малая стоимость и отсутствие людских ресурсов.

Одним из важных и наиболее трендовых использований БПЛА как в военных, так и в гражданских целях является охранно-мониторинговая деятельность в виде воздушного **патрулирования** (от франц. patrouiller – ходить дозором) протяженных объектов путем постоянного регулярного, периодического их облета, сбора и оперативной передачи информации на станцию управления о наблюдаемой с воздуха обстановке как на периметре, так и внутри патрулируемого объекта. Воздушное патрулирование является естественным для миссий не только мирного времени в целях защиты патрулируемого объекта, но и военного времени в целях **рекогносцировки** (от лат. *reconosco* – «осматриваю, обследую»), т. е. разведки, наблюдения, визуального изучения расположения и местности обороны противника в районе предстоящих боевых действий.

Впервые БПЛА начали применять для патрулирования границ в США в 2004 г. Сегодня большинство развитых стран активно использует

беспилотники для воздушного патрулирования своих границ, однако эта информация носит сугубо скрытый характер. При этом задачи группового патрулирования исследованы заметно хуже, чем их аналоги для случая одного беспилотника.

Воздушное патрулирование предполагает решение задачи планирования маршрута (англ. Vehicle Routing Problem, VRP) полета БПЛА. В настоящей работе, развивающей результаты авторов [1, 2], дается постановка и приводится решение задачи планирования оптимальных маршрутов полета БПЛА при групповом патрулировании территорий большой протяженности.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ПОЛЕТА ГРУППЫ БПЛА

Классическая задача маршрутизации при одиночном или групповом патрулировании БПЛА некоторой территории, заданной планом местности, заключается в построении замкнутых маршрутов облета беспилотниками данной территории, проходящих через все полетные зоны патрулирования и оптимальных по некоторому критерию (см., например, [3–9]).

Весьма популярный подход к постановке и решению задачи оптимальной маршрутизации БПЛА при групповом патрулировании заключается в ее формализации как **множественной задачи коммивояжера** (МЗК) (англ. Multiple Traveling Salesman Problem, MTSP) [10–16], в которой допускается более одного **коммивояжера** и которая является обобщением задачи коммивояжера (ЗК) с одним коммивояжером (англ. Traveling Salesman Problem, TSP), связанной с отысканием наиболее экономичного циклического обхода (маршрута коммивояжера) заданного конечного множества «клиентов».

Рассмотрим сценарий постоянного воздушного мониторинга заданной территории группой БПЛА. Предполагается, что все беспилотники однотипны, причем полетное задание для каждого из них выполняется периодически и состоит в его перемещении в заданную полетную зону, сборе оперативных данных и передаче этих данных на станцию управления. Основными показателями процесса патрулирования являются: время задержка данных (время доставки) до станции управления и частота повторного рейса в зоны патрулирования.

Полагаем, что патрулируемая территория имеет вытянутую форму и образует цепочку смежных зон

патрулирования. Прототипом такой территории могут служить территориальные воды или узкие приграничные участки какого-либо государства. Дадим математическую формализацию рассматриваемой задачи патрулирования.

Введем следующие обозначения:  $N$  – число зон патрулирования;  $m$  – число БПЛА, задействованных для патрулирования;  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$  – упорядоченное множество всех зон патрулирования, причем  $p_i$  и  $p_{i+1}$  – смежные (граничащие друг с другом) зоны;  $d$  – место базирования беспилотников (далее – депо);  $\tau_i$  – время патрулирования  $i$ -й зоны;  $\tau_{di}$  – время полета беспилотника от депо  $d$  до  $i$ -й зоны, а  $\tau_{id}$  – время его полета от  $i$ -й зоны до депо  $d$ .

Разбиение протяженной патрулируемой территории на  $N$  зон иллюстрирует рис. 1.

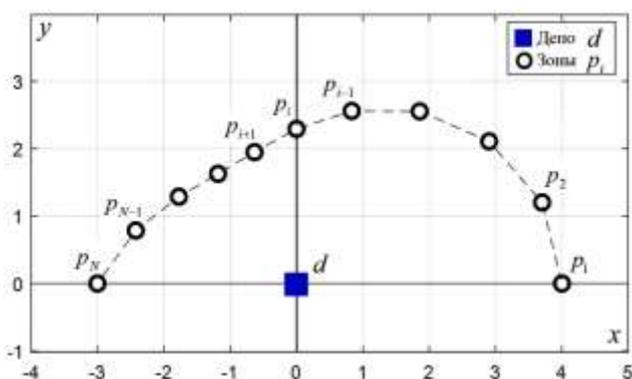


Рис. 1. Разбиение территории на зоны патрулирования

Конфигурационной моделью рассматриваемой задачи является полный граф  $G = (V, E)$  со множеством вершин  $V = P \cup \{d\}$  и множеством ребер (дуг)  $E$ , представляющих возможные варианты перелета БПЛА.

Обозначим через  $Task_i$  и  $N_i$  соответственно  $i$ -е полетное задание ( $i = 1 : m$ ) и число зон, предписанных  $i$ -му БПЛА, так что

$$N_i \geq 1 \quad (i = 1 : m), \quad N = N_1 + N_2 + \dots + N_m.$$

Считаем, что задание  $Task_1$  охватывает первые  $N_1$  зон, задание  $Task_2$  – последующие  $N_2$  зон и т. д.

Продолжительность  $T_i$  выполнения  $i$ -го задания  $Task_i$  определяется равенством

$$T_i = \tau_{di} + \tau_{id} + \sum_{I_i \leq j < I_{i+1}} \tau_j \quad (i = 1 : m),$$

где  $I_i$ ,  $i = 1 : m + 1$  – индексы:

$$I_1 = 1, \quad I_2 = I_1 + N_1, \quad \dots, \quad I_m = I_{m-1} + N_{m-1}, \quad I_{m+1} = N.$$

Тогда рассматриваемую задачу планирования маршрутов группового патрулирования можно поставить как задачу минимизации максимальных сроков выполнения всех полетных заданий  $Task_i$ ,  $i = 1 : m$ :

$$T_{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} T_i \rightarrow \min.$$

Если ввести в рассмотрение расстояние полета  $L_i$   $i$ -го БПЛА для выполнения  $i$ -го задания  $Task_i$ , то рассматриваемую задачу маршрутизации можно поставить как задачу минимизации суммарного расстояния полета  $L_{\max}$  при выполнении всех  $m$  полетных заданий:

$$L_{\max} = \max(L_1, \dots, L_m) \rightarrow \min.$$

Таким образом, можно констатировать, что рассматриваемая задача оптимальной маршрутизации полета группы БПЛА сформулирована как МЗК.

### III. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КОММИВОЯЖЕРА

ЗК является ключевой задачей транспортной логистики, занимает особое место в комбинаторной оптимизации и уже более 90 лет продолжает привлекать внимание исследователей. [12]. Данная задача является одной из самых сложных, труднорешаемых оптимизационных задач. Современное состояние ЗК и МЗК отражают, например, публикации [13–20].

Для решения ЗК до сих пор не найдено быстрых полиномиальных алгоритмов. Еще в 70-х годах прошлого столетия было доказано, что ЗК является NP-полной (Nondeterministic Polynomial) трансвычислительной задачей. Существует множество различных методов решения ЗК и МЗК, которые при всем многообразии относятся к категориям точных и эвристических методов.

Точные методы производят полный перебор всех вариантов. Среди точных методов решения ЗК выделим метод полного перебора (или метод «грубой силы»), метод направленного поиска с возвратами, метод фиктивных узлов и ветвей, метод ветвей и границ, метод ветвей и отсечений, метод динамического программирования.

Более предпочтительными являются эвристические методы, которые, являясь приближенными, сокращают полный перебор маршрутов и генерируют решения, близкие к оптимальному за приемлемое время. По способу формирования итогового маршрута эвристические алгоритмы можно разделить на два класса: конструктивные и итерационные эвристики.

Конструктивные эвристики (Tour Construction Heuristics) генерируют один уникальный маршрут для каждой решаемой задачи без последующего его улучшения. К данному классу относят алгоритм ближайшего соседа, жадный алгоритм, алгоритм эвристики вставок, алгоритм Кристофидеса.

Итерационные эвристики (Tourimprovement Heuristics) начинают работать с уже готовым маршрутом, построенным одним из конструктивных методов, последовательно улучшая его на каждой итерации. Среди итерационных методов можно выделить класс алгоритмов, именуемых метаэвристиками (Metaheuristics). Это достаточно общие итерационные методы, использующие рандомизацию, элементы самообучения, интенсификацию, диверсификацию и адаптацию поиска.



$\tau_{di}$ , представлены в таблице, причем полагаем, что  $\tau_{id} = \tau_{di}$ .

ТАБЛИЦА

Номер $i$ зоны патрулирования										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Время $\tau_i$										
1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0	3,25	3,5	3,75	4,0
Время $\tau_{di}$										
1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,8

Результаты вычисления оптимального решения, полученного с применением алгоритма ГА, имеют вид

$$\mathbf{x} = \text{col}(6,9); T_1 = 11.70, T_2 = 10.10, T_3 = 12.55;$$

$$T_{\max} = 12.55.$$

Отвечающее найденному решению распределение зон патрулирования иллюстрирует рис. 2, где цифры в скобках обозначают номер БПЛА.

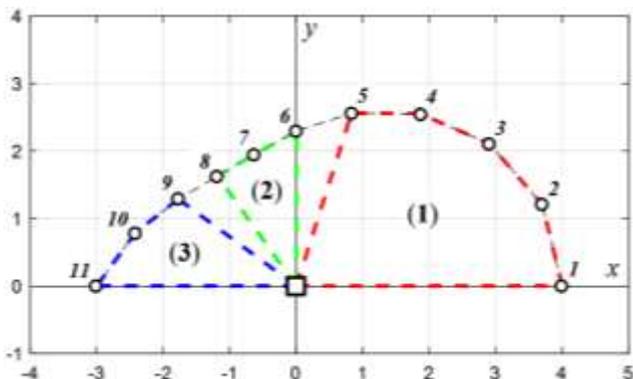


Рис. 2. Оптимальное распределение зон патрулирования

Для сравнения приведем другое решение:

$$\mathbf{x} = \text{col}(5,7); T_1 = 9.30, T_2 = 6.55, T_3 = 18.80;$$

$$T_{\max} = 18.80.$$

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложен новый метод планирования маршрутов полета группы БПЛА в задачах патрулирования территорий большой протяженности. Предполагается, что патрулируемая территория имеет вытянутую форму, она разбита на цепочку смежных зон патрулирования. Маршрут полета отдельного беспилотника проходит через смежные зоны. Задача распределения зон по маршрутам полета в группе БПЛА является множественной задачей коммивояжера MTSP, которая сводится к задаче ЦЛП. Для ее решения предлагается использовать метод ГА. Вычислительные эксперименты подтверждают эффективность предложенных алгоритмических решений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Оптимальная маршрутизация полетов БПЛА при групповом патрулировании территорий // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2023. Iss. 34. P. 49–55.

[2] Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б., Нгуен Т.К., Фам К.Ф. Планирование маршрутов полета БПЛА в задачах группового патрулирования протяженных территорий // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2023, т. 24, № 7, с. 374–381.

[3] Садыков М.Ф., Горячев М.П. Система воздушного патрулирования и управления транспортными потоками // *Вестник НЦ БЖД*. 2017. № 1 (31). С. 59–65.

[4] Manyam S.G., Rasmussen S., Casbeer D.W., Kalyanam K., Manickam S. Multi-UAV Routing for Persistent Intelligence Surveillance & Reconnaissance Missions // *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2017. P. 573–580.

[5] Liu Y., Zhong Liu Z., Shi J., Wu G., Chen C. Optimization of Base Location and Patrol Routes for Unmanned Aerial Vehicles in Border Intelligence, Surveillance and Reconnaissance // *Journal of Advanced Transportation*. 2019. Vol. 2019. 13 p.

[6] Kappel K.S., Cabreira T.M., Marins J.L., de Brisolará L.B., Ferreira P.R. Strategies for Patrolling Missions with Multiple UAVs // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020. Vol. 99. P. 499–515.

[7] Вилков В.Б., Горшкова Е.Е., Черных А.К. Решение задачи нахождения оптимального маршрута патрулирования действующих лесных пожаров в заданном районе // *Вестник СПб ун-та ГПС МЧС России*, 2021, № 3. С. 90–98.

[8] Chen Y., Shu Y., Hu M., Zhao X. Multi-UAV Cooperative Path Planning with Monitoring Privacy Preservation // *Applied Sciences*. 2022. 12(23). - P. 1–16.

[9] Иванов С.В. Методика построения субоптимальных маршрутов для группы беспилотных летательных аппаратов на основе биоинспирированных алгоритмов при наличии препятствий // *Системы управления, связи и безопасности*. 2022. № 2. - С. 1–23.

[10] Bektas T. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures // *Omega*. 2006. Vol. 34, No. 3. P. 209–219.

[11] The Traveling Salesman Problem and its Variations. In: *Combinatorial Optimization / Algorithms and Combinatorics*. Vol. 12. Ed. G. Gutin & A.P. Punnen. Springer US. 2007. 830 p.

[12] Oberlin P., Rathinam S., Darbha S. Today's Traveling Salesman Problem // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2010. Vol. 17, No. 4. P. 70–77.

[13] Matai R., Singh S.P., Mittal M.L. Traveling Salesman Problem: An Over-view of Applications, Formulations, and Solution Approaches / *Traveling Salesman Problem, Theory and Applications*. 2010. P. 1–24.

[14] Traveling salesman problem, theory and applications. Ed. D. Davendra. Intech Open, 2010. 338 p.

[15] Курейчик В.М., Лагунова Ю.А. Задачи о коммивояжере. Обзор и методы решения. Palmarium Academic Publishing, 2019. 60 с.

[16] Cheikhrouhou O., Khoufi I. A comprehensive survey on the Multiple Traveling Salesman Problem: Applications, approaches and taxonomy // *Comput. Sci. Rev.* 2021. Vol. 40, 100369. 76 p.

[17] Zhang T., Gruver W.A., Smith M.H. Team scheduling by genetic search // *In Proceedings of the second international conference on intelligent processing and manufacturing of materials*. 1999. Vol. 2. P. 839–844.

[18] Carter A.E., Ragsdale C.T. A new approach to solving the multiple traveling salesperson problem using genetic algorithms // *European journal of operational research*. 2006. Vol. 175, No. 1. P. 246–257.

[19] Kiraly A., Abonyi J. Optimization of MTSP by a Novel Representation Based Genetic Algorithm. In: Köppen M., Schaefer G., Abraham A. (eds) *Intelligent Computational Optimization in Engineering. Studies in Computational Intelligence*, 2011. Vol. 366. Berlin: Springer. P. 241–269.

[20] Sedighpour M., Yousefikhoshbakhht M., Mahmoodi D.N. An Effective Genetic Algorithm for Solving the MTSP // *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. 2012. 8. P. 73–79.

[21] Bolaños R.I., Toro O.E.M., Mauricio G.E. A population-based algorithm for the MTSP // *Internat. Journal of Industrial Engineering Computations*. 2016. 7. P. 245–256.

[22] Singh D.R., Singh M.K., Singh T., Prasad R. Genetic Algorithm for Solving MTSP using a New Crossover and Population Generation // *Computación y Sistemas*. 2018. Vol. 22, No. 2. P. 491–503.

[23] Miller C.E., Tucker A.W., Zemlin R.A. Integer programming formulations and traveling salesman problems // *Journal of the Assoc. Comput. Mach.* 1960. Vol. 7. P. 326–329.

[24] Campuzano G., Obreque C., Aguayo M.M. Accelerating the Miller–Tucker–Zemlin model for the asymmetric traveling salesman problem // *Expert Systems with Applications*. 2020. Vol. 148. 113229.