

А. Б. Филимонов<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, проф., filimon\_ab@mail.ru,  
Н. Б. Филимонов<sup>3,4</sup>, д-р техн. наук, проф., nbfilimonov@mail.ru,  
Т. К. Нгуен<sup>1</sup>, аспирант, congvietaim@mail.ru,  
К. Ф. Фам<sup>4</sup>, студент, hvkts1421996@gmail.com,

<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

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

*В настоящее время одной из перспективных сфер совместного использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является групповое воздушное патрулирование больших территорий. Организация такого патрулирования предполагает решение задачи планирования маршрутов полета группы БПЛА. В работе рассматривается задача оптимального планирования маршрутов полета отдельных БПЛА при групповом патрулировании территорий большой протяженности. Примером таких территорий могут служить территориальные воды или узкие приграничные участки какого-либо государства. Предполагается, что патрулируемая территория имеет вытянутую форму и разбита на цепочку смежных зон патрулирования, предписанных отдельным БПЛА. Маршрут полета беспилотника проходит через смежные зоны. Полетное задание, выполняемое периодически каждым беспилотником, состоит в его перемещении в заданную полетную зону, сборе оперативных данных и передаче этих данных на пункт (центр, станцию) управления. Оптимизационный аспект планирования маршрутов полета БПЛА состоит в том, чтобы свести к минимуму максимальные сроки выполнения полетных заданий. Рассматриваемая задача группового патрулирования сводится к множественной задаче коммивояжера — одной из классических труднорешаемых задач комбинаторной оптимизации. Дан краткий анализ современных методов решения множественной задачи коммивояжера. В связи с отсутствием эффективных точных методов решения данной задачи естественно использование приближенных эвристических и метаэвристических методов, ориентированных на решение именно NP-трудных задач оптимизации, сокращающих полный перебор и дающих решение, близкое к точному. Рассматриваемая в работе множественная задача коммивояжера сводится к задаче целочисленного линейного программирования, для решения которой предложен генетический алгоритм, реализованный в среде MATLAB на основе математического пакета Global Optimization Toolbox. Рассмотрен иллюстративный пример патрулирования тремя БПЛА протяженной территории с 11 смежными зонами. Вычислительные эксперименты подтверждают эффективность предложенных в работе алгоритмических решений.*

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

### Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) (беспилотники, дроны; англ. Unmanned Aerial Vehicles, UAV) приобрели огромную популярность в различных сферах человеческой деятельности благодаря их очевидным преимуществам — большой экономичности, простоте в эксплуатации, малой стоимости и отсутствию людских ресурсов [1].

В настоящее время наблюдается стремительное расширение сфер применения БПЛА: диагностика нефте- или газопроводов, выявление очагов лесных пожаров, контроль за паводковыми водами в регионах, экологический мониторинг мегаполисов, мониторинг линий электропередач, поисковые и спасательные операции в чрезвычайных ситуациях, контроль за соблюдением порядка на массовых мероприятиях,

картографирование местности, мониторинг дорожно-транспортной ситуации и многое другое.

Одним из важных и наиболее трендовых направлений использования БПЛА как в военных, так и в гражданских целях является охранно-мониторинговая деятельность в виде воздушного **патрулирования** (от франц. patrouiller — ходить дозором) протяженных (возможно труднодоступных) объектов путем постоянного регулярного, периодического их облета, сбора и оперативной передачи информации (фото-, видео- и тепловизионных изображений) 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. *recognosco* — "осматриваю, обследую"), т. е. разведки, наблюдения, визуального изучения местности, где организуется оборона противника в районе предстоящих боевых действий.

Выполнение задач воздушного патрулирования наилучшим образом обеспечивается путем использования группы БПЛА, которая может осуществлять "параллельное" и независимое решение требуемых задач в различных областях (зонах) патрулируемого объекта. Групповое применение автономно функционирующих, но согласованно управляемых беспилотников позволяет расширить возможности и существенно повысить производительность процесса патрулирования. Отметим, что под групповым управлением БПЛА понимается управление каждым беспилотником, обеспечивающее достижение общей групповой цели патрулирования [1].

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 результат авторов [3], дается постановка и приводится решение задачи планирования оптимальных маршрутов полета БПЛА при групповом воздушном патрулировании территорий большой протяженности.

### **Постановка задачи оптимальной маршрутизации полета группы БПЛА как множественной задачи коммивояжера**

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, работы [4–12]). Весьма популярный подход к постановке и решению задачи оптимальной маршрутизации БПЛА при групповом патрулировании заключается в ее формализации как **множе-**

**ственной задачи коммивояжера** (англ. *Multiple Traveling Salesman Problem, MTSP*), именуемой также задачей о *t бродячих торговцах*, в которой допускается более одного *коммивояжера* и которая является обобщением **задачи коммивояжера с одним коммивояжером** (TSP). К последней, кстати, сводится задача маршрутизации патрулирования территории одиночным беспилотником. Современное состояние TSP и MTSP отражают публикации [12–20].

Рассмотрим сценарий постоянного воздушного мониторинга заданной территории группой БПЛА. Предполагается, что все доступные БПЛА однотипны. Полетное задание для каждого беспилотника 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 (тура) в зоны патрулирования.

Считаем, 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, непосредственно 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 ( $i = \overline{1, N}$ );  $\tau_{di}$  — время полета беспилотника от депо  $d$  до  $i$ -й зоны;  $\tau_{id}$  — время его полета от  $i$ -й зоны до депо  $d$ ;  $T_j$  — продолжительность выполнения  $j$ -го задания ( $j = \overline{1, m}$ ).

Разбиение патрулируемой территории на  $T$  зон иллюстрирует рис. 1.

Конфигурационной моделью рассматриваемой задачи может служить граф

$$G = (V, E),$$

где  $V = P \cup \{d\}$  — множество вершин,  $E$  — множество ребер, представляющих возможные варианты перемещения БПЛА. Отметим, что

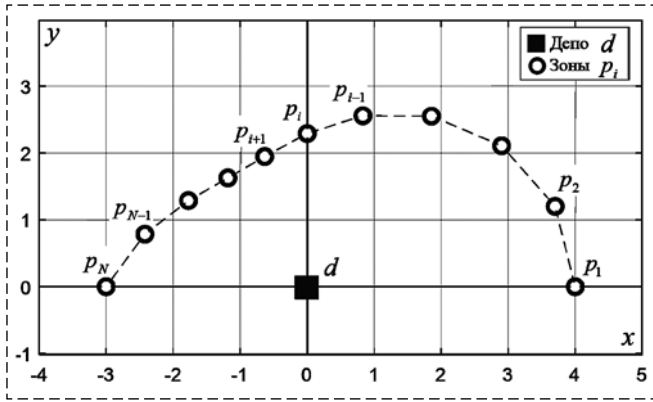


Рис. 1. Разбиение территории на зоны патрулирования  
 Fig. 1. Splitting of the territory into patrol zones

подграф  $G[P]$ , образованный множеством вершин  $P$ , имеет "цепочечную" структуру.

Полагаем, что  $Task_1, Task_2, \dots, Task_m$  — полетные задания, а  $N_i$  — число зон, предписанных  $i$ -му заданию  $Task_i$ , так что

$$N_i \geq 1, \quad i = \overline{1, m}; \quad (1)$$

$$N = N_1 + N_2 + \dots + N_m, \quad (2)$$

причем считаем, что задание  $Task_1$  охватывает первые  $N_1$  зон, задание  $Task_2$  — последующие  $N_2$  зон и т. д.

Введем индексы

$$\begin{aligned} I_1 &= 1, I_2 = I_1 + N_1, \dots, \\ \dots, I_m &= I_{m-1} + N_{m-1}, I_{m+1} = N. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, продолжительность выполнения  $i$ -го задания  $Task_i$  определяется равенством

$$T_i = \tau_{di} + \tau_{id} + \sum_{I_i \leq j < I_{i+1}} \tau_j, \quad i = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Введем в качестве критерия эффективности плана полетного задания максимальное значение времени выполнения всех заданий:

$$T_{\max} = \max_{1 \leq j \leq m} T_j. \quad (5)$$

Тогда оптимизационный аспект рассматриваемой задачи планирования маршрутов группового патрулирования состоит в минимизации данного критерия, т. е. минимизации максимальных сроков выполнения заданий:

$$T_{\max} \rightarrow \min. \quad (6)$$

Таким образом, рассматриваемая задача оптимальной маршрутизации полета группы БПЛА сформулирована как MTSP вида (5), (6), (1)—(4).

TSP является ключевой задачей транспортной логистики, занимает особое место в комбинаторной оптимизации и уже более 90 лет продолжает привлекать внимание исследователей [21]. Данная задача является одной из самых сложных, труднорешаемых оптимизационных задач, связанных с отысканием наиболее экономичного циклического обхода (маршрута коммивояжера) для заданного конечного множества "клиентов". Для решения задачи TSP до сих пор не найдено быстрых полиномиальных алгоритмов. Еще в 70-х годах прошлого столетия было доказано, что TSP является NP-полной (Nondeterministic Polynomial) трансвычислительной задачей [22, 23]. Так, например, даже при относительно небольшом числе пунктов (>66) в маршруте обхода данная задача не может быть решена методом перебора вариантов никакими теоретически мыслимыми компьютерами за время, меньшее нескольких миллиардов лет.

Существует множество различных методов решения TSP и MTSP. При всем многообразии все эти методы, как правило, относятся к одной из двух категорий: точные и эвристические методы.

Точные методы выполняют полный перебор всех вариантов. Иногда они позволяют найти решение быстро, но в основном поиск происходит по всем маршрутам (пунктам). Среди точных методов решения TSP выделим метод полного перебора (или метод "грубой силы", англ. brute force), метод направленного поиска с возвратами, метод фиктивных узлов и ветвей, метод ветвей и границ, метод ветвей и отсечений, метод динамического программирования.

Поскольку MTSP имеют непомерно высокую вычислительную сложность, то точные методы, как правило, не могут применяться для задач большой размерности. По этой причине более предпочтительными являются приближенные методы, которые относятся к эвристическим методам и являются довольно эффективными, поскольку сокращают полный перебор маршрутов. Они генерируют решения, близкие к оптимальному, но за приемлемое по сравнению с точными методами время [24—27]. Во многих из них находят не эффективный, а базовый маршрут, т. е. приближенное решение, которое в дальнейшем улучшается.

По способу формирования итогового маршрута эвристические алгоритмы можно разде-

лить 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, эвристики вставок, алгоритм Кристофидеса. С помощью данных эвристик последовательно строят допустимое решение, добавляя в него вершины, пока полный маршрут не будет сформирован. Как правило, с помощью данных эвристик получают решения, уступающие оптимальному около 10...15 %.

**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 отдельный класс алгоритмов, который носит название *метаэвристик* (Metaheuristics). Это достаточно общие итерационные процедуры, использующие рандомизацию и элементы самообучения, интенсификацию и диверсификацию поиска, адаптивные механизмы управления, а также конструктивные эвристики и методы локального поиска. Здесь следует выделить, прежде всего, методы, вдохновленные природными явлениями и биоинспирированные методы, которые решают задачу оптимизации методом проб и ошибок без строгого математического обоснования. Метаэвристики принято делить на траекторные методы, когда каждой итерации соответствует одно допустимое решение, и на алгоритмы, которые работают сразу с популяцией решений.

К первой группе относят методы имитации отжига (Simulated Annealing), методы поиска с запретами (Tabu Search), поиска с чередующимися окрестностями (Variable Neighbourhood Search). Ко второй группе относят методы муравьиных колоний (Ant Colony Optimization), вероятностные жадные методы (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) и др. В данной группе метаэвристических методов для решения MTSP наибольшую популярность приобрели генетические алгоритмы (Genetic Algorithms, GA). Применение GA для решения MTSP впервые было предложено в работе [28] и получило развитие в работах [29–36]. При этом временная сложность GA представляется формулой:  $O(tMN^2)$ , где  $N$  — число зон патрулирования;  $M$  — численность популяции;  $t$  — число поколений.

Однако наиболее целесообразно использовать предложенный в 1960 г. Миллером, Такером и Землином метод сведения TSP к задаче целочисленного линейного программирования (ЦЛП) [37]. Данный метод, основанный на введении альтернативных условий устранения подмаршрутов (MTZ-inequality form), получил распространение на MTSP (см., например, работу [38]). В настоящей работе рассматриваемая MTSP оптимальной маршрутизации полета группы БПЛА также сводится к задаче ЦЛП.

### Сведение множественной задачи коммивояжера к задаче целочисленного линейного программирования

В качестве неизвестных выберем следующие переменные:

$$x_i = I_{i+1}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

где

$$n = m - 1. \quad (8)$$

Заметим, что данные переменные являются целочисленными:

$$x_i \in \mathbf{N}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{N} = \{1, 2, 3, \dots\}$  — множество натуральных чисел.

Исходя из смысла рассматриваемой задачи наложим ограничения на введенные переменные:

$$x_L \leq x_i \leq x_U, \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

где

$$x_L = 1, \quad x_U = N. \quad (11)$$

Согласно условиям (1) и (3) выполняются неравенства

$$x_1 < x_2 < \dots < x_n,$$

которые, с учетом целочисленности переменных (7), можно переписать в виде следующих нестрогих неравенств:

$$\left. \begin{aligned} -x_1 &\leq -2, \\ x_1 - x_2 &\leq -1, \\ \dots & \\ x_{n-1} - x_n &\leq -1. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$



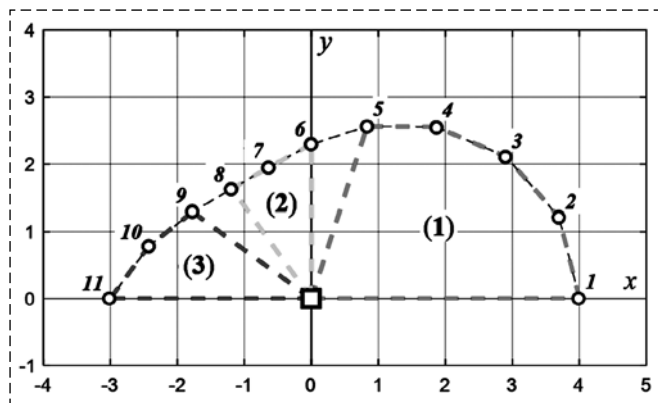


Рис. 2. Оптимальное распределение зон патрулирования  
Fig. 2. Optimal distribution of patrol zones

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

Для сравнения приведем другое решение:

$$x = \text{col}(5, 7); T_1 = 9,30, T_2 = 6,55, \\ T_3 = 18,80; T_{\max} = 18,80.$$

### 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 MTSP, которая сводится к задаче ЦЛП. Для ее решения предлагается использовать метод ГА. Вычислительные эксперименты подтверждают эффективность предложенных алгоритмических решений.

### Список литературы

1. Кузнецов Г. А., Кудрявцев И. В., Крылов Е. Д. Ретроспективный анализ, современное состояние и тенденции развития отечественных беспилотных летательных аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 9 (81). С. 1–22.
2. Sargolzaei A., Abbaspour A., Crane C. D. Control of Cooperative Unmanned Aerial Vehicles: Review of Applications, Challenges, and Algorithms // Optimization, Learning, and Control for Interdependent Complex Networks. Advances in Intelligent Systems and Computing / Amini M. (eds). 2020. Vol. 1123. Springer, Cham. P. 229–255.
3. 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.
4. Kinney G., Hill R., Moore J. Devising a quick-running heuristic for an unmanned aerial vehicle (UAV) routing system // Journal of Operational Research Society. 2004. Vol. 56. P. 776–786.

5. Ченцов А. Г. Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории. Москва-Ижевск: РХД, 2008. 238 с.

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

7. Manuam 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.

8. 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. Vol. 2019. P. 1–13.

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

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. Меламед И. И., Сергеев С. И., Сигал И. Х. Задача коммивояжера. I–III // Автоматика и телемеханика. 1989. № 9. С. 3–34; № 10. С.3–29; № 11. С. 3–26.

14. Bektas T. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures // Omega. 2006. Vol. 34, N. 3. P. 209–219.

15. 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.

16. Oberlin P., Rathinam S., Darbha S. Today's Traveling Salesman Problem // IEEE Robotics & Automation Magazine. IEEE. 2010. Vol. 17, N. 4. P. 70–77.

17. 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.

18. Traveling salesman problem, theory and applications / Ed. D. Davendra. Intech Open, 2010. 338 p.

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

20. Cheikhrouhou O., Khoufi I. A comprehensive survey on the Multiple Traveling Salesman Problem: Applications, approaches and taxonomy // Comput. Sci. Rev. 2021. Vol. 40, N. 100369. P. 76.

21. Discrete Optimization. The State of the Art / Ed. E. Boros, P. L. Hammer. Boston: Elsevier, 2005. 607 p.

22. Karp R. M. Reducibility among combinatorial problems. In Complexity of Computer Computations / Eds. R. E. Miller, J. W. Thatcher. Plenum Press, N. Y. and London: Springer, 1972. P. 85–103.

23. Garey M. R., Johnson D. S. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-completeness. Freeman, 1979. 338 p.

24. Blum C., Roli A. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison // ACM Computing Surveys. 2003. Vol. 35, N. 3. P. 268–308.

25. Kinney G., Hill R., Moore J. Devising a quick-running heuristic for an unmanned aerial vehicle routing system // Journal of Operational Research Society. 2004. Vol. 56. P. 776–786.

26. **Handbook of Metaheuristics** (Vol. 146 of International Series in Operations Research & Management Science). N. Y.: Springer, 2010. 648 p.
27. **Yousefikhoshbakht M.** Solving the Traveling Salesman Problem: A Modified Metaheuristic Algorithm // *Complexity*. Hindawi. 2021. Vol. 2021, February. P. 1–13.
28. **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.
29. **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, N. 1. P. 246–257.
30. **Singh A., Baghel A. S.** A new grouping genetic algorithm approach to the multiple traveling salesperson problem // *Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*. 2009. Vol. 13, N. 1. P. 95–101.
31. **Kiraly A., Abonyi J.** Optimization of MTSP by a Novel Representation Based Genetic Algorithm // *K@ppen M., Schaefer G., Abraham A.* (eds) *Intelligent Computational Optimization in Engineering*. Studies in Computational Intelligence, 2011. Vol. 366. Berlin: Springer. P. 241–269.
32. **Sedighpour M., Yousefikhoshbakht M., Mahmoodi D. N.** An Effective Genetic Algorithm for Solving the MTSP // *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. 2012. Vol. 8. P. 73–79.
33. **Yuan S., Skinner B., Huang S., Liu D.** A new crossover approach for solving the MTSP using genetic algorithms // *European Journal of Operational Research*. 2013. Vol. 228, N. 1. P. 72–82.
34. **Kaliaperumal R., Ramalingam A., Sripriya J.** A modified two part chromosome crossover for solving MTSP using genetic algorithms // *Proceedings of ICARCSET*. N. Y., 2015. P. 1–4.
35. **Bolaños R. I., Toro O. E. M., Mauricio G. E.** A population-based algorithm for the MTSP // *Internat. Journal of Industrial Engineering Computations*. 2016. Vol. 7. P. 245–256.
36. **Singh D. R., Singh M. K., Singh T., Prasad R.** Genetic Algorithm for Solving MTSP using a New Crossover and Population Generation // *Computaci@n y Sistemas*. 2018. Vol. 22, N. 2. P. 491–503.
37. **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.
38. **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. P. 113229.
39. **John K. K.** *Integer programming: theory and practice*. N. Y.: CRC Press, 2006. 336 p.

## Planning of UAV Flight Routes in the Problems of Group Patrolling of the Extended Territories

**A. B. Filimonov**<sup>1,2</sup>, filimon\_ab@mail.ru, **N. B. Filimonov**<sup>3,4</sup>, nbfilimonov@mail.ru,  
**T. K. Nguyen**<sup>1</sup>, congvietnam@mail.ru, **Q. P. Pham**<sup>4</sup>, hvkqtqs1421996@gmail.com,

<sup>1</sup> MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation,

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation,

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation,

<sup>4</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

*Corresponding author: Filimonov Nikolay B., Professor, Dr. Sc. Tech. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation*

*Accepted on March 25, 2023*

### Abstract

*Currently one of the promising areas of joint use of unmanned aerial vehicles (UAVs) is group air patrolling of large territories. Here the organization of patrolling assumes the solving the planning problem of routes flight of UAV group. The paper considers the problem of optimal planning of flight routes of the same type of UAVs during group patrolling of large territories. The territorial waters or narrow border areas of any State may serve as an example of such territories. It is suggested that the patrolled area has an elongated shape and is divided into a chain of adjacent patrol zones prescribed by a separate UAV. The drone's flight route passes through adjacent zones. The flight task performed periodically by each drone consists in moving it to a given flight zone, collecting operational data and transmitting this data to a control point (center, station). The optimization aspect of UAV flight route planning is to minimize the maximum time required to complete flight tasks. The considered problem of group patrolling reduced to the multiple traveling salesman problem — one of the classic intractable combinatorial optimization problems. A brief analysis of modern methods for solving the multiple traveling salesman problem is given. Due to the lack of effective exact methods for solving this problem, it is natural to use approximate heuristic and metaheuristic methods focused on solving NP-hard optimization problems, reducing the full search and giving a solution close to the exact one. The multiple traveling salesman problem considered in this paper is reduced to the problem of integer linear programming, for the solution of which a genetic algorithm implemented in MATLAB based on the mathematical package Global Optimization Toolbox is proposed. An illustrative example of patrolling by three UAVs of an extended territory with 11 adjacent zones is considered. Computational experiments confirm the effectiveness of the algorithmic solutions proposed in the work.*

**Keywords:** UAV group, patrolling, flight routes planning, integer linear programming, genetic algorithm, MATLAB programming environment

*For citation:*

**Filimonov A. B., Filimonov N. B., Nguyen T. K., Pham Q. P.** Planning of UAV Flight Routes in the Problems of Group Patrolling of Extended Territories, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 7, pp. 374–381.

DOI: 10.17587/mau.24.374-381

## References

1. **Kuznetsov G. A., Kudryavtsev I. V., Krylov E. D.** Retrospective analysis, current state and development trends of domestic unmanned aerial vehicles, *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, no.9 (81), pp. 1–22 (in Russian).
2. **Sargolzaei A., Abbaspour A., Crane C. D.** Control of Cooperative Unmanned Aerial Vehicles: Review of Applications, Challenges, and Algorithms, *Optimization, Learning, and Control for Interdependent Complex Networks. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Amini M. (eds), 2020, vol. 1123, Springer, Cham, pp. 229–255.
3. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Optimal Routing by UAV Flights in Group Patrolling of the Territory, *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2023, iss. 34, pp. 49–55 (in Russian).
4. **Kinney G., Hill R., Moore J.** Devising a quick-running heuristic for an unmanned aerial vehicle (UAV) routing system, *Journal of Operational Research Society*, 2004, vol. 56, pp. 776–786.
5. **Chentsov A. G.** Extreme problems of routing and assignment distribution: questions of theory, Moscow-Izhevsk, RCD, 2008, 238 p. (in Russian)
6. **Sadykov M. F., Goryachev M. P.** The system of air patrol and traffic flow management, *Bulletin of the National Railways*, 2017, no. 1 (31), pp. 59–65 (in Russian).
7. **Manyam S. G., Rasmussen S., Casbeer D. W., Kalyanam K., Manickam S.** Multi-UAV Routing for Persistent Intelligence Surveillance & Reconnaissance Missions, *2017 Internat. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2017, pp. 573–580.
8. **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*, vol. 2019, pp. 1–13.
9. **Kappel K. S., Cabreira T. M., Marins J. L., de Brisolar Lara L. B., Ferreira P. R.** Strategies for Patrolling Missions with Multiple UAVs, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2020, vol. 99, pp. 499–515.
10. **Vilkov V. B., Gorshkova E. E., Chernykh A. K.** The solution of the problem of finding the optimal route for patrolling existing forest fires in a given area, *Bulletin of the St Petersburg University GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia*, 2021, no. 3, pp. 90–98 (in Russian).
11. **Chen Y., Shu Y., Hu M., Zhao X.** Multi-UAV Cooperative Path Planning with Monitoring Privacy Preservation, *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 23, pp. 1–16.
12. **Ivanov S. V.** Methodology for constructing suboptimal routes for a group of unmanned aerial vehicles based on bio-inspired algorithms in the presence of obstacles, *Control systems, communications and security*, 2022, no. 2, pp. 1–23 (in Russian).
13. **Melamed I. I., Sergeev S. I., Sigal I. H.** The traveling salesman's task. I-III, *Automation and Telemekhanics*, 1989, no. 9, pp. 3–34; no. 10, pp. 3–29; no. 11, pp. 3–26 (in Russian).
14. **Bektas T.** The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures, *Omega*, 2006, vol. 34, no. 3, pp. 209–219.
15. **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.
16. **Oberlin P., Rathinam S., Darbha S.** Today's Traveling Salesman Problem, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, IEEE, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 70–77.
17. **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, pp. 1–24.
18. **Davendra D. ed.** Traveling salesman problem, theory and applications, Intech Open, 2010, 338 p.
19. **Kureychik V. M., Lagunova Yu. A.** Problems about a traveling salesman. Overview and solution methods, Palmarium Academic Publishing, 2019, 60 p. (in Russian).
20. **Cheikhrouhou O., Khoufi I.** A comprehensive survey on the Multiple Traveling Salesman Problem: Applications, approaches and taxonomy, *Comput. Sci. Rev.*, 2021, vol. 40, no. 100369, pp. 76.
21. **Boros E., Hammer P. L. ed.** Discrete Optimization. The State of the Art, Boston, Elsevier, 2005, 607 p.
22. **Karp R. M.** Reducibility among combinatorial problems, *Complexity of Computer Computations*, R. E. Miller, J. W. Thatcher Eds., Plenum Press, N. Y. and London, Springer, 1972, pp. 85–103.
23. **Garey M. R., Johnson D. S.** Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-completeness, Freeman, 1979, 338 p.
24. **Blum C., Roli A.** Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison, *ACM Computing Surveys*, 2003, vol. 35, no. 3, pp. 268–308.
25. **Kinney G., Hill R., Moore J.** Devising a quick-running heuristic for an unmanned aerial vehicle routing system, *Journal of Operational Research Society*, 2004, vol. 56, pp. 776–786.
26. **Handbook of Metaheuristics** (Vol. 146 of International Series in Operations Research & Management Science), N. Y., Springer, 2010, 648 p.
27. **Yousefikhoshbakht M.** Solving the Traveling Salesman Problem: A Modified Metaheuristic Algorithm, *Complexity. Hindawi*, 2021, vol. 2021, February, pp. 1–13.
28. **Zhang T., Gruver W. A., Smith M. H.** Team scheduling by genetic search, *Proceedings of the second international conference on intelligent processing and manufacturing of materials*, 1999, vol. 2, pp. 839–844.
29. **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, pp. 246–257.
30. **Singh A., Baghel A. S.** A new grouping genetic algorithm approach to the multiple traveling salesperson problem, *Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, 2009, vol. 13, no. 1, pp. 95–101.
31. **Kiraly A., Abonyi J.** Optimization of MTSP by a Novel Representation Based Genetic Algorithm, *Intelligent Computational Optimization in Engineering. Studies in Computational Intelligence*, K@ppen M., Schaefer G., Abraham A. (eds), 2011, vol. 366, Berlin, Springer, pp. 241–269.
32. **Sedighpour M., Yousefikhoshbakht M., Mahmoodi D. N.** An Effective Genetic Algorithm for Solving the MTSP, *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 2012, vol. 8, pp. 73–79.
33. **Yuan S., Skinner B., Huang S., Liu D.** A new crossover approach for solving the MTSP using genetic algorithms, *European Journal of Operational Research*, 2013, vol. 228, no. 1, pp. 72–82.
34. **Kaliaperumal R., Ramalingam A., Sripriya J.** A modified two part chromosome crossover for solving MTSP using genetic algorithms, *Proceedings of ICARCSET*. N. Y., 2015, pp. 1–4.
35. **Bolaños R. I., Toro O. E. M., Mauricio G. E.** A population-based algorithm for the MTSP, *Internat. Journal of Industrial Engineering Computations*, 2016, vol. 7, pp. 245–256.
36. **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, pp. 491–503.
37. **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, pp. 326–329.
38. **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, p. 113229.
39. **John K. K.** Integer programming: theory and practice, N. Y., CRC Press, 2006, 336 p.