

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2023-34-49-55>

ОПТИМАЛЬНАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ ПОЛЕТОВ БПЛА ПРИ ГРУППОВОМ ПАТРУЛИРОВАНИИ ТЕРРИТОРИИ

Филимонов А.Б.¹, Филимонов Н.Б.²

¹*МИРЭА – Российский технологический университет; Московский авиационный институт (НИУ), Москва, Россия;*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова; Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*

Ключевые слова: группа БПЛА, патрулирование, планирование маршрутов полета, комбинаторная оптимизация, целочисленное линейное программирование.

Аннотация. Рассматривается задача планирования оптимальных маршрутов полета БПЛА при групповом патрулировании больших протяженных территорий. Территория разбивается на зоны патрулирования, предписанные отдельным БПЛА. Полетное задание для каждого БПЛА состоит в его перемещении в заданную полетную зону, сбор оперативных данных и передачу этих данных на пункт (станцию) управления. Оптимизационный аспект планирования маршрутов состоит в минимизации максимального срока выполнения заданий. Данная задача формализуется как задача целочисленного линейного программирования.

OPTIMAL ROUTING BY UAV FLIGHTS IN GROUP PATROLLING OF THE TERRITORY

Filimonov A.B.¹, Filimonov N.B.²

¹*MIREA – Russian Technological University; Moscow Aviation Institute (NRU), Moscow, Russia;*

²*Lomonosov Moscow State University; Trapeznikov Institute of Control Problems of RAS, Moscow, Russia*

Keywords: UAV group, patrolling, flight route planning, combinatorial optimization, integer linear programming.

Abstract. The problem of planning of optimal UAV flights routes for group patrolling of large extended territories is considered. The territory is divided into patrol zones prescribed for individual UAVs. The flight task for each UAV consists in its moving to a given flight zone, collecting operational data and transmitting these data to the point (station) of control. The optimization aspect of routes planning consists in minimization of maximum deadline for tasks' realization. This problem is formalized as an integer linear programming problem.

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. 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 использований БПЛА как в военных, так и в гражданских целях является охранно-мониторинговая деятельность в виде воздушного **патрулирования** (от франц. *patrouiller* – ходить дозором) протяженных 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. *reconosco* – «осматриваю, обследую»), т.е. разведки, визуального изучения расположения и местности обороны противника в районе предстоящих боевых действий.

Выполнение требований воздушного патрулирования наилучшим образом обеспечивается привлечением группы БПЛА, посредством которой возможно 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. Здесь под групповым управлением БПЛА понимается управление каждым беспилотником, обеспечивающим достижение общей групповой цели [1].

Впервые для патрулирования границ БПЛА начали применять 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.

Алгоритмические особенности задачи группового патрулирования

Воздушное патрулирование предполагает решение задачи планирования маршрута (англ. *Vehicle Routing Problem, VRP*) полета БПЛА. Классическая задача маршрутизации при одиночном или групповом патрулировании беспилотниками некоторой территории, заданной планом местности, заключается в построении для беспилотников замкнутых маршрутов облета данной территории, проходящих через все полетные зоны патрулирования и оптимальных по некоторому критерию (см., например, [2, 3]).

Весьма популярный поход к постановке и решению данной задачи маршрутизации заключается в сведении ее к **задаче коммивояжера** (англ. *Traveling Salesman Problem, TSP*), являющейся ключевой задачей транспортной логистики и одной из классических задач комбинаторной

оптимизации. Разумеется, задачу маршрутизации БПЛА при групповом патрулировании правомерно формулировать и решать как *множественную задачу коммивояжера* (англ. Multiple Traveling Salesman Problem, MTSP), являющейся обобщением классической задачи коммивояжера (TSP), в которой допускается более одного коммивояжера. Современное состояние проблемы MTSP отражают публикации [4-8].

MTSP – одна из самых сложных задач комбинаторной оптимизации. Еще в 70-х годах прошлого столетия было доказано, что задача коммивояжера (TSP) является NP-трудной задачей, имеющей непомерно высокую вычислительную сложность [9].

При всем разнообразии выделяют следующие методы решения MTSP:

- *точные методы*: полный перебор (метод «грубой силы»), направленный поиск с возвратами, метод ветвей и границ;
- *приближенные и эвристические методы*, сокращающие полный перебор: жадные алгоритмы; методы шнурка, ближайшего соседа, имитации отжига, минимального остовного дерева; генетические алгоритмы;
- *метаэвристические методы*, вдохновленные природными явлениями, которые решают задачу оптимизации методом проб и ошибок: метод муравьиных колоний, метод «фейерверков», методы «роевого» интеллекта и др.

Единственным методом, в принципе, гарантирующим нахождение точного решения, является метод полного перебора. Однако его практическое использование возможно лишь при малой размерности исходных данных. В связи с отсутствием эффективных точных методов решения MTSP становится необходимым использование самых мощных, «навароченных», эвристических и метаэвристических методов, ориентированных на решение именно NP-трудных задач оптимизации, сокращающих полный перебор и дающих решение, близкое к точному.

В настоящей работе дается постановка и обсуждается решение *задачи планирования оптимальных маршрутов полета БПЛА при групповом патрулировании больших протяженных территорий*.

Постановка задачи оптимальной маршрутизации полета группы БПЛА

Будем рассматривать сценарий постоянного воздушного мониторинга заданной территории группой БПЛА (дронов). Предполагается, что все доступные беспилотники однотипны, причем полетное задание для каждого из них выполняется периодически и состоит в перемещении в заданную полетную зону, сбор оперативных данных и передачу этих данных на станцию (пункт, центр) управления (далее – депо).

Нас интересуют два показателя процесса патрулирования: время задержки данных (время доставки) до станции управления и частота повторного рейса (тура) в зоны патрулирования.

Считаем, что патрулируемая территория имеет вытянутую форму, и она разбивается на цепочку смежных зон патрулирования. Прототипом такой

территории может служить узкая приграничная территория и территориальные воды государства.

Дадим математическую формализацию решаемой задачи. Для этого введем следующие обозначения:

- N – число зон патрулирования;
- m – число дронов, 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 дронов (далее – депо);
- τ_i – время патрулирования i -й зоны ($i = 1 : N$);
- τ_{di} – время полета дрона от депо d до i -й зоны;
- τ_{id} – время полета дрона от i -й зоны до депо d ;
- T_j – продолжительность выполнения j -го задания ($j = 1 : m$).

Разбиение патрулируемой территории на $N = 11$ зон иллюстрирует рисунке 1.

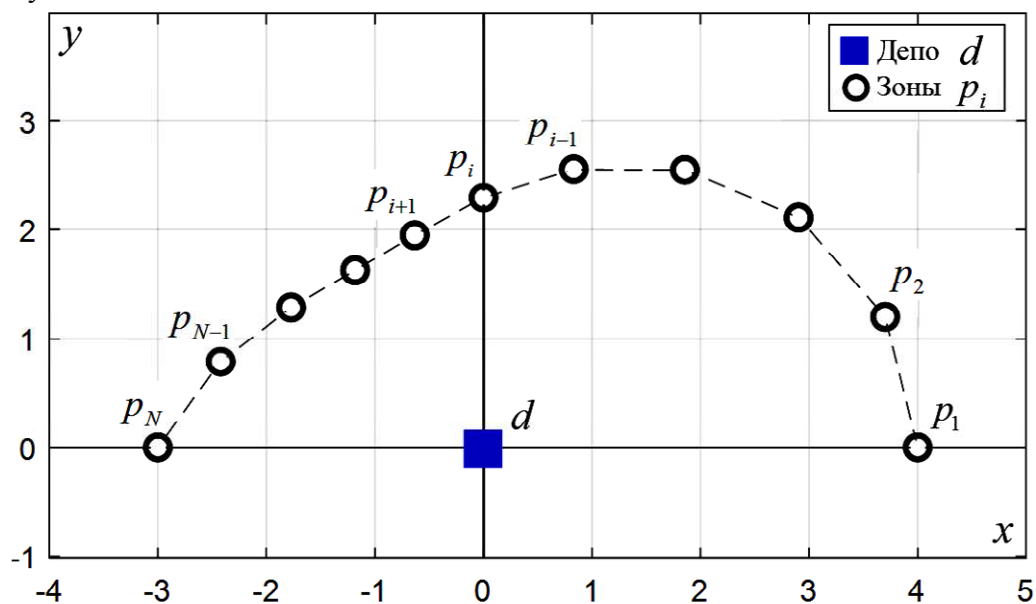


Рис. 1. Разбиение патрулируемой территории на зоны

Конфигурационной моделью решаемой задачи может служить граф

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

где $V = P \cup \{d\}$ – множество вершин, а E – множество ребер, представляющих возможные варианты перемещения дронов. При этом подграф $G[P]$, образованный множеством вершин P , имеет «цепочечную» структуру.

Далее $Task_1, Task_2, \dots, Task_m$ – полетные задания для дронов, N_i – число зон, предписанных i -му заданию, так что

$$N_i \geq 1 \quad (i = 1:m) \quad (1)$$

и

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

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

Введем индексы

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

Учтем, что полетное задание состоит в перемещении дрона в заданную зону, сбор оперативных данных и передачу этих данных на пункт управления. Таким образом,

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

Введем критерий эффективности плана – максимальное значение времени выполнения заданий:

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

Решаемая задача состоит в минимизации данного критерия:

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

Сведение задачи оптимальной маршрутизации к задаче целочисленного линейного программирования

В качестве неизвестных выберем переменные

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

где

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

Данные переменные являются целочисленными:

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

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

Исходя из смысла решаемой задачи, наложим ограничения на введенные переменные

$$x_L \leq x_i \leq x_U \quad (i = 1:n). \quad (10)$$

Здесь

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

Согласно (1) и (3) выполняются неравенства

$$x_1 < x_2 < \dots < x_n.$$

Данные неравенства с учетом целочисленности переменных (7) можно переписать в виде нестрогих неравенств:

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

Введем вектор неизвестных переменных – n -мерный вектор-столбец
 $\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$. (13)

Неравенства (12) можно записать в векторно-матричной форме
 $\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$. (14)

где \mathbf{A} – ленточная двухдиагональная $n \times n$ -матрица, а \mathbf{b} – n -мерный вектор-столбец:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & & & & & \\ 1 & -1 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & 1 & -1 \\ & & & & & & \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} -2 \\ -1 \\ \vdots \\ -1 \end{bmatrix}.$$

Критерий (5) является n -мерной функцией
 $T_{\max} = F(\mathbf{x})$, (15)

определяемой соотношениями (1)-(5), (7)-(9), (13).

Оптимизационная задача (15), (6) с учетом ограничений (9)-(11), (14) является задачей целочисленного линейного программирования [10, 11]. Для ее решения можно воспользоваться генетическим алгоритмом (англ. GA).

Впервые применение GA для решения MTSP было предложено в работе [12] и ее развитие на современном этапе получило в работах [13–17]. Необходимое программное средство для решения поставленной оптимизационной задачи предоставляет математический пакет прикладных программ MATLAB, в котором генетический алгоритм реализован в виде функции ga библиотеки Global Optimization Toolbox.

Заключение

Изложен новый метод планирования маршрутов полета группы БПЛА в задачах патрулирования большой протяженной территории. Предполагается, что патрулируемая территория имеет вытянутую форму, причем она разбивается на цепочку смежных зон патрулирования. Маршрут полета отдельного беспилотника проходит через смежные зоны. Задача распределения зон по маршрутам полета в группе БПЛА является задачей комбинаторной оптимизации. Для ее решения предлагается использовать генетический алгоритм. Вычислительные эксперименты подтверждают эффективность предложенных алгоритмических решений.

Список литературы / References

1. Sargolzaei A., Abbaspour A., Crane C.D. Control of Cooperative UAV: Review of Applications, Challenges, and Algorithms. In: Amini M. (eds) Optimization, Learning, and Control for Interdependent Complex Networks // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020, vol. 1123. – Springer, Cham. – P. 229-255.

2. 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, pp. 573-580.
3. Liu Y., Zhong Liu Z., Shi J., Wu G., Chen C. Optimization of Base Location and Patrol Routes for UAV in Border Intelligence, Surveillance and Reconnaissance // Journal of Advanced Transportation. – Vol. 2019. – 13 p.
4. The Traeling Salesman Problem and Its Variations. Combinatorial Optimization. V. 12. Ed. G. Gutin & A.P. Punnen. – Springer, 2006. – 830 p.
5. Bektas T. The MTSP: an overview of formulations and solution procedures // Omega. 2006, vol. 34, no. 3, pp. 209-219.
6. Oberlin P., Rathinam S., Darbha S. Today's Traveling Salesman Problem // IEEE Robotics & Automation Magazine. IEEE. 2010, vol.17, no. 4, pp. 70-77.
7. Traveling salesman problem, theory and applications. Ed. D. Davendra. – Intech Open. 2010. – 338 p.
8. Cheikhrouhou O., Khoufi I. A comprehensive survey on the MTSP: Applications, approaches and taxonomy // Comput. Sci. Rev. 2021, vol. 40, 76 p.
9. Karp R.M. Reducibility among combinatorial problems. In Complexity of Computer Computations / Eds. R.E. Miller, J.W. Thatcher, J.D. Bohlinger B. – Boston: Springer. 1972. – P. 85-103.
10. Miller C.E., Tucker A.W., Zemlin R.A. Integer programming formulation of traveling salesman problems // Journal of the ACM (JACM). 1960, vol. 7, iss. 4, pp. 326-329.
11. Sierksma G., Zwols Y. Linear and Integer Optimization: Theory and Practice. – N.Y.: CRC Press, 2015. – 686 p.
12. 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.
13. Chen S.H., Chen M.C. Operators of the two-part encoding genetic algorithm in solving the MTSP // In Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI). 2011 International Conference on. 2011. IEEE. – P. 331-336.
14. Kiraly A., Abonyi J. Optimization of MTSP by novel representation based on genetic algorithm // Intelligent Computing Optimization in Engineering. 2011, SCI 366, pp. 241-269.
15. 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.
16. 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.
17. 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.

Филимонов Александр Борисович – доктор технических наук, профессор	Filimonov Alexandr Borisovich – doctor of technical sciences, professor
Филимонов Николай Борисович – доктор технических наук, профессор	Filimonov Nikolay Borisovich – doctor of technical sciences, professor
nbfilimonov@mail.ru	