

ОПТИМИЗАЦИЯ МУРАВЬИНЫМ АЛГОРИТМОМ МАРШРУТОВ ПОЛЕТА БПЛА ПРИ ГРУППОВОМ ПАТРУЛИРОВАНИИ ПРОТЯЖЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Филимонов Н.Б.^{1,2}, Ян Шуай¹

¹*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;*

²*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия*

Ключевые слова: группа БПЛА, воздушное патрулирование, планирование маршрутов полета, множественная задача коммивояжера, муравьиный алгоритм, среда Python.

Аннотация. Рассматривается задача оптимального планирования маршрутов группы БПЛА при патрулировании территорий большого протяжения. Предполагается, что патрулируемая территория имеет вытянутую форму и разбита на цепочку смежных зон патрулирования. В качестве критерия оптимальности принимается минимум максимальной длины маршрутов. Рассматриваемая задача группового патрулирования формулируется как множественная задача коммивояжера, решение которой осуществляется муравьиным алгоритмом. Компьютерная апробация алгоритма в среде Python подтверждает эффективность полученного решения.

OPTIMIZATION OF ROUTES UAV FLIGHT WITH USING ANT ALGORITHM DURING GROUP PATROL EXTENDED TERRITORIES

Filimonov N.B.^{1,2}, Yang Sh.¹

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;*

²*Trapeznikov Institute of Control Problems of RAS, Moscow, Russia*

Keywords: UAV group, air patrol, flight route planning, multiple traveling salesman problem, ant algorithm, Python environment.

Abstract. The problem of optimal route planning for a group of UAVs when patrolling extended territories is considered. It is assumed that the patrolled area has an elongated shape and is divided into a chain of adjacent patrol zones. The minimum of the maximum route length is used as an optimality criterion. The group patrol problem under consideration is formulated as a multiple traveling salesman problem, which is solved by an ant algorithm. Computer testing of the algorithm in the Python environment confirms the effectiveness of the obtained solution.

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) [1] протяженных труднодоступных 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. Примером таких патрулируемых объектов могут служить труднодоступные территориальные воды или узкие приграничные участки какого-либо государства. Очевидно, что выполнение требований воздушного патрулирования наилучшим образом обеспечивается привлечением группы БПЛА, позволяющее расширить возможности и существенно повысить производительность процесса патрулирования.

Воздушное патрулирование предполагает решение задачи планирования маршрута (англ. Vehicle Routing Problem, VRP) полета БПЛА. В работах [2, 3] рассмотрено решение задачи планирования оптимальных маршрутов полета БПЛА при групповом патрулировании протяженных территорий с одним депо *методом генетического алгоритма*. В настоящей работе обсуждается подход к решению данной задачи маршрутизации *методом муравьиных алгоритмов*.

Постановка задачи оптимальной маршрутизации полетов БПЛА при групповом патрулировании протяженных территорий

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) [4], 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».

Введем следующие обозначения: N – число зон патрулирования; m – число БПЛА, задействованных для патрулирования; $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ – упорядоченное множество всех зон патрулирования, причем z_i и z_{i+1} – смежные (граничащие друг с другом) зоны; $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ – множество всех БПЛА; D – место базирования беспилотников (далее – депо). Пример разбиения протяженной патрулируемой территории на 11 зон с одним депо D иллюстрирует рисунок 1.

В данной задаче все БПЛА стартуют из одного депо D и возвращаются в него после выполнения своих полетных заданий (туров). Так, беспилотник b_i начинает свой тур $Tour_i$ с депо D , далее посещает последовательно r зон патрулирования $\{z_i, i = \overline{1, r}\}$, а затем возвращается в депо D .

Стоимость тура $Tour_i$ одного i -го беспилотника b_i вычисляется по формуле:

$$C(Tour_i) = C(D, z_i) + \sum_{k=1}^r C(z_k) + C(z_r, D),$$

где $C(D, z_i)$ – стоимость его перемещения из депо D до зоны z_i , $C(z_k)$ – стоимость его патрулирования зоны z_k , а $C(z_r, D)$ – стоимость его перемещения из зоны z_r до депо D .

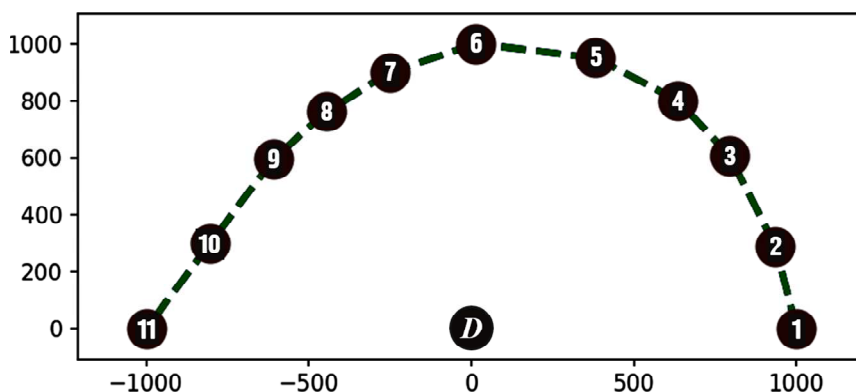


Рис. 1. Разбиение территории на смежные зоны патрулирования

В качестве целевой примем функцию, минимизирующую стоимость самого длинного маршрута среди всех маршрутов полета БПЛА в процессе патрулирования. В результате, рассматриваемую задачу оптимального планирования маршрутов группового патрулирования протяженных территорий можно поставить как следующую МЗК:

$$\max_{1 \leq i \leq m} C(Tour_i) \rightarrow \min.$$

Решение МЗК методом муравьиного алгоритма

МЗК для каждого тура можно рассматривать как ЗК, которая относится к классу труднорешаемых оптимизационных задач. Существует множество различных методов решения ЗК и МЗК, которые классифицируются как точные, эвристические и метаэвристические методы. При этом более предпочтительными являются именно *метаэвристические методы* (от англ. metaheuristic, meta – «за пределами» и heuristic – «найти») [4], не имеющие строгого доказательства сходимости, но опирающиеся на естественные правила выбора, используя рандомизацию, элементы самообучения, интенсификацию, диверсификацию и адаптацию поиска. Среди данных методов особенно следует выделить биоинспирированные методы, к которым относятся, в частности, методы оптимизации муравьиными колониями (Ant Colony Optimization, ACO).

ACO представляет собой метаэвристический подход к решению NP-трудных комбинаторных задач, предложенный Marco Dorigo в 1992г. [5] и основанный на моделировании коллективного поведения муравейника с имитацией самоорганизации муравьиной колонии при решении задач поиска оптимальных маршрутов. При этом колония муравьев рассматривается как многоагентная система, в которой каждый агент (муравей) функционирует автономно.

Идея муравьиного алгоритма заключается в моделировании способности муравьев быстро находить кратчайший путь от муравейника к источнику пищи и адаптироваться к изменяющимся условиям, находя новый кратчайший путь [6]. При своём движении муравей метит путь химическим веществом, называемым феромоном, рассеивающимся со временем.

Интенсивность феромона увеличивается при большем количестве муравьев, и уменьшается с ростом расстояния между целью и точкой отправки, в виду длительности дистанции, ведущей к более быстрому испарению феромона. Изначально перемещение муравьев носит стохастический характер, однако в процессе накопления феромонов на более коротких и выгодных маршрутах возрастает вероятность их последующего выбора другими особями. В результате, многоагентная система муравейника за счет взаимодействия муравьев-агентов в форме оставления феромонов находит кратчайший путь к источнику пищи.

В рассматриваемой задаче воздушного группового патрулирования требуется патрулируемую территорию, состоящую из N соседних зон, разбить (объединить) на m групп смежных территорий и назначить для их патрулирования m БПЛА, базирующихся в депо D .

Как известно, в муравьиных алгоритмах ключевым является вероятностно-пропорциональное правило, определяющее вероятность перехода k -го муравья (агента) из зоны z_i в зону z_j на t -й итерации: чем больше феромона на пути $z_i - z_j$, тем больше вероятность агента выбрать этот путь:

$$P_{ij,k}(t) = \frac{\tau_{ij}^{\alpha}(t) \cdot \mu_{ij}(t)}{\sum_{l \in Z_{i,k}} (\tau_{il}^{\alpha}(t) \cdot \mu_{il}(t))}, \quad j \in Z_{i,k};$$

$$P_{ij,k}(t) = 0, \quad j \notin Z_{i,k}.$$

где i – зона z_i , в которой находится агент; t – момент времени, в который агент посетил зону z_i ; z_j – следующая зона на пути агента; k – номер агента; $Z_{i,k}$ множество зон, в которые k -й агент может попасть из зоны z_i ; $\tau_{ij}^{\alpha}(t)$ – количество феромона на пути $z_i - z_j$ в момент времени t ; $\mu_{ij}(t)$ длина пути $z_i - z_j$; α – коэффициент феромона; $0 \leq P_{ij,k}(t) \leq 1$.

После завершения маршрута каждый k -й агент откладывает на маршруте из зоны z_i в зону z_j следующее количество феромона:

$$\Delta\tau_{ij,k}(t) = \frac{Q}{L_k(t)}, \quad (i, j) \in \Lambda_k(t),$$

$$\Delta\tau_{ij,k}(t) = 0, \quad (i, j) \notin \Lambda_k(t),$$

где $\Delta\tau_{ij,k}(t)$ – изменение феромона на пути $z_i - z_j$; Q – регулируемый параметр, отражающий общее количество феромона у агента; $\Lambda_k(t)$ – маршрут, пройденный k -м агентом на итерации t , а $L_k(t)$ – длина этого маршрута t .

После окончания итерации, т.е. после завершения всеми агентами процедуры патрулирования, определяется количества феромона, которые оставят на своих путях агенты. Необходимо обеспечить испарение феромона – уменьшение во времени количества, отложенного на предыдущих итерациях феромона. При этом обновление феромона на пути $z_i - z_j$ вычисляется по формуле:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij,k}(t),$$

где $\tau_{ij}(t)$ – текущее количество феромона на пути $z_i - z_j$; p – коэффициент испарения феромона, лежащий в пределах ($0 \leq p \leq 1$); m – количество агентов;

$\sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij,k}(t)$ – общее количество феромона, которое добавили агенты на пути

$z_i - z_j$ на текущей итерации.

При решении ЗК и МЗК необходимо учитывать условие, запрещающее агенту более одного раза посещать одну и ту же зону патрулирования. Выполнение этого условия обеспечивается наличием у агента «памяти», т.е. каждый агент помнит, какие зоны он посещал. Если агент, попав в зону z_i , далее не может никуда идти, но он не обошел все зоны, то агент «умирает», т.е. не оставляет феромона на своем пути.

Таким образом, оптимальное решение может быть найдено после определенного числа итераций, причем условием остановки итераций может быть либо достижение определенного числа итераций без изменений, либо фиксированное количество итераций.

Компьютерная апробация муравьиного алгоритма решения МЗК

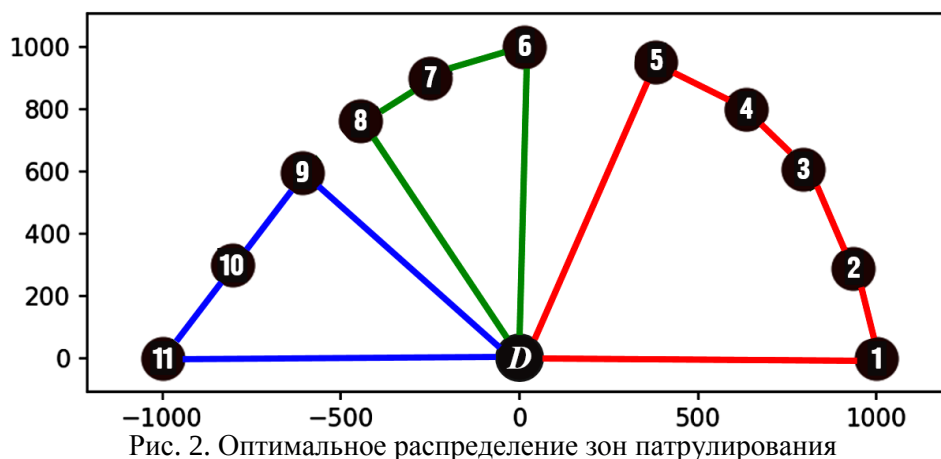
Рассмотрим модельный пример задачи маршрутизации полета трех БПЛА ($m = 3$) при групповом воздушном патрулировании одиннадцати зон ($N = 11$). В таблице 1 приведены данные об интервалах времени патрулирования всех зон $z_i, i = \overline{1, 11}$ и об интервалах времени полета от депо D до данных зон $C(D, z_i)$, причем полагаем, что $C(D, z_i) = C(z_i, D)$.

Табл. 1. Время патрулирования зоны z_i и время полета до нее от депо D

z_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$C(z_i)$	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0	3,25	3,5	3,75	4,0
$C(D, z_i)$	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,8

Решение данной задачи получено с использованием вычислительной среды Python. В программе был выбран мобильный симулятор-стратегия **AntColony** для реализации муравьиного алгоритма. Для построения графиков и выполнения вычислений использованы библиотека визуализации данных **matplotlib.pyplot** и библиотека **numpy**. Для данной задачи были выбраны следующие параметры муравьиного алгоритма: $\alpha = 1$, $p = 0,5$, максимальное количество итераций равно 100.

Отвечающее найденному решению распределение одиннадцати зон патрулирования на три группы смежных зон с маршрутами их облета тремя БПЛА иллюстрирует рисунок 2.



Результаты вычисления оптимального решения с применением алгоритма АСО имеют следующий вид:

$$C(Tour_1) = 11,70; C(Tour_2) = 10,10; C(Tour_3) = 12,55; \max_{1 \leq i \leq 3} C(Tour_i) = 12,55.$$

Заключение

Изложен метод планирования маршрутов полета группы БПЛА в задачах патрулирования территорий большой протяженности. Предполагается, что патрулируемая территория имеет вытянутую форму и она разбита на цепочку смежных зон патрулирования. Задача распределения зон по маршрутам полета в группе БПЛА является МЗК, для решения которой предлагается использовать метод муравьиных алгоритмов. Вычислительные эксперименты в среде Python подтверждают эффективность предложенного алгоритмического решения.

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. – №34. – С. 49-55. – DOI: 10.26160/2474-5901-2023-34-49-55.
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. – DOI: 10.17587/mau.24.374-381.
3. Omar C., Ines K. A Comprehensive Survey on the Multiple Traveling Salesman Problem: Applications, Approaches and Taxonomy // Computer Science Review. 2021, vol. 40, p. 100369. DOI: 10.1016/j.cosrev.2021.100369.
4. Гладков Л.А., Кравченко Ю.А., Курейчик В.В., Родзин С.И. Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации. – Чебоксары: Среда, 2024. – 228 с.
5. Dorigo M. Swarm Intelligence, Ant Algorithms and Ant Colony Optimization // Reader for CEU Summer University Course «Complex System». – Budapest, Central European University, 2001. – P. 1-38.

References

1. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Optimal routing of UAV flights during group patrolling of territories // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2023, iss. 34, pp. 49-55. DOI: 10.26160/2474-5901-2023-34-49-55.
2. Filimonov A.B., Filimonov N.B., Nguyen T.K., Pham Q.P. Planning of UAV Flight Routes in the Problems of Group Patrolling of the Extended Territories // Mechatronics, Automation, Control. 2023, vol. 24, no. 7, pp. 374-381. DOI: 10.17587/mau.24.374-381.
3. Omar C., Ines K. A Comprehensive Survey on the Multiple Traveling Salesman Problem: Applications, Approaches and Taxonomy // Computer Science Review. 2021, vol. 40, p. 100369. DOI: 10.1016/j.cosrev.2021.100369.
4. Gladkov L.A., Kravchenko Yu.A., Kureichik V.V., Rodzin S.I. Intelligent Systems: Models and Methods of Metaheuristic Optimization. – Cheboksary: Wednesday, 2024. – 228 p.
5. Dorigo M. Swarm Intelligence, Ant Algorithms and Ant Colony Optimization // Reader for CEU Summer University Course «Complex System». – Budapest, Central European University, 2001. – P. 1-38.

Филимонов Николай Борисович – доктор технических наук, профессор	Filimonov Nikolay Borisovich – doctor of technical sciences, professor
Ян Шуай – аспирант	Yang Shuai – postgraduate student
shuai.yang21@physics.msu.ru	

Received 30.04.2025