

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2024-40-28-35>

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ МАРШРУТОВ ПОЛЕТА БПЛА ПРИ ГРУППОВОМ ПОГРАНИЧНОМ ПАТРУЛИРОВАНИИ

Фам К.Ф.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

Ключевые слова: группа БПЛА, патрулирование приграничных территорий, планирование маршрутов полета, множественная задача коммивояжера, генетический алгоритм, пример патрулирования морской границы Вьетнама.

Аннотация. Рассматривается задача маршрутизации полета БПЛА при групповом патрулировании приграничных территорий большой протяженности. Данная задача комбинаторной оптимизации относится к классу множественных задач коммивояжера с минимизацией длины маршрута при облете всех патрулируемых зон. В качестве модельного примера рассмотрена задача оптимальной маршрутизации полета БПЛА при групповом патрулировании морской границы Вьетнама.

OPTIMIZATION OF UAV FLIGHT ROUTES FOR GROUP BORDER PATROLLING USING GENETIC ALGORITHM

Pham Q.P.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: UAV group, patrolling of border territories, flight route planning, multiple traveling salesman task, genetic algorithm, example of patrolling the border of Vietnam.

Abstract. The problem of optimizing unmanned aerial vehicle routes for group patrolling of border territories is considered. This combinatorial optimization problem belongs to the class of multiple traveling salesman problem with minimizing the route length when flying around all patrolled areas. As a model example, the problem of optimal UAV flight routing during group patrolling of the maritime border of Vietnam is considered.

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА, (беспилотники, дроны; англ. Unmanned Aerial Vehicles, UAV) находятся на пике своей популярности, являясь высокотехнологичными системами, способными автономно выполнять неограниченный спектр миссий в различных сферах жизнедеятельности человека. При этом весьма актуальным является использование БПЛА на пограничной службе для охранно-мониторинговой деятельности по обеспечению безопасности государства в виде воздушного планового *патрулирования государственных границ*. Здесь необходимость использования БПЛА обусловлена большой протяженностью пограничных территорий. Именно беспилотники способны открыть новые возможности при контроле труднодоступных пограничных рубежей (побережье, горные и лесные массивы, территориальные воды и острова, устья крупных рек).

В последние годы БПЛА в сфере пограничного патрулирования произвели революцию благодаря их оснащению системами наведения, различными датчиками, бортовыми РЛС и видеокамерами, которые позволяют контролировать большие площади суши и моря, обеспечивая всесторонний обзор местности. Использование БПЛА для контроля и патрулирования границ имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами: большая экономичность, компактность, низкая стоимость и простота в эксплуатации. Неслучайно, уже в течение 20-ти лет БПЛА успешно ведут дозор на рубежах многих стран мира, включая США, Израиль, Индию, Китай, Россию, Францию, Италию, Бразилию и др.

В работах [1-4] рассмотрена задача планирования оптимальных маршрутов полета БПЛА при групповом патрулировании больших протяженных территорий как с одним, так и со многими депо – пунктами базирования беспилотников. В настоящей работе обсуждается решение данной задачи маршрутизации с минимизацией длины маршрута при облете всех патрулируемых зон. В качестве модельных примеров рассмотрены задачи оптимальной маршрутизации полета БПЛА при групповом патрулировании морской границы Вьетнама.

Задача воздушного патрулирования государственных границ как множественная задача коммивояжера с несколькими депо

Обратимся к задаче маршрутизации полета группы однотипных БПЛА при патрулировании узкой вытянутой приграничной территории большой протяженности со многими депо. Полагаем, что вся контролируемая пограничная территория разбита на цепочку смежных зон патрулирования, предписанных отдельным БПЛА, так что маршруты их полета проходят через смежные зоны. Все имеющиеся депо рассредоточены вдоль патрулируемой территории, разделенной на участки, на каждом из которых действуют БПЛА из одного депо, так что весь парк имеющихся беспилотников распределен по выделенным участкам. В итоге, маршрут полета каждого, участвующего в патрулировании БПЛА, именуемый *туром*, начинается и заканчивается в предписанном беспилотнику депо.

Введем обозначения: N и $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ – соответственно число и упорядоченное множество зон; n и $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ – соответственно число и множество всех депо на патрулируемой территории; m – число БПЛА, предназначенных для патрулирования; m_k – число БПЛА, базирующихся в депо d_k ($k = \overline{1, n}$), λ_i – протяженность траектории полета БПЛА в i -й зоне; $\lambda_{d,i}$ – расстояние от депо d до i -й зоны; $\lambda_{i,d}$ – расстояние от i -й зоны до депо d .

Задача планирования маршрутов полета БПЛА состоит в разбиении контролируемой территории на n отдельных *участков* R_1, R_2, \dots, R_n , так что участок R_k патрулируется БПЛА, базирующимися в депо d_k . Полагаем, что

участок R_k охватывает N_k зон и в нем организуется m_k туров с использованием m_k беспилотников.

Маршрут полета каждого, участвующего в патрулировании БПЛА, именуемый *туром*, начинается и заканчивается в некотором депо и охватывает определенные зоны патрулируемой территории, причем каждому БПЛА предписан только один тур.

Конфигурационной моделью рассматриваемой задачи маршрутизации является граф $G = (V, E)$ со множеством вершин $V = P \cup D$ и ребер E , представляющих возможные варианты перемещения БПЛА.

Для неизвестных переменных N_k и m_k должны выполняться следующие условия:

$$\sum_{k=1}^n N_k = N, \quad \sum_{k=1}^n m_k = m.$$

Разобьем множество зон P на интервалы: $P = P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_n$, где P_k – множество зон, входящих в участок R_k . Далее каждое множество зон P_k разобьем на интервалы:

$$P_k = P_{k,1} \cup P_{k,2} \cup \dots \cup P_{k,m_k} \quad (k = \overline{1, n}).$$

Принятому разбиению патрулируемой территории отвечает разбиение графа G на подграфы G_1, G_2, \dots, G_n , так что подграф G_k описывает возможные перемещения БПЛА на участке R_k . На подграфе G_k маршруты отдельных БПЛА представляются простыми циклами $C_{k,i}$, $i = \overline{1, m_k}$: $G_k = C_{k,1} \cup C_{k,2} \cup \dots \cup C_{k,m_k}$, охватывающими в интервале $P_{k,i}$ зоны, число которых равно $N_{k,i} = |P_{k,i}|$. Таким образом,

$$N_{k,i} \geq 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m_k}, \quad N_k = \sum_{i=1}^{m_k} N_{k,i}.$$

Пусть $Ind(P_{k,i})$ – множество индексов зон в интервале $P_{k,i}$ и пусть

$$I_{k,i}^- = \min Ind(P_{k,i}), \quad I_{k,i}^+ = \max Ind(P_{k,i}).$$

БПЛА с номером i , стартуя из депо d_k , сначала перемещается в зону с индексом $I_{k,i}^-$, далее – по всем остальным зонам интервала $P_{k,i}$ и, наконец, из последней зоны с индексом $I_{k,i}^+$ возвращается в депо d_k .

Протяженность маршрута, определяемого циклом $C_{k,i}$, равна

$$L_{k,i} = \lambda_{d_k, I_{k,i}^-} + \lambda_{I_{k,i}^+, d_k} + \sum_{i \in Ind(P_{k,i})} \lambda_i.$$

Индивидуальным заданием $Task_{k,i}$ для i -го БПЛА, осуществляющего патрулирование на участке R_k , является отдельный цикл: $Task_{k,i} = C_{k,i}$.

Решением рассматриваемой задачи маршрутизации является множество заданий:

$$Task = \{Task_{k,i}, k = \overline{1, n}, i = \overline{1, m_k}\}.$$

Положим, что критерием эффективности плана маршрутизации полетов в группе БПЛА является максимальная длина маршрута L_{\max} среди всех полетных заданий $Task_{k,i}$. Тогда оптимальное планирование маршрутов полета БПЛА является экстремальной задачей вида

$$F = L_{\max} = \max_{\substack{1 \leq k \leq n \\ 1 \leq i \leq m_k}} L_{k,i} \rightarrow \min.$$

Таким образом, поставленная задача оптимальной маршрутизации полета БПЛА при групповом пограничном патрулировании формализуется как *множественная задача коммивояжера* (МЗК) (англ. Multiple Traveling Salesman Problem, MTSP), являясь обобщением классической задачи коммивояжера и допускающей несколько коммивояжеров и депо.

Решение МЗК методом вложенного генетического алгоритма

Рассматриваемая задача маршрутизации полетов группы БПЛА при патрулировании государственных границ является МЗК и относится к классу NP-трудных оптимизационных задач. В настоящее время разработано большое количество различных методов решения МЗК. Однако, в связи с отсутствием точных методов, позволяющих получить решение за полиномиальное по числу патрулируемых зон время, естественно использование приближенных т.н. эвристических и метаэвристических методов. Среди последних наибольшую популярность приобрели генетические алгоритмы (Genetic Algorithms, ГА).

Метод ГА стал «фаворитом» решения МЗК как с единственным, так и с несколькими депо. Данный метод удобен для решения именно комбинаторных оптимизационных задач в силу легкой представимости индивидов популяции в комбинаторном виде, а также в силу комбинаторной природы генетических операций кроссинговера и мутации.

Для решения рассматриваемой задачи оптимальной маршрутизации полетов БПЛА при групповом пограничном патрулировании, формализуемой как МЗК с несколькими депо, воспользуемся предложенным в [4] итерационным методом ГА. На каждой итерации данного метода на верхнем уровне осуществляется разбиение приграничной территории на участки R_1, R_2, \dots, R_n , а на нижнем уровне для каждого участка R_k решается оптимизационная МЗК с единственным депо.

Введем h -мерный вектор неизвестных переменных \mathbf{x} :

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_h),$$

где $x_i = N_i (i = \overline{1, h})$, $h = n - 1$.

Данный вектор определяет разбиение множества P на интервалы:

$$P = P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_n.$$

Наложим на искомые переменные ограничения:

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

$$x_1 < x_2 < \dots < x_h, \quad x_1 + x_2 + \dots + x_h \leq N - 1. \quad (2)$$

При фиксированном векторе \mathbf{x} исходная МЗК с несколькими депо распадается на n МЗК с одним депо для каждого участка R_k :

$$F(P_k) = \max_{1 \leq i \leq m_k} L_{k,i} \rightarrow \min. \quad (3)$$

Пусть $F^*(P_k)$, $(i = \overline{1, h})$ – экстремальные значения данных частных критериев. Тогда исходная оптимизационная задача сводится к следующей экстремальной задаче:

$$F(\mathbf{x}) = \max_{1 \leq k \leq n} F^*(P_k) \rightarrow \min, \quad X = [x_L, x_U]^h, \quad (4)$$

где $[x_L, x_U]$ – отрезок ряда натуральных чисел.

Вычислительный алгоритм метода вложенного ГА к решению МЗК с несколькими депо имеет *иерархическую двухуровневую структуру*: на верхнем уровне осуществляется поиск экстремума (4) общего критерия эффективности маршрутизации $F(\mathbf{x})$ в целочисленном кубе X с учетом ограничений (1), (2). При этом в процессе поиска экстремума приходится решать n частных экстремальных задач (3) нижнего уровня. Для решения задач обоих типов применяется ГА, причем в тело ГА оптимизации критерия (4) вкладываются ГА оптимизации критерия (3).

Модельный пример маршрутизации полета БПЛА при воздушном патрулировании морской границы Вьетнама

Патрулирование морской границы является неотъемлемой частью деятельностью по обеспечению безопасности государства. В качестве модельного примера, иллюстрирующего эффективность предлагаемого решения МЗК с несколькими депо, рассмотрена задача оптимальной маршрутизации полета группы БПЛА при воздушном патрулировании границы территориальных вод Вьетнама [5], выделенной на карте (см. рис. 1) синей жирной линией. Территориальные воды – это полоса моря, прилегающая к материковому берегу и островам, находящимся под суверенитетом прибрежного государства, или его внутренним водам и являющаяся составной частью государственной территории. Пограничная территория территориальных вод Вьетнама разбита на 28 зон, для патрулирования которых выделены 7 депо, к каждому из которых приписаны по три БПЛА.

Оптимизационная задача маршрутизации полета БПЛА решалась вложенным методом ГА. Результаты решения данной задачи с минимизацией максимальной протяженности маршрута L_{\max} при облете всех выделенных зон патрулирования, представлены в виде оптимального их распределения на рисунке 2. При этом $L_{\max} \cong 313,0$ км.

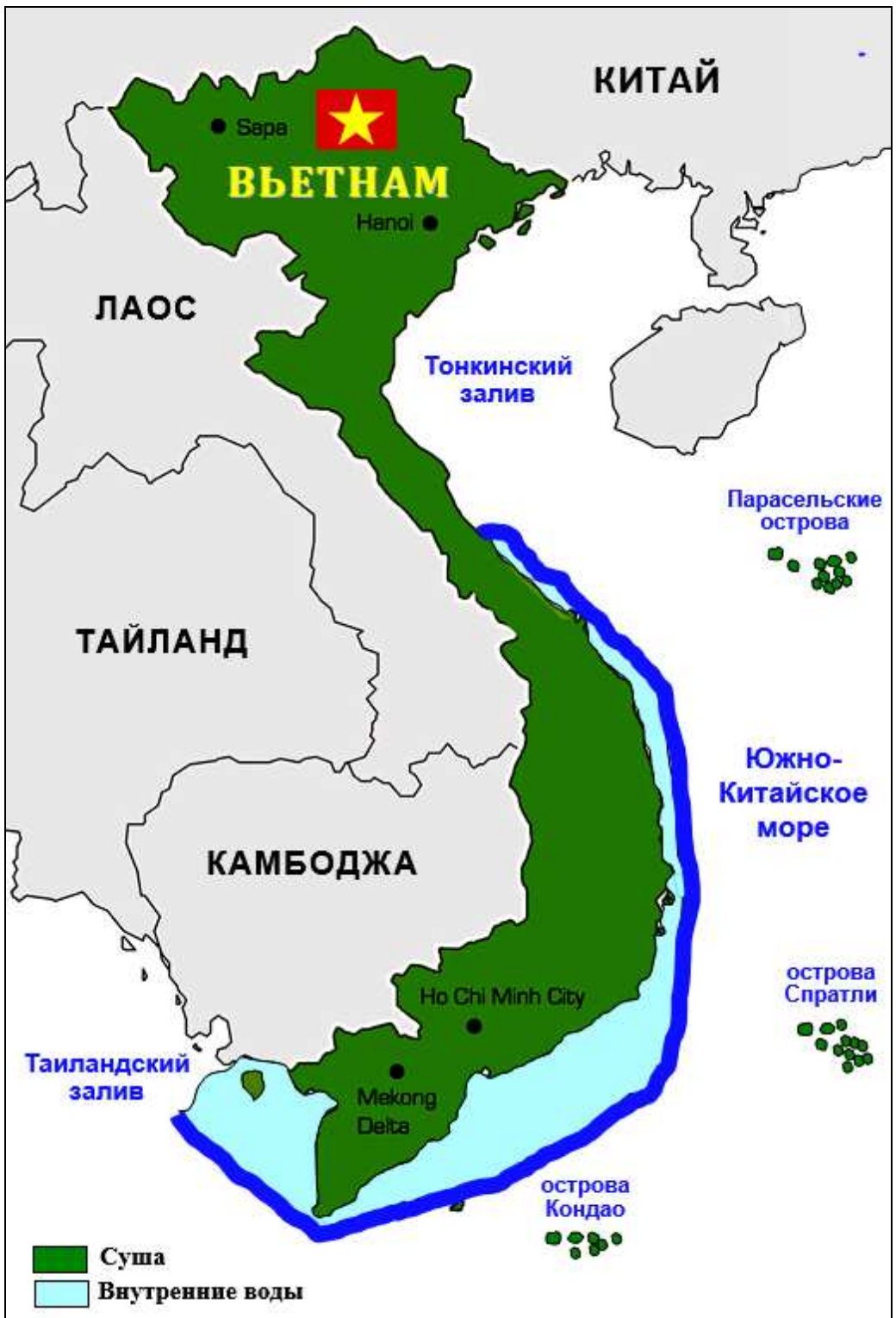


Рис. 1. Граница территориальных вод Вьетнама

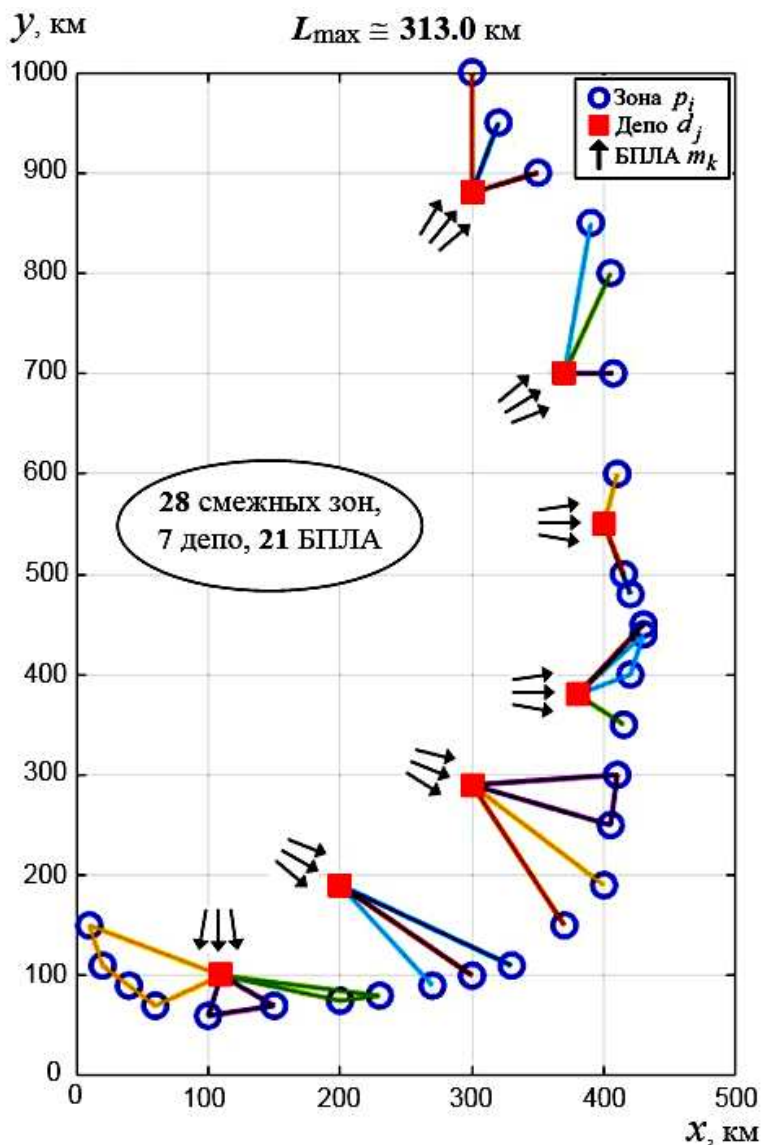


Рис. 2. Оптимальное распределение зон патрулирования

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.
2. Filimonov A.B., Filimonov N.B., Pham Q.P. Planning of Drones Flight of Routes when Group Patrolling of Large Extended Territories // 2023 V International Conference on Control in Technical Systems (CTS). – Saint-Petersburg, 2023. – P. 228-231.
3. 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.

4. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Задача группового патрулирования протяженных территорий с множеством депо // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2023. – № 37. – С. 42-51.
5. Филимонов А.Б., Нгуен Т.К. Патрулирование протяженных территорий беспилотными летательными аппаратами // Теоретические и практические аспекты развития современной науки: теория, методология, практика. Сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции. – Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки, 2023. – С. 25-34.

References

1. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Optimal Routing by UAVs Flights in Group Patrolling of the Territory // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2023, iss. 34, pp. 49-55.
2. Filimonov A.B., Filimonov N.B., Pham Q.P. Planning of Drones Flight of Routes when Group Patrolling of Large Extended Territories // 2023 V International Conference on Control in Technical Systems (CTS). – Saint-Petersburg, 2023. – P. 228-231.
3. Filimonov A.B., Filimonov N.B., Nguyen T.K., Pham Q.P. Planning of UAVs Flight Routes in the Problems of Group Patrolling of Extended Territories // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2023, vol. 24, no. 7, pp. 374-381.
4. Filimonov A.B., Filimonov N.B. The task of group patrolling of extended territories with multiple depots // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2023, iss. 37, pp. 42-51.
5. Filimonov A.B., Nguyen T.K. Patrolling of Extended Territories by UAVs // Theoretical and Practical Aspects of the Development of Modern Science: Theory, Methodology. Collection of scientific articles based on the materials of the X International Scientific and Practical Conference. – Ufa: Publ. house of LLC SIC "Bulletin of Science", 2023. – P. 25-34.

Фам Куок Фонг – студент	Pham Quoc Phong – student
hvkts1421996@gmail.com	

Received 19.02.2024