

УДК 629.7.017.1

# ПЛАНИРОВАНИЕ МАРШРУТОВ ПОЛЕТА БПЛА ПРИ ГРУППОВОМ ПАТРУЛИРОВАНИИ ПРОТЯЖЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

**А.Б. Филимонов**

*МИРЭА – Российский технологический университет*  
Россия, 119571, Москва, проспект Вернадского, 86  
E-mail: filimon\_ab@mail.ru

**Н.Б. Филимонов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: nbfilimonov@mail.ru

**Ключевые слова:** группа БПЛА, воздушное патрулирование, множественная задача коммивояжера, планирование маршрутов полета, критерии оптимальности плана, генетические алгоритмы.

**Аннотация:** Рассматривается задача оптимального планирования маршрутов полета БПЛА при групповом патрулировании территорий большой протяженности с многими депо. Данная задача может быть формализована как симметричная множественная задача коммивояжера. В качестве критерия оптимальности плана маршрутизации принимается минимум максимальной длины маршрутов. Предлагается метод решения рассматриваемой задачи на основе генетических алгоритмов. Обсуждаются примеры оптимальной маршрутизации полетов БПЛА при патрулировании протяженных территорий.

## 1. Введение

Одним из важных и наиболее трендовых использований беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (беспилотники, дроны; англ. Unmanned Aerial Vehicles, UAV) является охранно-мониторинговая деятельность в виде воздушного патрулирования протяженных объектов путем постоянного регулярного их облета, сбора и оперативной передачи информации на станцию управления о наблюдаемой с воздуха обстановке на патрулируемом объекте. Примером таких патрулируемых объектов могут служить труднодоступные территориальные воды или узкие приграничные участки (побережье, горные и лесные массивы) какого-либо государства. Использование здесь БПЛА позволяет открыть новые возможности контроля пограничных участков и обеспечить противодействие террористическим группировкам и контрабанде.

Воздушное патрулирование предполагает решение *задачи планирования маршрута* (англ. Vehicle Routing Problem, VRP) полета БПЛА, которая заключается в построении замкнутых, оптимальных по некоторому критерию, маршрутов облета патрулируемой территории. Естественный подход к постановке и решению данной задачи оптимальной маршрутизации полета группы БПЛА заключается в ее формализации как *множественной задачи коммивояжера* (МЗК) (англ. Multiple Traveling Salesman Problem, MTSP), которая является обобщением классической задачи коммивояжера и

допускает более одного коммивояжера и более одного депо - пункта базирования БПЛА.

В работах авторов [1–4] рассмотрена задача планирования оптимальных маршрутов полета БПЛА при групповом патрулировании больших протяженных территорий с одним депо. В настоящем докладе, развивающем результаты работы авторов [5], дается постановка и обсуждаются подходы к решению данной задачи маршрутизации с многими депо, причем предполагается оптимизация плана искомым маршрутов по минимаксному критерию их протяженности (длины).

## 2. Постановка задачи оптимальной маршрутизации полета группы БПЛА с многими депо

Обратимся к задаче маршрутизации полета группы однотипных БПЛА при патрулировании узкой вытянутой территорий большой протяженности с многими депо (Multiple Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP). Полагаем, что вся контролируемая 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 результате, маршрут полета каждого, участвующего в патрулировании БПЛА, именуемый *туром*, начинается и заканчивается в некотором депо, охватывая определенные зоны патрулируемой территории.

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  $d_k$  ( $k = \overline{1, n}$ ),  $\lambda_i$  – 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.

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

Для неизвестных переменных  $N_k$  и  $m_k$  должны выполняться следующие условия:

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

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

Разбиение патрулируемой территории на зоны и участки иллюстрирует рис. 1.

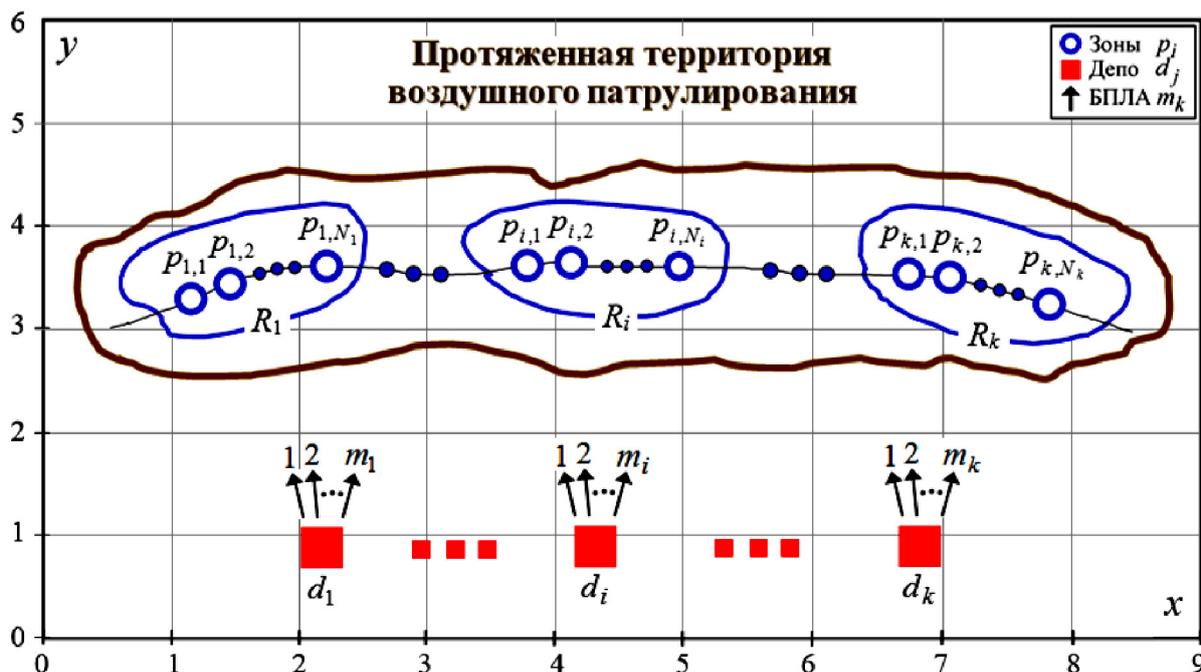


Рис. 1.

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,

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

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

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

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 территории на участке  $R_k$ , является отдельный цикл:  $Task_{k,i} = C_{k,i}$ .

Решением рассматриваемой задачи маршрутизации является множество заданий:

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

Оптимальность плана маршрутизации полетов в группе БПЛА определяется выбором его критерия эффективности  $F$ . Положим, в качестве данного критерия выбрана максимальная длина маршрута  $L_{\max}$  среди всех полетных заданий  $Task_{k,i}$ . Тогда оптимальное планирование маршрутов полета БПЛА является экстремальной задачей вида

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

Следует отметить, что данная задача группового патрулирования протяженных

территорий, согласно общепринятой классификации, относится к классу *симметричной* МЗК (Symmetric Multiple Traveling Salesman Problem SMTSP).

### 3. Метод решения задачи оптимальной маршрутизации

Поставленная задача оптимальной маршрутизации полетов группы БПЛА является МЗК и относится к классу NP-трудных задач комбинаторной оптимизации. С точки зрения теории вычислительной сложности данная задача при наличии более 66 патрулируемых зон становится трансвычислительной, находящейся за «пределом Бремерманна», т.е. требует на обработку больше чем  $10^{93}$  бит информации. Тем не менее, для решения такого рода задач маршрутизации с «обозримым» количеством зон патрулирования разработано большое количество различных приближенных методов, дающих квазиоптимальные решения.

Изложим эвристический метод ее решения с применением генетических алгоритмов (ГА). Реализующий его вычислительный алгоритм является итерационным и имеет *иерархическую двухуровневую структуру*.

На каждой итерации на верхнем уровне осуществляется некоторое разбиение территории на участки  $R_1, R_2, \dots, R_n$ . На нижнем уровне для каждого участка  $R_k$  решается оптимизационная задача – задача маршрутизации полета БПЛА с одним депо:

$$F_2^*(P_k) = \max_{1 \leq i \leq m_k} L_{k,i} \rightarrow \min.$$

Для решения данной задачи применяется метод, предложенный авторами в работе [1], базирующийся на методологии ГА.

Вычислительным итогом каждой итерации является общая оценка выполненного разбиения – наихудший по всем участкам результат:

$$F_1 = \max_{1 \leq k \leq n} F_2^*(P_k).$$

Итерационный процесс направлен на минимизацию данного критерия с перебором возможных вариантов разбиения патрулируемой территории на  $R_1, R_2, \dots, R_n$ :

$$(1) \quad F_1 \rightarrow \min.$$

Поиск минимума данного критерия также осуществляется с применением ГА.

Остановимся подробнее на формализации оптимизационной задачи (1).

Введем в рассмотрение  $h$ -мерный вектор целочисленных переменных:

$$(2) \quad \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_h),$$

где  $x_i = N_i$  ( $i = \overline{1, h}$ ),  $h = n - 1$ . Данный вектор определяет разбиение множества зон  $P$  на интервалы:  $P = P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_n$ .

Наложим на искомые переменные ограничения:

$$(3) \quad x_L \leq x_i \leq x_U \quad (i = \overline{1, h}), \quad x_L = 1, \quad x_U = N;$$

$$(4) \quad x_1 + x_2 + \dots + x_h \leq N - 1.$$

Заметим, что

$$N_n = N - (x_1 + x_2 + \dots + x_h).$$

Таким образом, критерий  $F_1$  является  $h$ -мерной функцией и решение экстремальной задачи (1) ищется в целочисленном  $h$ -мерном кубе  $X$ :

$$F(\mathbf{x}) \rightarrow \min_{\mathbf{x} \in X}, \quad X = [x_L, x_U]^h,$$

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

### 4. Модельные примеры

В работе в качестве модельных примеров рассмотрены задачи оптимальной маршрутизации полета группы БПЛА при воздушном патрулировании двух границ

Вьетнама [6]. В первом примере рассмотрена задача воздушного патрулирования сухопутной Вьетнамо-Китайской границы протяженностью 1297 км. Здесь патрулируемая территория разбита на 50 зон и выделены 6 депо, к каждому из которых приписаны по три БПЛА. Во втором примере рассмотрена задача воздушного патрулирования морской границы Вьетнама – границы территориального моря и береговой линии протяженностью более 3000 км. Здесь патрулируемая территория разбита на 28 зон, выделены 7 депо, к каждому из которых приписаны по 3 БПЛА. Компьютерные эксперименты в среде MATLAB показали 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, No. 34. P. 49-55.
2. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б., Фам К.Ф. Планирование маршрутов полета БПЛА в задачах группового патрулирования протяженных территорий // V Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2023). Сборник докладов. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 274-277.
3. Filimonov A.B., Filimonov N.B., Pham Q.P. Planning of Drones Flight of Routes when Group Patrolling of Large Extended Territories // V International Conference on Control in Technical Systems (CTS). Saint Petersburg, 2023. P. 228-231.
4. 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.
5. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Задача группового патрулирования протяженных территорий с множеством депо // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2023, No. 37. P. 42-51.
6. 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.