

## **ОБНАРУЖЕНИЕ ОТДЕЛЯЕМЫХ ЧАСТЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ<sup>86</sup>**

**Гончаренко В.И.<sup>1,2</sup>, Лебедев Г.Н.<sup>1</sup>, Михайлин Д.А.<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4*

<sup>2</sup>*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук,  
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65*

<sup>3</sup>*Главный научно-исследовательский испытательный центр робототехники  
Министерства обороны Российской Федерации, Россия, г. Москва, ул. Серёгина, д. 5  
fvo@mai.ru*

*Аннотация: Предложен оригинальный подход к решению задачи предполётного и оперативного планирования действий группы беспилотных летательных аппаратов на основе генетического алгоритма. Принципиальным отличием решаемой задачи от известной задачи коммивояжера является учет требуемого графика обслуживания. Разработанный инструмент автоматизации планирования позволяет повысить*

---

<sup>86</sup> *Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-29-04326офи\_м.*

*оперативность мероприятий по обнаружению отделяющихся частей ракет-носителей с помощью группы беспилотных летательных аппаратов.*

Ключевые слова: отделяющаяся часть ракеты-носителя, обнаружение и нейтрализация очагов заражения, группа беспилотных летательных аппаратов, генетический алгоритм, многокритериальная оптимизация.

## **Введение**

Одной из важных областей эксплуатации авиационно-космических крупномасштабных организационно-технических комплексов на современных космодромах является выведение на орбиты космических аппаратов (КА) [1-3]. До недавнего времени для поиска отделяющихся частей (ОЧ) ракеты-носителей (РН) КА использовались пилотируемые вертолеты, что является затратным и длительным методом обнаружения отделяющихся частей. Суровый климат зон падения – сильные ветра и низкие температуры - также накладывают ограничения на полеты пилотируемой авиации [4]. Поэтому активно внедряются современные технологии поиска отработавших ступеней ракет, например, на космодроме «Восточный», в Амурской области и Республике Саха (Якутия), с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Применение БЛА увеличило эффективность и сократило время поисков в несколько раз [5]. Кроме этого, для повышения эффективности поисков ОЧ разрабатываются специализированные мобильные комплексы эксплуатации районов падения отделяющихся частей ракет-носителей [6-8].

Дальнейшее повышение оперативности обнаружения ОЧ РН возможно путём организации мониторинга районов падения ОЧ группой БЛА среднего и дальнего радиуса действия. Поэтому весьма актуальной представляется задача предполетного и оперативного планирования полёта группы беспилотных летательных аппаратов для обнаружения ОЧ РН в заданных районах падения.

В общем случае при организации мониторинга территорий группой БЛА наземных неподвижных объектов зачастую достаточно формирования полетного задания, используя известные данные о их местоположении. В отличие от этого случая в данной работе рассматриваются процессы обслуживания особого класса мобильных объектов (МО), графики которых либо заданы, либо требуют предварительного назначения, чтобы обслужить эти объекты «в нужное время и в нужном месте». При этом сделано допущение, что по данным расчётов направления и скорости движения объектов по трассам заранее известны при следующей постановке задачи.

## **1 Постановка задачи**

Необходимо решить задачу по определенным критериям в следующем порядке.

1. Найти решение задачи обслуживания группой БЛА различных наземных объектов, состоящих из трех групп, – наземных неподвижных пунктов без заданного графика их наблюдения, подвижных объектов и наземных пунктов (НП), график наблюдения которых задан, и только мобильных объектов (МО), график наблюдения которых необходимо спрогнозировать.

2. Для неподвижных пунктов заданы координаты их местоположения  $X, Y, Z$ , для МО курс  $\psi$  и скорость  $V_{ц}$  ( $V_{ц}$  – скорость цели) движения по трассам. Общее число  $n$  объектов наблюдения (ОН) задано.

3. Все объекты наблюдения имеют различную важность. Будем считать, что текущая важность каждого  $i$ -го ОН – произведение трех параметров:  $d_i$  – заданная априорная постоянная относительная важность;  $b_i$  – текущее значение неопределенности знания об объекте наблюдения из-за отсутствия непрерывного контроля при периодическом наблюдении  $i$ -го ОН;  $\tau_i$  – время отсутствия контроля над ОН, отсчитываемое с момента последнего кратковременного наблюдения.

4. Считается, что общая важность  $J$  получаемой информации о состоянии объекта наблюдения достигается при минимуме остаточной неопределенности о состоянии объекта наблюдения:

$$(1) \quad J = \min \int_0^T \sum_{i=1}^n d_i b_i(t) \tau_i(t) dt$$

где  $T$  – конечный момент времени;  $t$  – время функционирования.

5. Динамика снятия неопределенности  $i$ -го ОН после его обнаружения и кратковременного наблюдения в течение интервала  $\Delta t$  описывается дифференциальным уравнением:

$$(2) \quad \dot{b}_i = \begin{cases} \lambda_i & \text{при } i \neq j; \\ -\frac{b_i}{\Delta t} & \text{при } i = j, \end{cases}$$

где  $\lambda_i$  – скорость изменения значения неопределенности;  $j$  – номер ОН, который в данный момент наблюдается.

Из уравнения (2) видно, что при ненаблюдении ОН его важность возрастает с постоянной скоростью  $\lambda_i$ , как принято в данной работе, но эта скорость у разных ОН неодинакова и соответствует его персональным динамическим свойствам.

6. Время отсутствия контроля объекта  $\tau_i$  задержки в получении новой информации при периодическом наблюдении  $i$ -го МО естественно растет при ненаблюдении и обнуляется при очередном контроле его действий согласно уравнению:

$$(3) \quad \dot{\tau}_i = \begin{cases} 1, & \text{при ненаблюдении МО при } i \neq j; \\ -\frac{\tau_i}{\Delta t}, & \text{в результате его наблюдения при } i = j. \end{cases}$$

7. При решении задачи предполетного планирования действий БЛА учитывается динамическая важность  $b_j$  объектов наблюдения, а также их местоположение и графики их наблюдения. Эти графики определяют интервалы обслуживания других менее важных неподвижных объектов. Обслуживание должно осуществляться внутри выбираемых интервалов  $\Delta t_j$  «в нужном месте трассы и в нужное время».

8. Задано число  $N$  используемых БЛА. Высота их полета может меняться по мере выполнения полетного задания. Задана минимальная скорость  $V_{\min}$  пролета над интересующим участком трассы за время  $\Delta t_j$ , а также задана максимальная скорость  $V_{\max}$  перелета от одного участка трассы к другому.

Требуется: определить состав наиболее приоритетных МО наблюдения в предстоящем вылете группы БЛА, назначить маршруты облета выбранных объектов каждым БЛА и составить расписание обслуживания МО, попавших в план.

## 2 Генетический алгоритм предполётного планирования

Предлагаемый подход к решению задачи предусматривает при предполетном планировании групповых действий БЛА высокоэффективный генетический алгоритм маршрутизации ввиду многокритериальности и значительной размерности задачи [9-11].

Сущность предлагаемого подхода состоит в том, что весь планируемый маршрут разбивается на несколько участков (блоков), границами которых являются МО, которые необходимо обслужить в заданном графике. В каждом из этих участков доминирующим является свой один или два частных критерия – либо важна своевременность, либо – экономичность и т.д.

После выполнения процедуры формирования «элиты» на базе приведенных критериев начинается процедура «скрещивания» путем перестановки блоков, а затем – «мутации», которая выполняется только между граничными промежуточными пунктами маршрутов. Завершающая операция отбора следующей «элиты» проводится с помощью специального критерия.

Компьютерное моделирование показало, что особый учет графика обслуживания мобильных объектов позволил разбить планируемый маршрут на блоки (между  $МО_{j-1}$  и  $МО_j$ ) и тем самым применить процедуры их скрещивания и мутации. Генетический алгоритм лучше на 10-15% не только однопараметрического и двухпараметрических критериев, но даже и трёхпараметрического критерия, так как в итоге выбранный маршрут состоит их участков, каждый из которых оптимален по «своему» показателю.

## 3 Алгоритмы оперативного планирования

В работе обосновано выполнение оперативного планирования групповых действий БЛА в виде двух различных операций – выбора состава первоочередных ОН и распределения «ближайших» БЛА между ними на текущем шаге. Показано, что оперативное планирование особенно необходимо при потребности совершить повторный облет очередного ОН, либо включить в план обслуживания новый наземный объект, а также при других изменениях динамической обстановки [11, 12].

Для рассмотренной в работе типовой ситуации проведено компьютерное моделирование процессов маршрутизации для одного БЛА и группы из двух БЛА. Результаты моделирования показали, что использование группы БЛА для поиска ОЧ РН по сравнению с применением одного БЛА позволяет повысить оперативность мероприятий в 1,7-2 раза.

Сравнительные результаты компьютерного моделирования процессов маршрутизации такими способами, как жадный алгоритм, алгоритм Дейкстры, и с помощью генетического алгоритма показали, что генетический алгоритм повышает качественное содержание планирования на 15...20 %.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что предложенный подход к обслуживанию МО является полезным дополнением к известному подходу обнаружения наземных целей при облете группой БЛА территории на заданной площади.

## Литература

1. Цвиркун А.Д., Степановская И.А. Одиннадцатая международная конференция "Управление развитием крупномасштабных систем" MLSD'2018 // Проблемы управления. 2019. № 2. С. 80-84.
2. Беневольский С.В., Гончаренко В.И. Перспективные технологии решения краевых задач доставки отделяющихся частей ракет-носителей с терминальным наведением // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. – 2011. – № 2 (26). – С. 10-20.
3. Гончаренко В.И., Кан Ю.С., Травин А.А. Математическое и программное обеспечение анализа рассеивания точек падения фрагментов летательных аппаратов // Труды МАИ: электронный журнал. 24.12.2012. – Вып. №61. – 12 с. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/>.
4. Районы падения // Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры. URL: <http://www.russian.space/298/>. Дата обращения 22.01.2019.
5. Поиск отработавших ступеней ракет с помощью беспилотников ZALA // Группа компаний ZALA AERO. URL: <http://zala.aero/poisk-otrabotavshix-stupenej-raket-s-pomoshhyu-bespilotnikov-zala/>. Опубликовано 22.12.2017. Дата обращения 22.01.2019.
6. ОКР по созданию комплекса эксплуатации районов падения частей ракет // URL: <https://4science.ru/finsupports/Sozdanie-kompleksa-ekspluatatsii-raionov-padeniya-otdelyaushih-sya-chastei-raket-kosmicheskogo-naznacheniya-Shifr-OKR-KERP-Vostok> © 4science. Опубликовано 22.12.2017.
7. Костылев Г.М., Ожигова А.В., Шатров Я.Т. Логистическая модель построения комплекса средств эксплуатации районов падения отделяющихся частей ракет-носителей // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2014. №8. – С. 31-38.
8. Работы в районе падения отделяющихся частей ракеты-носителя продолжаются в Якутии: Вчера с космодрома «Восточный» Амурской области совершен пуск ракеты-носителя «Союз-2». // YakutiaMedia. URL: <https://yakutiamedia.ru/news/774746/>. Опубликовано 28.12.2018.
9. Lebedev G., Goncharenko V., Mikhailin D., Rumakina A. Aircraft group coordinated flight route optimization using branch-and-bound procedure in resolving the problem of environmental monitoring // ITM Web of Conferences. Volume 10 (2017). 2017 Seminar on Systems Analysis. Moscow, Russia, February 14-15, 2017. Les Ulis, France. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171001003>.
10. Лебедев Г.Н., Гончаренко В.И., Румакина А.В. Модификация метода ветвей и границ для двумерной маршрутизации координированного полета группы летательных аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016, том. 17. – №11. – С. 783-791.
11. Гончаренко В.И., Лебедев Г.Н., Михайлин Д.А. Задача оперативной двумерной маршрутизации группового полета беспилотных летательных аппаратов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2019. № 1. С. 153-165. DOI: 10.1134/S0002338819010074.
12. Лебедев Г.Н., Гончаренко В.И., Царева О.Ю., Михайлин Д.А. Выбор множества приоритетных наземных объектов наблюдения с помощью беспилотных летательных аппаратов и маршрутизация их полета // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2019. № 2. С. 3-12.