

## Планирование поиска отделяющихся частей ракеты-носителя с помощью группы беспилотных летательных аппаратов

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

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 123995, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, 117997, Россия

*Рассмотрены процессы обслуживания особого класса мобильных объектов, графики которых либо заданы, либо требуют предварительного назначения, чтобы обслужить эти объекты «в нужное время и в нужном месте». Поставленная задача планирования полета группы летательных аппаратов решена с помощью непрерывной формы динамического программирования, согласно которой условию оптимальности соответствует уравнение Беллмана в частных производных. Предложен оригинальный подход к решению задачи предполетного 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 оперативность мероприятий по обнаружению отделяющихся частей ракет-носителей с помощью группы беспилотных летательных аппаратов. Показано, что разработанный генетический алгоритм эффективнее алгоритмов, основанных не только на одно- и двухпараметрическом критериях, но даже и на трехпараметрическом критерии.*

**Ключевые слова:** отделяющаяся часть ракеты-носителя, группа беспилотных летательных аппаратов, генетический алгоритм, многокритериальная оптимизация

**Введение.** Одной из важных областей эксплуатации космических комплексов является выведение на орбиты космических аппаратов (КА) средствами космодромов [1, 2]. Выведение на орбиты КА сопровождается падением на Землю отделяющихся частей (ОЧ) ракет-носителей (РН): стартовых ускорителей, отработавших ступеней, головных обтекателей, соединительных и хвостовых отсеков ступеней и т. п. Размеры и местоположение районов падения этих частей для каждой РН определяются требованиями к орбитам КА, их массой, энергетическими характеристиками РН.

До недавнего времени для поиска ОЧ РН использовались пилотируемые вертолеты, но это затратный и длительный метод обнаружения. Суровый климат зон падения — сильные ветры и низкие температуры — также накладывает ограничения на полеты пилотируемой авиации [2]. Поэтому для поиска отработавших ступеней ракет активно внедряются современные технологии на основе беспилотных лета-

тельных аппаратов (БЛА), например, на космодроме «Восточный» в Амурской области и космодроме в Республике Саха (Якутия). С применением БЛА увеличилась эффективность обнаружения ОЧ и сократилось время поисков в несколько раз [2]. Кроме того, для повышения эффективности поисков разрабатываются специализированные мобильные комплексы эксплуатации районов падения ОЧ РН [3, 4]. В качестве примера рассмотрим типовую ситуацию организации поиска ОЧ РН в Вилюйском районе Республики Саха (Якутия) с помощью специализированного мобильного комплекса.

Дальнейшее повышение оперативности обнаружения ОЧ РН возможно путем организации мониторинга районов их падения группой БЛА среднего и дальнего радиусов действия. Поэтому задача предполетного и оперативного планирования полета группы БЛА для обнаружения ОЧ РН в заданных районах падения является актуальной.

В общем случае при организации мониторинга территорий группой БЛА наземных неподвижных объектов зачастую достаточно формирования полетного задания, используя известные сведения об их местоположении [5–7]. 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 согласно расчетам, направление и скорость движения объектов по трассам заранее известны при следующей постановке задачи.

**Постановка задачи.** Необходимо решить задачу по определенным критериям в следующем порядке.

1. Найти решение задачи обслуживания группой БЛА различных наземных объектов трех типов: наземных неподвижных пунктов без заданного графика их наблюдения; подвижных объектов и наземных пунктов, 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  $V_{ц}$  движения по трассам. Общее число  $n$  объектов наблюдения (ОН) задано.

3. Все ОН имеют различную важность. Будем считать, что текущая важность каждого  $i$ -го ОН представляет собой произведение трех параметров:  $d_i$  — заданная априорная постоянная относительная важность;  $b_i$  — текущее значение неопределенности знания об ОН 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 ОН достигается при минимуме остаточной неопределенности о состоянии ОН:

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

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

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

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

Из уравнения (2) следует, 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  $\tau_i$  «необслуживания»  $j$ -го пункта, растущее между соседними по времени контактами с БЛА и обнуляющееся сразу после обслуживания, так как интерес к  $j$ -му объекту в этой ситуации пропадает, определяется согласно уравнению

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

7. При решении задачи предполетного планирования действий БЛА учитываются динамическая важность  $b_j$  ОН, а также их местоположение и графики их наблюдения. Эти графики определяют интервалы обслуживания 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. По мере выполнения полетного задания может изменяться высота их полета. Задана минимальная скорость  $V_{\min}$  пролета над интересующим участком трассы за время  $\Delta t_j$ , а также дана максимальная скорость  $V_{\max}$  перелета от одного участка трассы к другому.

*Требуется:* определить состав наиболее приоритетных наблюдаемых МО в предстоящем вылете группы БЛА, назначить маршруты

облета выбранных объектов каждым БЛА и составить расписание обслуживания МО, попавших в план.

Известные подходы к планированию маршрутов полета летательных аппаратов позволяют решать практические задачи, однако при этом не учитывается ряд новых факторов, в частности важность наблюдаемых МО и соблюдение заданного графика наблюдения [5–7].

**Предлагаемый подход к решению задачи планирования.** При решении задачи рассматривается процесс планирования, содержащий два основных этапа: выбор первоочередного множества ОЧ и целераспределение. Первый этап является новым по сравнению с предыдущими исследованиями, когда приоритетность устанавливалась экспертным путем [8, 9]. Поэтому рассмотрим эту операцию более подробно, анализируя различные случаи.

Пусть в первом случае имеются две ОЧ ( $j = 1$  и  $j = 2$ ), находящиеся на одинаковом расстоянии от одного БЛА, но первая из них ( $j = 1$ ) достигла Земли раньше (в момент  $t_1^*$ ), чем вторая (в момент  $t_2^*$ ). Пусть также время начала поиска будет одинаковы ( $t_1 = t_2$ ) и больше, чем  $t_1^*$  и  $t_2^*$ .

На рис. 1 приведена общая картина обслуживания одним БЛА для двух вариантов: признав первоочередной ОЧ<sub>1</sub>, аппарат полетит в точку  $t_1^*$  либо, признав первоочередной ОЧ<sub>2</sub>, — в точку  $t_2^*$ .

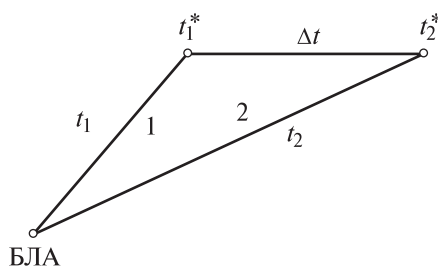


Рис. 1. Схема обслуживания одним БЛА двух отделяющихся частей ракет-носителей

После того как выбор будет сделан, считается, что БЛА перелетит в другое место за время  $\Delta t$ . Тогда для первого случая получим следующие оценки:

$$\tau_1 = t_1 - t_1^*; \quad \tau_2 = t_2 - t_2^*; \quad t_2^* > t_1^*; \quad J_1 = \frac{e^{t_1 - t_1^*} + e^{t_2 - t_2^* - \Delta t}}{2t_1 + \Delta t}.$$

Можно убедиться, что время  $\tau_j$  «остывания» неодинаково, а показатель  $J_1$  будет максимален, если БЛА в первую очередь полетит к той ОЧ, у которой время  $\tau$  «остывания» меньше.

Анализируя результаты расчетов в тех случаях, когда неодинаковы и время перелета  $t_i$ , и время падения  $t_j^*$ , можно убедиться в том, что предпочтение в обслуживании должно быть отдано той ОЧ, у которой отношение вероятности обнаружения к дальности от БЛА  $\frac{P_j}{r_{ij}}$  максимально.

**Формирование множества приоритетных ОН с помощью динамического программирования.** Поставленную в математической форме уравнений (1)–(3) задачу решим с помощью непрерывной формы динамического программирования, согласно которой условию оптимальности соответствует уравнение Беллмана в частных производных [9, 10]:

$$-\frac{d\varepsilon}{dt} = \min_j \left( \sum_{i=1}^n d_i b_i \tau_i + \sum_{i \neq j}^n \left( \left[ \frac{d\varepsilon}{db_i} b_i + \frac{d\varepsilon}{d\tau_i} \tau_i \right] + \left[ \frac{d\varepsilon}{db_j} b_j + \frac{d\varepsilon}{d\tau_j} \tau_j \right] \right) \right) = \quad (4)$$

$$= \min_j F_j(\bar{b}_n, \bar{\tau}_n),$$

где  $\varepsilon(\bar{b}_n, \bar{\tau}_n)$  — искомая функция Беллмана;  $F_j(\bar{b}_n, \bar{\tau}_n)$  — минимизируемая функция риска.

Следует отметить, что  $\sum_{i=1}^n d_i b_i \tau_i$  — подынтегральное выражение  $F_0$  функционала  $J$ ;  $\left[ \frac{d\varepsilon}{db_i} b_i + \frac{d\varepsilon}{d\tau_i} \tau_i \right]$  — относится к ненаблюдаемым в данный момент объектам, а  $\left[ \frac{d\varepsilon}{db_j} b_j + \frac{d\varepsilon}{d\tau_j} \tau_j \right]$  — к наблюдаемому ОН.

Приближенное решение уравнения (4) (не имеющего точного аналитического решения) по аналогии с работами [8, 9] представим функцией Беллмана в виде степенного полинома, ограниченного членами второго порядка:

$$\varepsilon = \alpha + \sum_{i=1}^n \left( \beta_{1i} b_i + \gamma_{1i} \frac{b_i^2}{2} + \beta_{2i} \tau_i + \gamma_{2i} \frac{\tau_i^2}{2} + \psi_i b_i \tau_i \right), \quad (5)$$

где  $\alpha = \text{const}$ ;  $\beta_{1i}, \beta_{2i}, \gamma_{1i}, \gamma_{2i}, \psi_i$  — коэффициенты аппроксимации функции Беллмана, нахождение которых автоматически определит значение динамических приоритетов.

Для того чтобы найти эти коэффициенты, определим частные производные  $\frac{d\varepsilon}{db_i}$  и  $\frac{d\varepsilon}{d\tau_i}$ , входящие в уравнение (4):

$$\frac{d\varepsilon}{db_i} = \beta_{1i} + \gamma_{1i}b_i + \psi_i\tau_i; \quad \frac{d\varepsilon}{d\tau_i} = \beta_{2i} + \gamma_{2i}\tau_i + \psi_ib_i. \quad (6)$$

Подставляя выражения (2), (3) и (6) в уравнение Беллмана (4), получаем

$$\begin{aligned} -\frac{d\varepsilon}{dt} = \max_j & \left\{ \sum_{i=1}^n d_i b_i \tau_i + \sum_{i \neq j}^n [(\beta_{1i} + \gamma_{1i}b_i + \psi_i\tau_i)\lambda_i + \beta_{2i} + \gamma_{2i}b_i + \psi_ib_i] + \right. \\ & \left. + \left[ -(\beta_{1j} + \gamma_{1j}b_j + \psi_j\tau_j) \frac{b_j}{\Delta t} - (\beta_{2j} + \gamma_{2j}\tau_j + \psi_jb_j) \frac{\tau_j}{\Delta t} \right] \right\} = \quad (7) \\ & = \max_j \left\{ \sum_{i \neq j}^n F_i(\bar{b}_{n-1}, \bar{\tau}_{n-1}) + \Pi_j(b_j, \tau_j) \right\}, \end{aligned}$$

где  $\Pi_j(b_j, \tau_j)$  — динамический приоритет, зависящий от текущих переменных  $b_j(t), \tau_j(t)$  и искомым постоянных коэффициентов аппроксимации функции Беллмана. Здесь индекс  $i$  относится к ненаблюдаемым в настоящий момент объектам, а  $j$  — к наблюдаемым объектам, обслуживание которых возможно.

Отметим, что приоритет  $\Pi_j(b_j, \tau_j)$  каждого ОН зависит только от «своих» параметров  $b_j(t), \tau_j(t)$ , а общая важность  $J$  — аддитивная сумма важностей каждого МО, поскольку считается, что их неопределенности изменяются практически независимо друг от друга, т. е. их действия аддитивны.

Известно, что в задачах альтернативного принятия решений коэффициенты функции Беллмана можно найти с помощью метода рабочей точки [8]. Суть предлагаемого подхода состоит в том, что функции риска  $F_j(\bar{b}_n, \bar{\tau}_n)$  представляют степенными полиномами того же порядка, что и функция Беллмана  $\varepsilon$ , ординаты риска  $C_0, C_i^+$  и  $C_i^-, C_{ij}^{++}$  в окрестности рабочей точки вычисляют при условии очевидного предпочтения одной альтернативы  $j$  перед другими.

В работе [8] показано, что по аналогии с методом аналитического конструирования оптимальных регуляторов в установившемся состоянии необходимо обеспечить равенство всех ординат риска друг другу:

$$C_0 = C_i^+ = C_i^- = C_{ij}^{++}. \quad (8)$$

Под *рабочей точкой* будем понимать такую комбинацию возможных значений  $b_j(t), \tau_j(t)$  в  $2N$ -мерном пространстве, при которой нельзя отдать предпочтение ни одной из выбираемых альтернатив  $j$ , а функции риска  $F_i(\bar{b}_n, \bar{\tau}_n)$  будут одинаковы. Покажем это при вычислении конкретных для рассматриваемой задачи ординат  $C_1^+, C_2^+, C_{12}^{++}, C_0, C_1^-, C_2^-$ , достаточных для определения пяти искомых коэффициентов:  $\beta_{1i}, \beta_{2i}, \gamma_{1i}, \gamma_{2i}, \psi_i$ . Начнем с первого простого случая, когда одна из альтернатив явно предпочтительнее других.

Подставляя найденные коэффициенты в формулу (7) для вычисления динамического приоритета  $\Pi_j(b_j, \tau_j)$ , упрощенно представим его в виде произведения трех сомножителей:

$$\Pi_j = d_j(b_j + \lambda_j \Delta t) \left( \tau_j + \frac{\Delta b}{\lambda_j} \right). \quad (9)$$

Согласно действию данного алгоритма, на каждом шаге перелета БЛА в новое место происходит обновление наиболее важной информации, в первую очередь зависящей от априорной важности, во вторую — от времени  $\tau_j$  задержки в наблюдении.

Принципиальным отличием решаемой задачи от известной задачи коммивояжера является учет требуемого графика обслуживания, соблюдение которого существенно влияет на выбор маршрута полета даже одного БЛА. На первом этапе решения задачи рассмотрим особенность предполетного планирования.

**Генетический алгоритм предполетного планирования.** Согласно предлагаемому подходу к решению задачи, при предполетном планировании групповых действий БЛА предусматривается применение высокоэффективного генетического алгоритма маршрутизации вследствие многокритериальности и значительной размерности задачи [8–15].

Суть предлагаемого подхода состоит в том, что весь планируемый маршрут разбивается на несколько участков (блоков), границами которых являются МО, и эти объекты необходимо обслужить в заданном графике. На каждом из участков доминирующим является свой один или два частных критерия: либо важна своевременность, либо — экономичность и т. д. Примеры маршрутизации по доминирующим частным критериям для текущих координат полета БЛА  $x$  и  $y$  показаны на рис. 2.

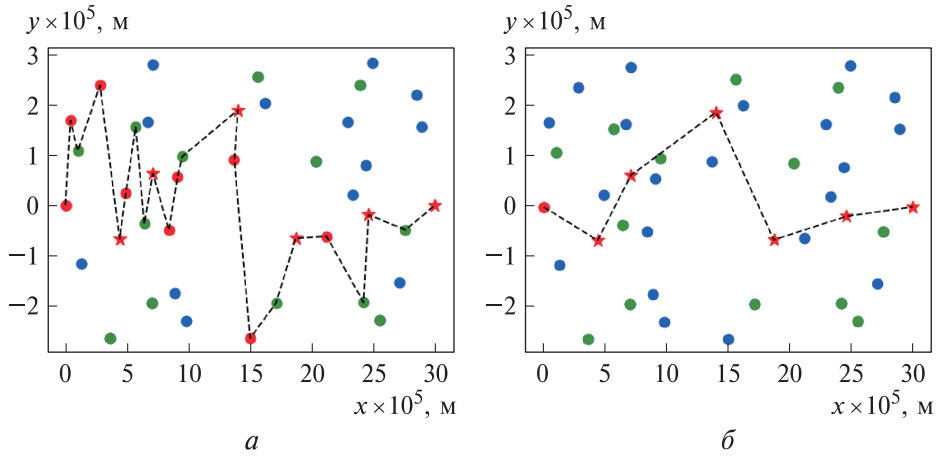


Рис. 2. Примеры маршрутизации полета БЛА по частным критериям:  
 а — максимальная важность; б — минимальное расстояние

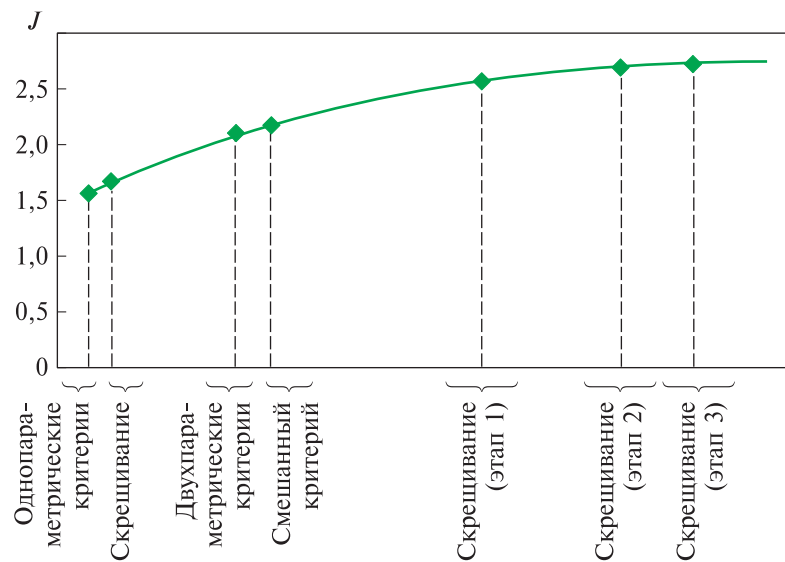


Рис. 3. Результаты оценки алгоритмов планирования маршрутов полета БЛА

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 критерия

$$J_2 = \min_j \frac{r_i}{(B_j + B_{\max})(\Delta t_j + \Delta_0)}, \quad (10)$$



где  $r_i$  — дальность до объекта от текущего местоположения БЛА;  $V_j$  — важность объекта (функция времени);  $\Delta t_j$  — время необслуживания объекта;  $V_{\max}$  — величина максимальной важности;  $\Delta_0$  — вспомогательная константа.

Результаты оценки алгоритмов планирования маршрутов полета БЛА по критерию эффективности (1) представлены на рис. 3.

Компьютерное моделирование показало (см. рис. 3), что особый учет графика обслуживания МО позволил разбить планируемый маршрут на блоки (между  $MO_{j-1}$  и  $MO_j$ ) и тем самым применить процедуры их скрещивания и мутации. Разработанный генетический алгоритм эффективнее на 10...15 % алгоритмов, основанных не только на одно- и двухпараметрическом критериях, но даже и на трехпараметрическом критерии (10), так как выбранный в итоге маршрут состоит из участков, каждый из которых оптимален по «своему» показателю.

**Алгоритм оперативного планирования.** В работе обосновано выполнение оперативного планирования групповых действий БЛА в виде двух разных операций — выбора состава первоочередных ОН (ОЧ) 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 [10–12].

При выполнении второй операции близость между МО и освободившимися от обслуживания БЛА определяется расстоянием между ними, а для занятого БЛА — суммой расстояний от него до обслуживаемой на предыдущем шаге цели и от нее — до планируемой цели на очередном шаге.

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

**Заключение.** Результаты компьютерного моделирования процессов маршрутизации такими способами, как «жадный алгоритм», алгоритм Дейкстры и генетический алгоритм показали, что генетический алгоритм повышает качественное содержание планирования на 15...20 %.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что предложенный подход к обслуживанию мобильных объектов может служить эффективным дополнением к известному подходу обнаружения наземных объектов при облете группой БЛА террито-

рии на заданной площади. Более того, автоматизация представления результатов планирования на экране позволяет повысить наглядность разработанных планов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00652 а*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Районы падения. Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры. URL: <http://www.russian.space/298/> (дата обращения 22.11.2019).
- [2] Поиск отработавших ступеней ракет с помощью беспилотников ZALA. Группа компаний ZALA AERO. URL: <http://zala.aero/poisk-otrabotavshix-stupenej-raket-s-pomoshhyu-bespiilotnikov-zala/> (дата обращения 22.11.2019).
- [3] Костылев Г.М., Ожигова А.В., Шатров Я.Т. Логистическая модель построения комплекса средств эксплуатации районов падения отделяющихся частей ракет-носителей. *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*, 2014, № 8, с. 31–38.
- [4] 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/774746/2018> (дата обращения 22.11.2019).
- [5] Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Царев А.В., Степанов М.Е., Жиляев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли. *Информационно-управляющие системы*, 2013, № 1, с. 16–26.
- [6] Заплетин М.П., Жакыпов А.Т. Планирование миссии космического аппарата дистанционного зондирования Земли на основе открытых исходных данных. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 6 (90). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-6-1892>
- [7] Грумондз В.Т., Карпежников Е.И., Полищук М.А. Групповое применение беспилотных планирующих летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-11-1702>
- [8] Лебедев Г.Н., Ефимов А.В., Мирзоян Л.А. Метод маршрутизации облета неподвижных объектов при мониторинге наземной обстановки на основе динамического программирования. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2012, № 1, с. 63–70.
- [9] Lebedev G., Goncharenko V., Mikhaylin D., Rumakina A. Aircraft group coordinated flight route optimization using branch-and-bound procedure in resolving the problem of environmental monitoring. *2017 Seminar on Systems Analysis. Moscow, Russia, February 14–15, 2017. ITM Web of Conferences*, 2017, vol. 10. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171001003>
- [10] Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Математический метод расчета целевой функции на графах и решение задачи маршрутизации. *Труды МАИ*, 2017, вып. 96, с. 1–29. URL: [http://trudymai.ru/upload/iblock/9c1/Allilueva\\_Rudenko\\_rus.pdf?lang=ru&issue=96](http://trudymai.ru/upload/iblock/9c1/Allilueva_Rudenko_rus.pdf?lang=ru&issue=96)

- [11] Zadeh S.M., Powers D., Sammut K., Lammas A., Yazdani A.M. Optimal Route Planning with Prioritized Task Scheduling for AUV Missions. *IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors*, 2016, 8 p.  
URL: <https://arxiv.org/abs/1604.03303> (дата обращения 28.12.2019).
- [12] Darrah M.A., Niland W.M., Stolarik B.M., Walp L.E. Increased UAV task assignment performance through parallelized genetic algorithms. *Proceedings of Infotech@Aerospace Conference*, Rohnert Park, CA, 2007, pp. 1–10.  
URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a461621.pdf> (дата обращения 02.12.2018).
- [13] 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.
- [14] 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
- [15] 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.

Статья поступила в редакцию 14.02.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гончаренко В.И., Лебедев Г.Н., Михайлин Д.А. Планирование поиска отделяющихся частей ракеты-носителя с помощью группы беспилотных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-12-2040>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLIV Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Королёвские чтения — 2020), Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 28–31 января 2020 г.*

**Гончаренко Владимир Иванович** — д-р техн. наук, директор Военного института Московского авиационного института (национального исследовательского университета). e-mail: [vladimirgonch@mail.ru](mailto:vladimirgonch@mail.ru)

**Лебедев Георгий Николаевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета). e-mail: [kaf301@mai.ru](mailto:kaf301@mai.ru)

**Михайлин Денис Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета). e-mail: [tau\\_301@mail.ru](mailto:tau_301@mail.ru)

## Planning the search for separating parts of the launch vehicle using a group of unmanned aerial vehicles

© V.I. Goncharenko<sup>1,2</sup>, G.N. Lebedev<sup>1</sup>, D.A. Mikhailin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute, Moscow, 123995, Russia

<sup>2</sup>V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russia

*The paper deals with the processes of maintaining a special class of mobile objects, whose schedules are either given or require preassignment in order to maintain these objects at the right time and in the right place. The posed problem of planning the flight of a group of aerial vehicles is solved using a continuous form of dynamic programming, according to which the Bellman equation in partial derivatives corresponds to the optimality condition. An original approach to solving the problem of pre-flight and operational planning of actions of a group of unmanned aerial vehicles based on a genetic algorithm is proposed. The fundamental difference between the problem being solved and the well-known traveling salesman problem is in taking into account the required maintenance schedule. The developed planning automation tool makes it possible to increase the efficiency of measures to detect separating parts of launch vehicles using a group of unmanned aerial vehicles. Findings of research show that the developed genetic algorithm is better not only than algorithms based on one-parameter and two-parameter criteria, but even better than algorithms based on a three-parameter criterion.*

**Keywords:** detachable part of the launch vehicle, group of unmanned aerial vehicles, genetic algorithm, multi-criteria optimization

*The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project no. 20-08-00652 a*

### REFERENCES

- [1] Rayony padeniya [Fall areas]. *Tsentr ekspluatatsii obeektov nazemnoy kosmicheskoy infrastruktury* [Center for Operation of Ground-Based Space Infrastructure Facilities]. Available at: <http://www.russian.space/298/> (accessed November 22, 2019).
- [2] Poisk otrabotavshikh stupeney raket s pomoschyu bespilotnikov ZALA [Search for spent rocket stages using ZALA unmanned aerial vehicles]. *Gruppa kompaniy ZALA AERO* [ZALA AERO Group of Companies]. Available at: <http://zala.aero/poisk-otrabotavshix-stupeney-raket-s-pomoshhyu-bespilotnikov-zala/> (accessed November 22, 2019).
- [3] Kostylev G.M., Ozhigova A.V., Shatrov Ya.T. *Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskij zhurnal "Polet" (Flight)*, 2014, no. 8, pp. 31–38.
- [4] Raboty v rayone padeniya otdelyayuschikhsiya chastey rakety-nositelya prodolzhayutsia v Yakutii: Vchera s kosmodroma «Vostochny» Amurskoy oblasti sovershen pusk rakety-nositelya «Soyuz-2» [Work in the area of the fall of the separating parts of the launch vehicle continues in Yakutia: Yesterday the launch of the Soyuz-2 launch vehicle was performed from the Vostochny cosmodrome in the Amur Region]. *YakutiaMedia*. Available at: <https://yakutiamedia.ru/news/774746/>. 2018 (accessed November 22, 2019).
- [5] Sollogub A.V., Skobelev P.O., Simonova E.V., Tsarev A.V., Stepanov M.E., Zhiliaev A.A. *Informatsionno-upravlyayuschie sistemy — Information and Control Systems*, 2013, no. 1, pp. 16–26.

- [6] Zapletin M.P., Zhakypov A.T. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, no. 6 (90). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-6-1892
- [7] Grumondz V.T., Karpezhnikov E.I., Polischuk M.A. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-11-1702>
- [8] Lebedev G.N., Efimov A.V., Mirzoyan L.A. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie — Mechatronics, Automation, Control*, 2012, no. 1, pp. 63–70.
- [9] Lebedev G., Goncharenko V., Mikhaylin D., Rumakina A. Aircraft group coordinated flight route optimization using branch-and-bound procedure in resolving the problem of environmental monitoring. 2017 Seminar on Systems Analysis. Moscow, Russia, February 14–15, 2017. *ITM Web of Conferences*, 2017, vol. 10. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20171001003>
- [10] [10] Allilueva N.V., Rudenko E.M. *Trudy MAI (Proceedings of MAI)*, 2017, no. 96, pp. 1–29. Available at: [http://trudymai.ru/upload/iblock/9c1/Allilueva\\_Rudenko\\_rus.pdf?lang=ru&issue=96](http://trudymai.ru/upload/iblock/9c1/Allilueva_Rudenko_rus.pdf?lang=ru&issue=96).
- [11] Zadeh S.M., Powers D., Sammut K., Lammas A., Yazdani A.M. Optimal Route Planning with Prioritized Task Scheduling for AUV Missions. *IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors*, 2016, 8 p. Available at: <https://arxiv.org/abs/1604.03303> (accessed December 28, 2019).
- [12] Darrach M.A., Niland W.M., Stolarik B.M., Walp L.E. Increased UAV task assignment performance through parallelized genetic algorithms. *Proceedings of Infotech@Aerospace Conference*, Rohnert Park, CA, 2007, pp. 1–10. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a461621.pdf> (accessed December 2, 2018).
- [13] Lebedev G.N., Goncharenko V.I., Rumakina A.V. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie — Mechatronics, Automation, Control*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 783–791.
- [14] Goncharenko V.I., Lebedev G.N., Mikhaylin D.A. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya — Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2019, no. 1, pp. 153–165. DOI: 10.1134/S0002338819010074
- [15] Lebedev G.N., Goncharenko V.I., Tsareva O.Yu., Mikhaylin D.A. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy — Herald of computer and information technologies*, 2019, no. 2, pp. 3–12.

**Goncharenko V.I.**, Dr. Sc. (Eng.), Director, Military Institute MAI.  
e-mail: vladimirgonch@mail.ru

**Lebedev G.N.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Automatic and Intelligent Control Systems, Moscow Aviation Institute. e-mail: kaf301@mai.ru

**Mikhaylin D.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Automatic and Intelligent Control Systems, Moscow Aviation Institute. e-mail: tau\_301@mail.ru