

ОПЕРАТИВНЫЙ ПОИСК ОТДЕЛЯЕМЫХ ЧАСТЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Гончаренко В.И.^{1,2}, Лебедев Г.Н.¹, Михайлин Д.А.¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

²Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук
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 оперативность мероприятий по обнаружению отделяющихся частей ракет-носителей с помощью группы беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: отделяющаяся часть ракеты-носителя, обнаружение отделяющихся частей, группа беспилотных летательных аппаратов, генетический алгоритм, многокритериальная оптимизация.

Введение

Одной из важных областей эксплуатации авиационно-космических крупномасштабных организационно-технических комплексов является выведение на орбиты космических аппаратов (КА) средствами космодромов [1-3]. Выведение на орбиты КА сопровождается падением на Землю отделяющихся частей (ОЧ) ракет-носителей (РН) (стартовые ускорители, отработавшие ступени, головные обтекатели, соединительные и хвостовые отсеки ступеней и т.п.). Размеры и местоположение районов падения (РП) этих частей для каждой ракеты-носителя определяются требованиями к орбитам КА, их массой, энергетическими характеристиками РН.

До недавнего времени для поиска отделяющихся частей ракеты-носителей 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, 5]. Поэтому активно внедряются современные технологии поиска отработавших ступеней ракет на основе беспилотных летательных аппаратов (БЛА), например, на космодроме «Восточный», в Амурской области и Республике Саха (Якутия). 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]. В качестве примера на рис. 1 иллюстрируется типовая ситуация организации поиска ОЧ РН в Вилюйском районе Республики Саха (Якутия) с помощью специализированного мобильного комплекса.

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 предполётного 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.

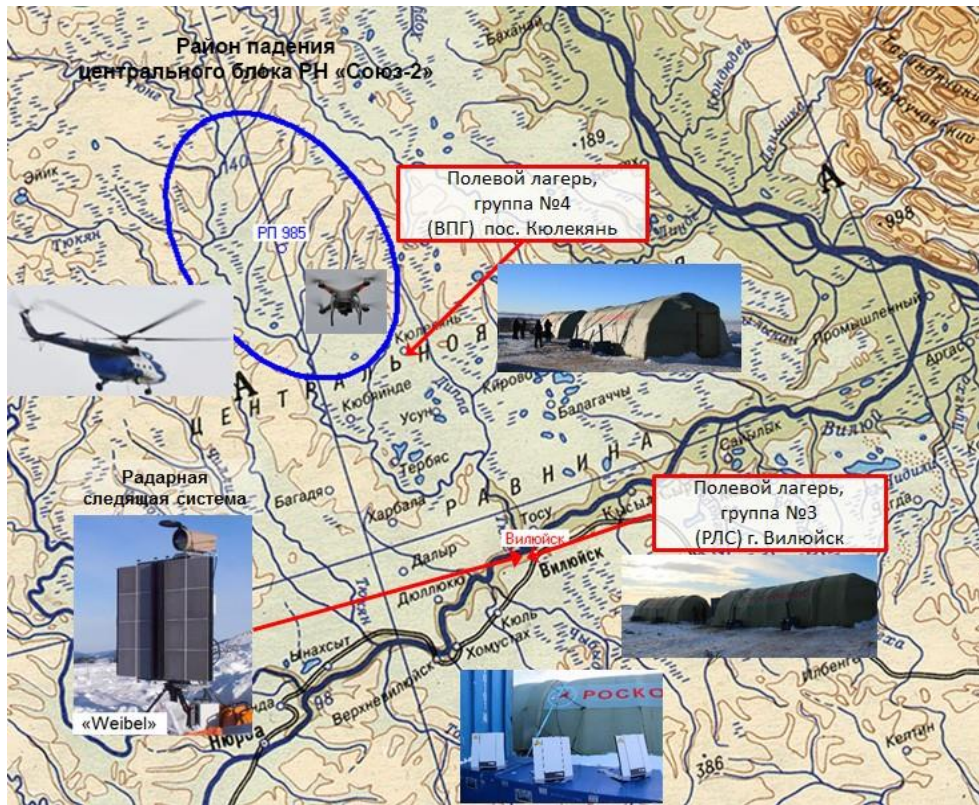


Рис. 1. Типовая ситуация организации поиска ОЧ РН в Вилюйском районе Республики Саха (Якутия)

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 типов, – 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 ψ и скорость $V_{ц}$ 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; τ_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:

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

где T – конечный момент времени;

t – время функционирования.

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

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

где λ_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 λ_i , как принято в данной работе, но эта скорость у разных ОН неодинакова и соответствует его персональным динамическим свойствам.

6. Время отсутствия контроля объекта τ_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:

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

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 Δt_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 Δt_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 Формирование множества приоритетных объектов наблюдения с помощью динамического программирования

Поставленную в математической форме уравнений (1) – (3) задачу решим с помощью непрерывной формы динамического программирования, согласно которому условию оптимальности соответствует уравнение Беллмана в частных производных [9, 10]

$$(4) \quad -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \min_j \left(\sum_{i=1}^n d_i b_i \tau_i + \sum_{i \neq j} \left(\left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial b_i} \dot{b}_i + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau_i} \dot{\tau}_i \right] + \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial b_j} \dot{b}_j + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau_j} \dot{\tau}_j \right] \right) \right) = \min_j F_j(\bar{b}_n, \bar{\tau}_n),$$

где $\varepsilon(\bar{b}_n, \bar{\tau}_n)$ – искомая функция Беллмана;

$F_j(\bar{b}_n, \bar{\tau}_n)$ – минимизируемая функция риска.

Необходимо подчеркнуть, что $\sum_{i=1}^n d_i b_i \tau_i$ – подынтегральное выражение F_0 функционала J ;

$\left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial b_i} \dot{b}_i + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau_i} \dot{\tau}_i \right]$ – относится к ненаблюдаемым в данный момент объектам, а $\left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial b_j} \dot{b}_j + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau_j} \dot{\tau}_j \right]$ – к наблюдаемому ОН.

Приближенное решение уравнения (4) (не имеющего точного аналитического решения) по аналогии с [11-19] представим функцией Беллмана в виде степенного полинома, ограниченного членами второго порядка,

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

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 нахождения данных коэффициентов определим частные производные $\frac{\partial \varepsilon}{\partial b_i}$ и $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau_i}$, входящие в уравнение (4):

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

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

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

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

При этом важно подчеркнуть, 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 есть аддитивная сумма важностей каждого МО, поскольку считается, что их неопределенности меняются практически независимо друг от друга, то есть их действия аддитивны.

Известно, что в задачах альтернативного принятия решений коэффициенты функции Беллмана можно найти с помощью метода рабочей точки [9]. Сущность предлагаемого подхода состоит в том, что функции риска $F_j(\bar{b}_n, \bar{\tau}_n)$ представляются степенными полиномами того же порядка, что и функция Беллмана ε , ординаты риска C_0, C_i^+ и C_i^-, C_{ij}^{++} в окрестности рабочей точки вычисляются в предположении очевидного предпочтения одной альтернативы j перед другими.

В [9] показано, что по аналогии с методом аналитического конструирования оптимальных регуляторов, в установившемся состоянии необходимо обеспечить равенство всех ординат риска друг другу:

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

Под *рабочей точкой* будем понимать такую комбинацию возможных значений $b_j(t)$, $\tau_j(t)$ в $2N$ -мерном пространстве, при которой нельзя отдать предпочтения 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 данной задачи ординат $C_1^+, C_2^+, C_{12}^{++}, C_0, C_1^-, C_2^-$, достаточных для определения пяти искомых коэффициентов $\beta_{1i}, \beta_{2i}, \gamma_{1i}, \gamma_{2i}, \psi_i$, начав с первого простого случая, когда одна из альтернатив явно предпочтительнее других.

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

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

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 – времени τ_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 особенности предполетного планирования.

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. (примеры маршрутизации по доминирующим частным критериям показаны на рис. 2).

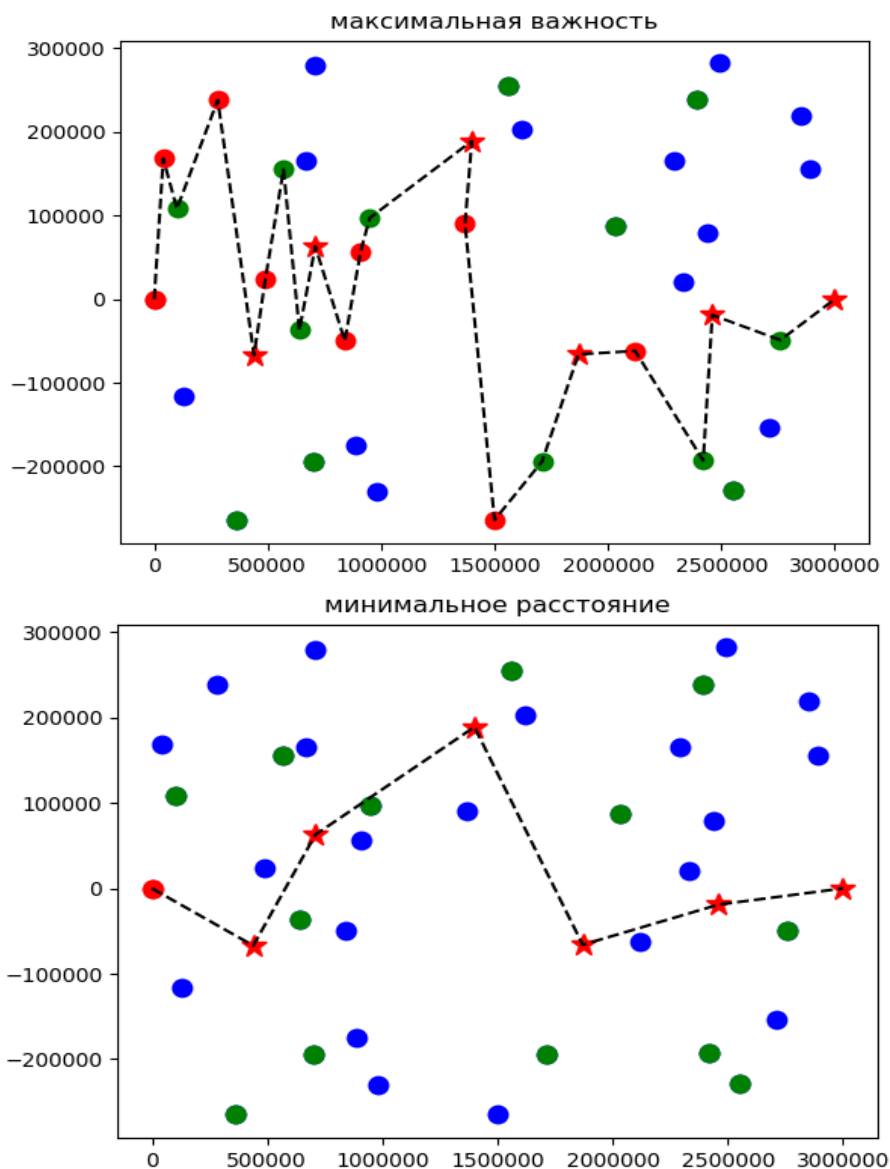


Рис. 2. Примеры маршрутизации полета по частным критериям

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.

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:

$$(10) J_4 = \min \frac{r_i}{(B_i + B_{\max})(\Delta t_j + \Delta_0)}$$

Сравнительный анализ эффективности алгоритмов маршрутизации представлен на рис. 3.

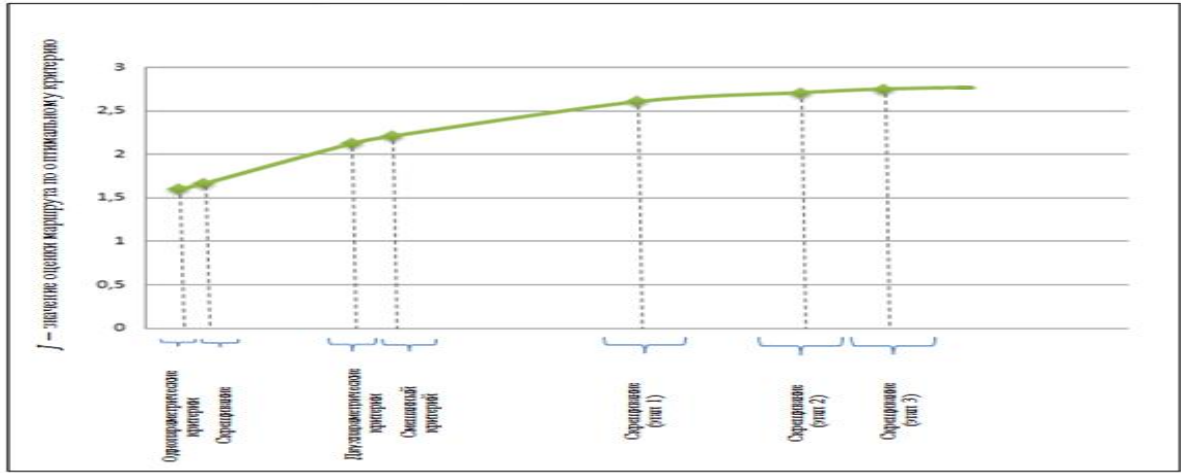


Рис. 3. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов маршрутизации

Компьютерное моделирование показало (см. рис. 3), что особый учет графика обслуживания мобильных объектов позволил разбить планируемый маршрут на блоки (между MO_{j-1} и MO_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 (10), так как в итоге выбранный маршрут состоит их участков, каждый из которых оптимален по «своему» показателю.

3 Алгоритм 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].

Структурная схема алгоритма оперативного назначения БЛА представлена на рис. 4.

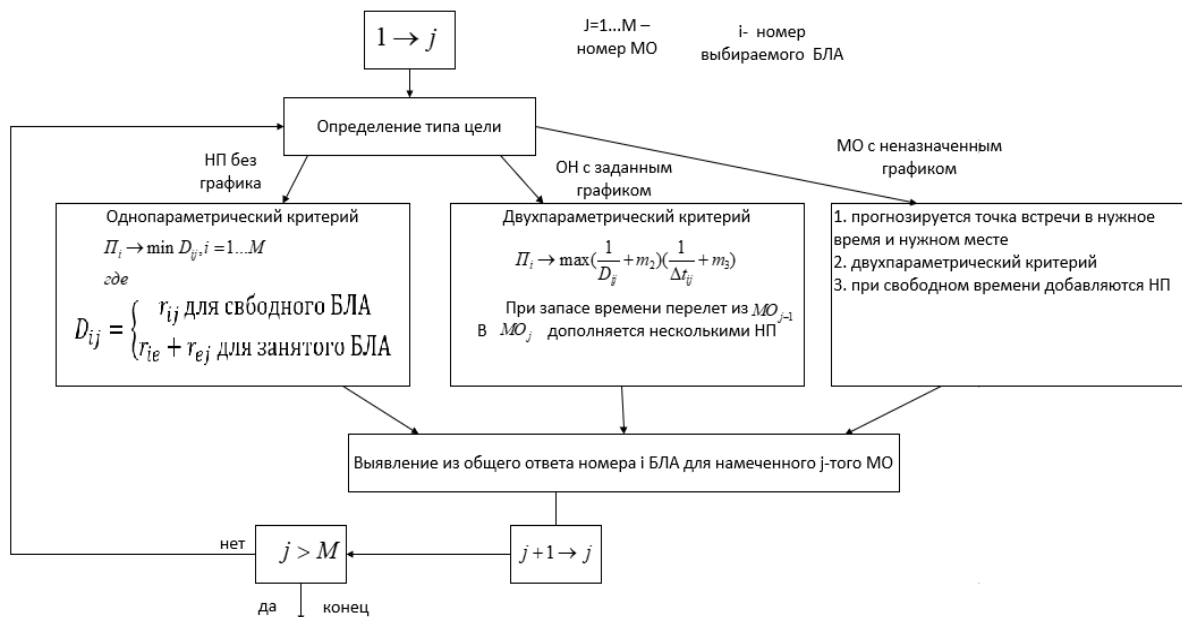


Рис. 4. Структурная схема оперативного назначения БЛА для каждой цели

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 неё – до планируемой цели на очередном шаге.

Для представленной на рис. 1 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.

Заключение

Сравнительные 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 состоит в том, что предложенный подход к обслуживанию МО является полезным дополнением к известному подходу обнаружения наземных объектов при облете группой БЛА территории на заданной площади. Более того, автоматизация представления результатов планирования на экране позволяет повысить наглядность разработанных планов.

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-bes-pilotnikov-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/Sozдание-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. 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.
10. 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 // 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>.
11. 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.

12. *Zadeh S. M., Powers D., Sammut K.* Optimal Route Planning with Prioritized Task Scheduling for AUV Missions Article, University, Adelaide, SA 5042, Australia, 2016. P. 1 – 8. URL: <https://www.researchgate.net/publication/301816813.pdf> (дата обращения: 25.08.2018).
13. *Marjorie A. Darrach, William M. Niland, Brian M. Stolarik, Lance E. Walp.* 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).
14. *Лебедев Г. Н., Мирзоян Л.А., Ефимов А. В.* Нейросетевое планирование групповых действий ЛА при наблюдении заданной группы подвижных объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 60 – 65.
15. *Лебедев Г. Н., Гончаренко В. И., Румакина А.В.* Нейросетевая двумерная маршрутизация полета летательных аппаратов с помощью модифицированного метода ветвей и границ // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2017. № 7. С. 49-57.
16. *Лебедев Г. Н., Михайлин Д. А.* Экспертная система распределения целей с помощью нейронной сети // Моделирование авиационных систем: сборник тезисов докладов III Всероссийской научно-технической конференции. М.: ГосНИИАС. 2018. С. 330.
17. *Лебедев Г. Н., Гончаренко В. И., Румакина А.В.* Модификация метода ветвей и границ для двумерной маршрутизации координированного полета группы летательных аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управления. 2016, том. 17. №11. С. 783-791.
18. *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.
19. *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.