

УДК 629.7

АЛГОРИТМ СЛУЧАЙНОГО НАПРАВЛЕННОГО ПОИСКА ЭФФЕКТИВНЫХ ПЛАНОВ АВТОНОМНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А.В. Гордеев, А.Н. Павлов, Д.Ю. Колесник (Санкт-Петербург)

Введение

Круг потенциальных потребителей космической информации постоянно возрастает, и обеспечить эти возрастающие потребности без повышения эффективности использования космических ресурсов, например, только за счет наращивания космической группировки, невозможно. Альтернативой традиционной стратегии планирования является переход на автономное планирование работы спутников бортовыми средствами, когда система планирования обладает полной и достоверной информацией как о состоянии и загрузке ресурсов, так и о задачах наблюдения, подлежащих решению.

Сложность задачи обслуживания группового объекта МКА ДЗЗ, обусловленная планированием переориентации оптической оси с одной точки поверхности Земли на другую, отражено в работе [1].

Сложность задачи также определяется и возможностями МКА нового поколения, которые могут достаточно быстро изменять параметры ориентации по углам крена и тангажа, как показано на рисунке 1 [7, 8]. В англоязычной литературе такие спутники называются как agile. Возможные переводы на русский язык: маневренный, проворный, быстрый, поворотливый [9, 10].

При расчете плана требуется учесть состояние восполняемых ресурсов, заряда аккумуляторной батареи (АКБ), а также затраты времени на ориентацию спутника / камеры на очередной объект наблюдения [2, 3].

Постановка задачи планирования

Рассматривается модель космической системы, в которой спутники группировки описываются следующей информацией:

- TLE параметры, определяющие орбитальное построение ОГ МКА ДЗЗ [4];
- тип и технические параметры устройства наблюдения, установленного на МКА;
- в модели работы спутника рассматриваются следующие типы операций:
 - сеанс наблюдения (включение устройства наблюдения и регистрация получаемого изображения в памяти спутника);
 - перенацеливание оптической оси по тангажу и по крену (углы β и γ);
- модель АКБ, в которой задаются:
 - максимальный и минимально допустимый уровень заряда АКБ;
 - восстановление заряда АКБ в единицу времени при нахождении МКА ДЗЗ на солнечной стороне орбиты;
 - расход энергии АКБ в единицу времени при выполнении операций рассматриваемых типов (угловые маневры, выполнение съемки);
- минимально допустимый интервал времени между двумя последовательными включениями аппаратуры наблюдения.

Заметим, что в модели АКБ параметры скорости расходования заряда электроэнергии задаются в зависимости от типа исполняемой операции [5, 6].

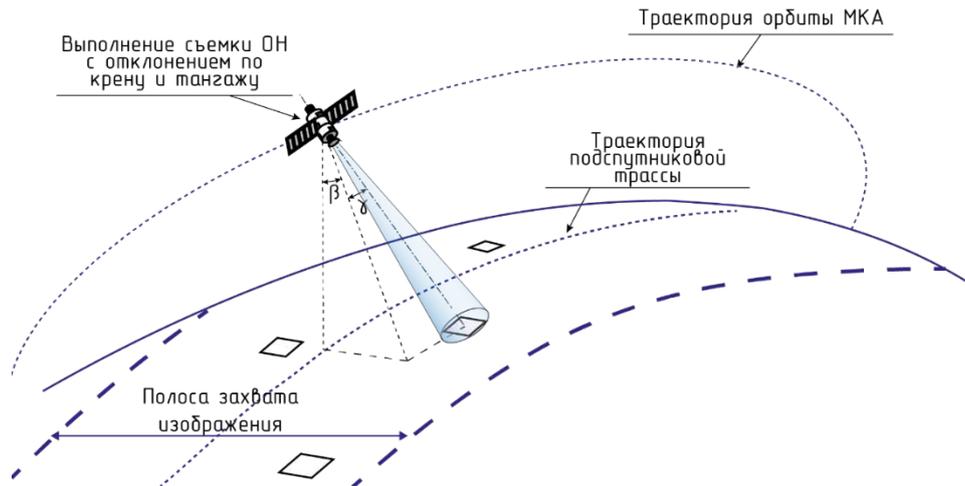


Рис. 1 – Выполнение точечной съёмки маневренным МКА.

Основной трудностью задачи планирования съемок в случае agile МКА является учет временных ограничений и зависимостей (рисунок 2), которые можно пояснить следующим образом. Необходимо учесть:

- самый ранний и самый поздний моменты времени видимости цели с учетом возможностей вращения МКА по углу тангажа;
- возможное время начала и окончания съемки цели;
- требуемые параметры ориентации МКА при начале и окончании съемки цели на моменты времени начала и окончания съемки цели.

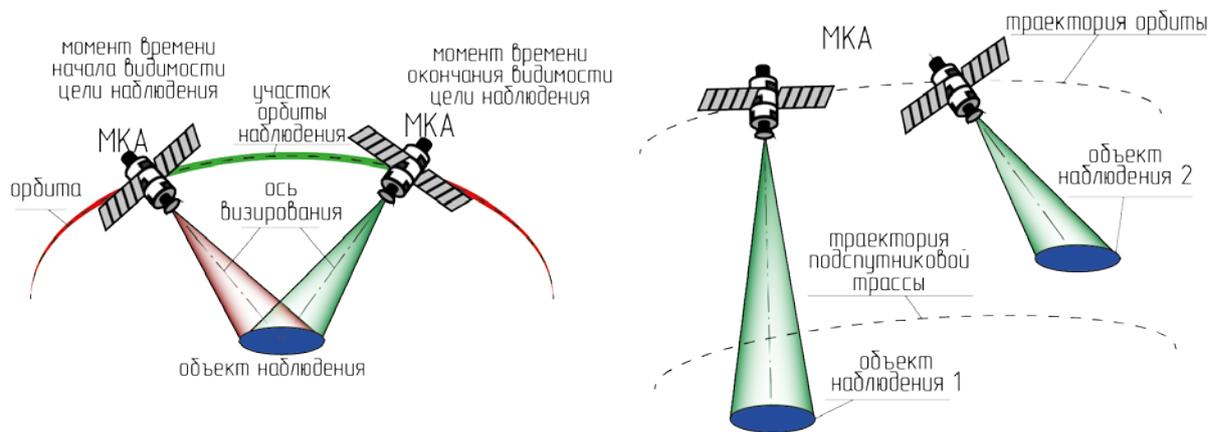


Рис. 2 – Специфика временных ограничений и зависимостей маневренных КА

При определении целевых функций, как правило, рассматриваются следующие показатели: количество снятых целей, приоритеты наблюдений, качество получаемых данных, своевременность и степень полноценности выполнения заявок. Полноценность выполнения заявок определяется в зависимости от пространственных свойств целей. В случае площадных районов наблюдений полноценность, как правило, определяется процентом снятой площади, в случае точечных целей – количеством наблюдений.

Операционными ограничениями в задаче являются временные ограничения и ограничения ресурсов МКА (энергия, память). Основными временными ограничениями

являются окна времени видимости целей и время, необходимое на переориентацию МКА между последовательными съемками.

Учет восполняемых ресурсов, электроэнергии и памяти, как правило, осуществляется следующим образом. Полагается, что на каждом витке орбиты МКА восполняет определенный, один и то же объем энергии, и после каждого витка орбиты МКА имеет возможность передачи всех полученных данных на Землю. Исходя из этого, определяется максимально возможное количество наблюдений, которое МКА может выполнить в рамках одного витка орбиты.

Описание алгоритма поиска эффективного плана обслуживания групповой цели

Для планирования работы целевой аппаратуры МКА ДЗЗ групповая цель рассчитывается потенциал наблюдения за планируемый промежуток времени. Затем производится направленный случайный поиск варианта обхода (последовательного наблюдения объектов групповой цели) [11, 12]. Блок-схема алгоритма такого поиска приведена на рисунке 3.

Для оценивания возможности проведения наблюдения групповой цели, каждый отдельный объектов групповой цели проверяется на попадание в полосу обзора каждого отдельного МКА из состава ОГ.

Для преодоления критериальной неопределенности воспользуемся комбинированным методом построения псевдоуниверсальной (аддитивно-мультипликативной) свертки показателей (в рассматриваемой задаче расход энергоресурса и суммарная значимость полученной информации об объектах групповой цели), в основе которого лежат метод теории планирования экспериментов и продукционные модели представления экспертных знаний [13, 14].

Возможный вариант наблюдения групповой цели, состоящей из l ОН, включает: начальное положение оптической оси на момент времени t_0 , которое однозначно определяется как $x_0(t_0)$, в общем случае направление от центра масс МКА к его подспутниковой точке; очередной ОН, $u_{ij}(t_j)$ – управление, необходимое для перенацеливания оптической оси МКА из точки x_i в x_j на момент времени t_j .

Поиск производится итерационно. Задаётся число M проводимых испытаний (так, чтобы поиск оптимального/субоптимального плана не превосходил заданного/необходимого времени).

Далее производится вычисление допустимых ОН для наблюдения на текущее время (модельное). Для этого пересчитывается матричная функция следующего вида:

$$U(t) = \|u_{ij}(t)\|, \text{ где } i, j \in \overline{0, l}; u_{ij}(t) = \begin{cases} 0, & \text{невозможно произвести наблюдение ОН} \\ 1, & \text{если } \varphi_{ij}(t) \leq \varphi_{max} \end{cases} \quad (1)$$

Интервал $[0, 1]$ разбивается так, чтобы координаты концов подинтервалов образовывало последовательность $\{0, p_1 = q_1; q_1, p_2 = p_1 + q_2; \dots; q_{l-1}, p_l = p_{l-1} + q_l = 1\}$, где $q_n = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^l \Delta F_{ij}(t_{\text{тек}})$, где $G = \sum_j \Delta F_{ij}(t_{\text{тек}})$. $\Delta F_{ij}(t_{\text{тек}})$ – приращение целевой функции от перехода с i -ого ОН на j -ый ОН на текущий момент времени $t_{\text{тек}}$. При этом каждому возможному перенацеливанию оптической оси МКА ставится в соответствии свой подинтервал $[p_{j-1}, p_j]$, длина которого тем больше, чем больше приращение целевой функции.

Поиск оптимального плана обслуживания групповой цели происходит таким образом, чтобы ОН, которому при перенацеливании с текущего ОН соответствует большее приращение $\Delta F_{ij}(t_{\text{тек}})$, соответствует большая вероятность выбора.

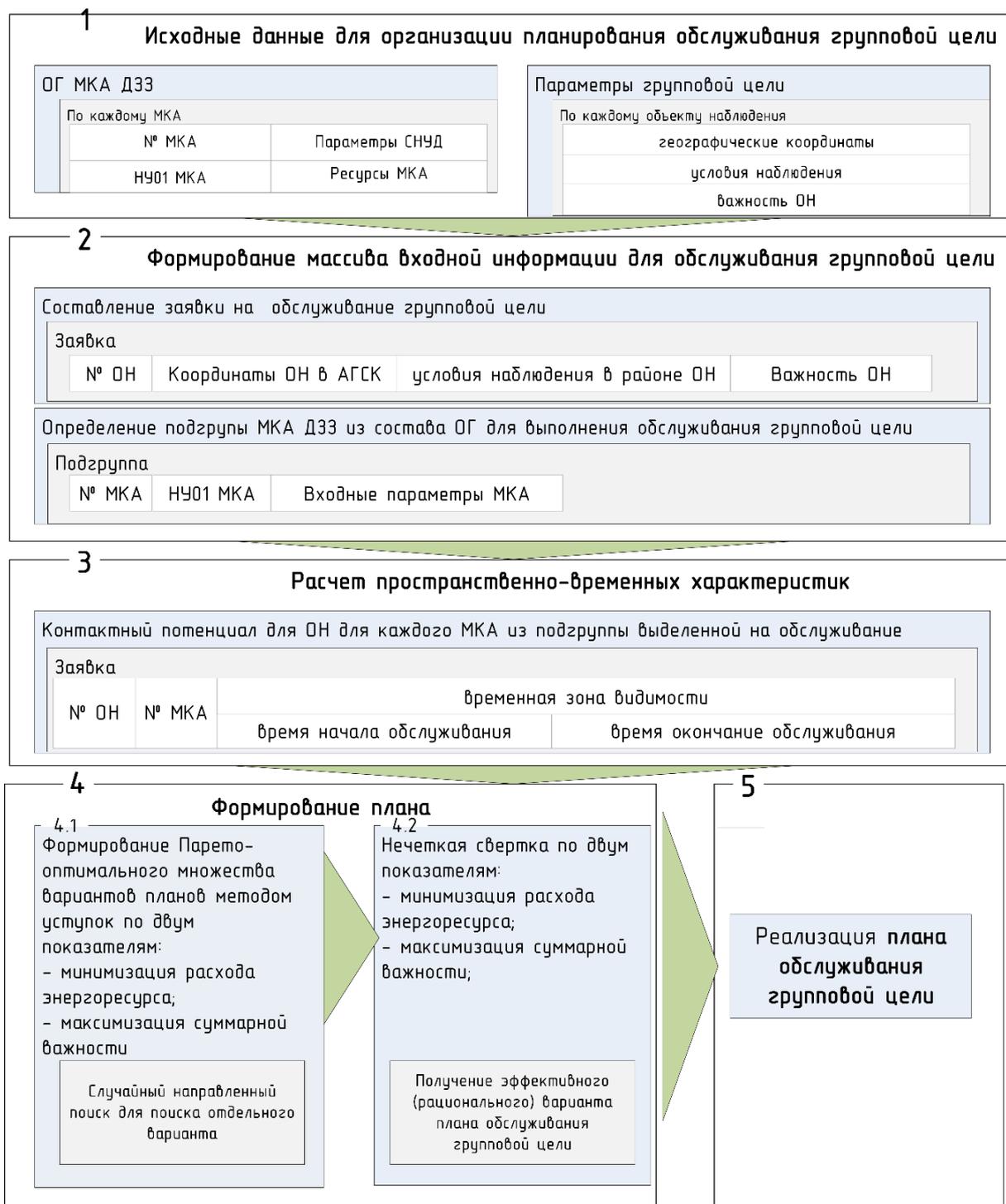


Рис. 3 – Схема алгоритма поиска эффективного плана обслуживания групповой цели

Для этого вводится в рассмотрение случайная величина, подчиненная равномерному закону распределения на промежутке $[0,1]$, конкретное значение которого при случайном выборе попадает, например, в некоторый подинтервал $[p_{j-1}, p_j]$, где $j = \overline{1, l}$.

Тем самым определятся выбор следующего ОН. После произведенного выбора производится приращение $F_{\text{тек}} = F_{\text{тек}} + \Delta F_{jk}(t_{\text{тек}})$. Модельное время также необходимо увеличить на время, необходимое на разворот оптической оси МКА $t_{\text{тек}} = t_{\text{тек}} + \tau_{ij}(\varphi_{ij}(t_{\text{тек}}))$.

На следующем шаге необходимо произвести усечение множества необслуженных ОН удалением из него обслуженного ОН.

Процесс продолжается до тех пор пока $t_{\text{тек}}$ не превысит времени промежутка моделирования или все ОН будут обслужены.

В результате выполнения М экспериментов на выходе будет получен маршрут обслуживания групповой цели $\pi^* = \{(x_0, x_l, t_0), (x_l, x_v, t_l), \dots\}$ с наибольшим значением целевой функции F^* .

Результаты моделирования разработанного алгоритма

Технические характеристики для баллистических расчётов и построения маршрутов обхода ОН групповой цели взяты из описания МКА ДЗЗ [10]. При проведении вычислительных экспериментов использовались характеристики целевой аппаратуры детального наблюдения за поверхностью Земли.

Под «Фиктивной целью» следует понимать направление оптической оси МКА на Землю в момент времени перехода из солнечной ориентации в трехосную стабилизацию, что необходимо для проведения съёмки земной поверхности. Аналогичным образом понимается смена режима после завершения съёмки земной поверхности.

Пусть групповая цель состоит из 8 ОН, а ОГ МКА ДЗЗ из 2 КА. В результате обработки баллистических данных получены основные базисные множества решаемой задачи (таблица 1).

Таблица 1 – Основные базисные множества

| Наименование | Обозначение | Значение |
|--|-----------------|---|
| Множество ОН (значение их значимости) | A | [0, 1, 2, 3, 1, 3, 5, 5, 9, 0], |
| Вероятность безотказной работы СУД МКА | КА ₀ | 0.9873 |
| | КА ₁ | 0.97881 |
| коэффициенты условий съёмки μ | КА ₀ | [0.98, 0.978, 0.9451, 0.9451, 0.9861, 0.91, 0.991, 0.991, 0.9981, 0.91] |
| | КА ₁ | [0.91, 0.991, 0.991, 0.9981, 0.91, 0.98, 0.978, 0.9451, 0.9451, 0.9861] |
| Матрица достижимости Θ | КА ₀ | [0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] |
| | КА ₁ | [0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1], |

| | | |
|-----------------------------------|-----|---|
| | | [0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] |
| Матрица затрат энергоресурса Λ | КА0 | [0, 180.24, 213.60, 255.60, 436.80, 238.80, 274.80, 138.59, 338.40, 120], [0, 0, 188.31, 230.40, 462, 264, 249.60, 177.30, 313.20, 180.24], [0, 0, 0, 198, 494.40, 296.40, 217.20, 211.20, 280.80, 213.60], [0, 0, 0, 0, 536.40, 338.40, 172.58, 253.20, 238.80, 255.60], [0, 0, 0, 0, 0, 354, 555.60, 439.20, 619.20, 436.80], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 357.60, 241.20, 421.20, 238.80], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 272.40, 219.60, 274.80], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 336, 138.59], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 338.40], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] |
| | КА1 | [0, 180.24, 213.60, 255.60, 436.80, 238.80, 274.80, 138.59, 338.40, 120], [0, 0, 188.31, 230.40, 462, 264, 249.60, 177.30, 313.20, 180.24], [0, 0, 0, 198, 494.40, 296.40, 217.20, 211.20, 280.80, 213.60], [0, 0, 0, 0, 536.40, 338.40, 172.58, 253.20, 238.80, 255.60], [0, 0, 0, 0, 0, 354, 555.60, 439.20, 619.20, 436.80], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 357.60, 241.20, 421.20, 238.80], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 272.40, 219.60, 274.80], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 336, 138.59], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 338.40], [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0] |

В результате решения частных оптимизационных задач построено множество парето-оптимальных решений, каждое из которых оценено с использованием значения результирующего полинома. Полученные решения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результат вычислительного эксперимента

| Вариант плана обслуживания групповой цели | | | Суммарная значимость обслуживаемых ОН | Остаток энергоресурса | Перекодированные значения в шкале [-1,1] | | Значение свертки показателей |
|---|-----------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------------|--|-----------------------|------------------------------|
| № | КА ₀ | КА ₁ | | | Суммарная значимость | Остаток энергоресурса | |
| 1. | 0, 6, 8, 9 | 0, 5, 7, 9 | 21.263957 | 305.6 | 0.4665 | -0.236 | 0.522 |
| 2. | 0, 3, 6, 8, 9 | 0, 5, 7, 9 | 24.063248 | 152.22 | 0.6595 | -0.6195 | 0.4987 |
| 3. | 0, 3, 6, 8, 9 | 0, 1, 5, 7, 9 | 25.033249 | 114.56 | 0.7264 | -0.7136 | 0.4964 |
| 4. | 0, 5, 7, 9 | 0, 3, 6, 8, 9 | 23.630292 | 152.22 | 0.6297 | -0.6195 | 0.4902 |
| 5. | 0, 3, 6, 8, 9 | 0, 2, 5, 7, 9 | 26.00325 | 48.8 | 0.7933 | -0.878 | 0.4766 |
| 6. | 0, 7, 9 | 0, 6, 8, 9 | 18.004112 | 305.6 | 0.2417 | -0.236 | 0.4508 |
| 7. | 0, 8, 9 | 0, 3, 6, 9 | 16.586049 | 371.82 | 0.1439 | -0.0705 | 0.4488 |
| 8. | 0, 1, 8, 9 | 0, 3, 6, 9 | 17.551628 | 306.56 | 0.2105 | -0.2336 | 0.4413 |
| 9. | 0, 8, 9 | 0, 1, 7, 9 | 14.464185 | 442.46 | -0.0025 | 0.1061 | 0.4289 |
| 10. | 0, 8, 9 | 0, 2, 7, 9 | 15.434185 | 375.2 | 0.0644 | -0.062 | 0.4239 |
| 11. | 0, 8, 9 | 0, 6, 9 | 13.655198 | 461.6 | -0.0583 | 0.154 | 0.4171 |
| 12. | 0, 8, 9 | 0, 6, 9 | 13.655198 | 461.6 | -0.0583 | 0.154 | 0.4171 |
| 13. | 0, 7, 9 | 0, 8, 9 | 13.217731 | 461.6 | -0.0884 | 0.154 | 0.4065 |
| 14. | 0, 7, 9 | 0, 8, 9 | 13.217731 | 461.6 | -0.0884 | 0.154 | 0.4065 |
| 15. | 0, 7, 9 | 0, 6, 9 | 9.6784524 | 525.2 | -0.3325 | 0.313 | 0.3421 |
| 16. | 0, 7, 9 | 0, 5, 9 | 7.7697729 | 561.2 | -0.4642 | 0.403 | 0.305 |
| 17. | 0, 2, 9 | 0, 7, 9 | 6.4915611 | 586.4 | -0.5523 | 0.466 | 0.2793 |
| 18. | 0, 7, 9 | 0, 1, 9 | 5.8620722 | 619.76 | -0.5957 | 0.5494 | 0.2721 |
| 19. | 0, 7, 9 | | 4.8920715 | 661.41 | -0.6626 | 0.6535 | 0.2572 |
| 20. | | 0, 7, 9 | 4.6253667 | 661.41 | -0.681 | 0.6535 | 0.2499 |

Решения отранжированы с учетом экспертных знаний в порядке убывания значений свертки показателей. Наиболее предпочтительное решение задачи обслуживания ОН групповой цели ОГ МКА ДЗЗ представлено вариантом, при котором КА₁ обслуживает ОН с номерами 6, 8, а КА₂ соответственно 5, 7 (вариант №1 в таблице 2). ОН с индексами 2, 3 и 4 в обработку не взяты.

Заключение

Рассмотренный подход к решению задачи многокритериального планирования автономной маршрутизации при проведении съёмки различных групповых целей показал, что применение метода случайного поиска в сочетании с направленным отсечением неперспективных маршрутов, позволяет повысить плотность случайно выбираемых маршрутов обслуживания групповой цели в окрестностях глобального экстремума, а итерационный процесс поиска оптимального решения может быть остановлен в любой момент с получением субоптимального решения, чем обеспечивается гарантированность получения приемлемого результата.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00706.

Литература

1. **Kai Sun.** Multi-objective Planning for a Constellation of Agile Earth-Observing Satellites / Kai Sun, Zhengyu Yang, Pei Wang, [et al.] – Text : direct // INTERNATIONAL JOURNAL ON Advances in Information Sciences and Service Sciences. 2012. Vol. 4. № 13. P. 356-364.
2. **Гордеев А.В.,** Воротягин В.Н., Павлов А.Н. [и др.] Многокритериальное планирование обслуживания группового объекта наблюдения малым космическим аппаратом дистанционного зондирования Земли // «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» XI Всероссийская научно-техническая конференция. – Москва: АО РКС, 2023.
3. **Гордеев А.В.** Моделирование многокритериального планирования обслуживания группового объекта группой активных подвижных объектов наблюдения // ИММОД. 2023.
4. Two-Line Element Set Format. – URL: <https://celestrak.org/columns/v04n03/> (дата обращения: 03.11.2023) – Текст: электронный.
5. **Карсаев О.В.** Автономное планирование задач наблюдения в группировке малых спутников // Известия ЮФУ. Технические науки : №1. 2019. С. 118-132.
6. **Мануйлов Ю.С.** Метод и алгоритм оптимального автономного целераспределения на борту космического аппарата наблюдения / Ю.С. Мануйлов, В.В. Яценко – Текст : непосредственный. 2005. МО РФ. № 23. С. 31-53.
7. **Севастьянов Н.Н.** Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли / Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Панченко В.А., [и др.] – Текст : непосредственный. // Труды Московского физико-технического института. 2009. Т. 1. № 3. С. 14-22.
8. **Сафронов С.Л.** Современные подходы к созданию малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на базе унифицированных платформ / С. Л. Сафронов, И. С. Ткаченко, М. А. Иванушкин, С. С. Волгин – Самара: Самарский государственный университет, 2019. – 278 с. – Текст : непосредственный.
9. **Guo X.** Inter-satellite cooperative computing scheme driven by business graph in leo satellite network / X. Guo, Z. Ren, W. Cheng, [et al.] – Text : direct // Space-Integrated-Ground Information Networks. 2021. Vol. 2. № 2. P. 35-44.
10. **Wei Y.** Simultaneous road surface and centerline extraction from large-scale remote sensing images using CNN-based segmentation and tracing / Y. Wei, K. Zhang, S. Ji – Text : direct // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020. Vol. 58. № 12. P. 8919-8931.
11. **Растрюгин Л.А.** Теория и применение случайного поиска: Алгоритмы оптимизации основанные на методе проб и ошибок // Рига: ЗИНАТНЕ, 1969. – 309 с.
12. **Понтрягин Л.С.** Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко ; Физматгиз – Москва, 1961.
13. **Pavlov A.N.** The Technique of Multi-criteria Decision-Making in the Study of Semi-structured Problems / A.N. Pavlov, D.A. Pavlov, A.A. Pavlov, [et al.] // Cybernetics and Mathematics Applications in Intelligent Systems : Advances in Intelligent Systems and Computing / eds. R. Silhavy [et al.]. – Cham: Springer International Publishing, 2017. Vol. 574. P. 131-140.
14. **Ногин В.Д.** Проблема сужения множества Парето: подходы к решению / В.Д. Ногин – Текст : непосредственный. // Искусственный Интеллект И Принятие Решений. 2008. Проблема сужения множества Парето. № 1. С. 98-112.
15. **Кирилин А.Н.** Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, Е. В. Шахматов [и др.] СамНЦ РАН.