



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-3-227-244

EDN: VWVXUJ

Научная статья / Research article

Методология управления потоками целевой информации в космической системе ДЗЗ. Часть 4. Сетевые орбитальные группировки

А.В. Старков^{id}, А.А. Морозов^{id}✉

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

✉ aamorozko@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 6 апреля 2025 г.

Доработана: 20 июня 2025 г.

Принята к публикации: 25 июня 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Исследование является продолжением цикла статей, посвященных системной организации математических моделей для решения задачи управления потоками целевой информации в космической системе ДЗЗ в части адаптации предложенного авторами методологического подхода для сетевых орбитальных группировок. Отличительной особенностью постановки задачи является необходимость решения задачи в сложной объектовой обстановке с применением перспективных межспутниковых каналов информационного взаимодействия для повышения оперативности и качества целевой информации. Предложена обобщенная форма представления модели потока целевой информации космической системы ДЗЗ как взаимосвязанная последовательность функций изменения объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функций изменения трафика). Рассмотрены общие подходы к решению оптимизационных задачи планирования наблюдений и межспутниковой передачи целевой информации. Проведена экспериментальная отработка решения задачи планирования и ретрансляции данных на пункты приема информации. Подтверждена возможность повысить информационную эффективность космических систем ДЗЗ за счет использования средств межспутниковой передачи данных.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, обработка данных, распределение информационных ресурсов, оптимизация, эффективность, планирование наблюдений, межспутниковый канал связи

Вклад авторов

Старков А.В. — введение, аннотация, утверждение окончательной версии; Морозов А.А. — программное обеспечение, визуализация, написание текста.

Для цитирования

Старков А.В., Морозов А.А. Методология управления потоками целевой информации в космической системе ДЗЗ. Часть 4. Сетевые орбитальные группировки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 3. С. 227–244. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-3-227-244>

© Старков А.В., Морозов А.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Methodology for Managing Target Information Flows in the Remote Sensing Space System. Part 4. Network Orbital Groupings

Alexander V. Starkov[✉], Alexander A. Morozov[✉]

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

✉ aamorozko@mail.ru

Article history

Received: April 6, 2025

Revised: June 20, 2025

Accepted: June 25, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. This study is the next in a series devoted to systematically organizing mathematical models for managing target information flows in remote sensing space systems. It adapts the methodological approach proposed by the authors for a network of orbital satellites. A distinguishing feature of the problem formulation is the necessity to solve the problem in a complex object environment using promising inter-satellite channels of information interaction to increase the efficiency and quality of the target information. A generalized form of representation of the target information flow model of the remote sensing space system is proposed as an interconnected sequence of functions for altering the amount of information when applying the corresponding processing process (traffic change functions) to it. This study explores the general methodologies employed in addressing optimization problems related to observation planning and inter-satellite transmission of target information. Experimental testing of the solution to the problem of planning and relaying data to information reception points has been carried out. The potential for enhancing the information efficiency of remote sensing space systems through the implementation of inter-satellite data transmission facilities has been validated.

Keywords: remote sensing of the Earth, data processing, distribution of information resources, optimization, efficiency, planning of observations, inter-satellite communication channel

Authors' contribution

Starkov A.V. — Research concept, Introduction, Abstract, approval of the final version; *Morozov A.A.* — software, visualization, writing.

For citation

Starkov AV, Morozov AA. Methodology for managing target information flows in the remote sensing space system. Part 4. Network orbital groupings. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(3):227–244. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-3-227-244>

Введение

Данная статья является продолжением серии статей [1–3], посвященных проблеме управления потоками целевой информации в космической системе (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В них рассмотрена отработанная годами классическая схема построения системы ДЗЗ, состоящая из наземной инфраструктуры и орбитальной группировки, каждый космический аппарат (КА) которой связан информационными потоками с пунктами приема/передачи информации (ППИ). В такой постановке оператор КС на основе полученных заявок на проведение съемки определенных

районов формирует оперативный план наблюдений, включающий в себя моменты съемки, сброса и обработки целевой информации на ППИ, после отработки которого каждым КА орбитальной группировки (ОГ) результаты передаются потребителю.

Рассмотренная схема имеет целый ряд недостатков, ключевыми из которых являются оперативность передачи и качество целевой информации. Так, для российской системы ДЗЗ большую часть времени космические аппараты находятся вне зоны радиовидимости (ЗРВ). Например, для спутников на низких орбитах, близких к Международной космической станции, время нахождения в ЗРВ находится в

пределах 10–12 мин с последующей «мертвой зоной» в течение 80 мин. Проблема может быть решена кратным увеличением КА в составе ОГ ДЗЗ и изменением подходов к передаче целевой информации за счет дооснащения КА аппаратурой межспутниковой передачи данных. За счет такой аппаратуры появляется возможность рассматривать космический сегмент как информационную подсистему с сетевой организацией передачи целевой информации.

1. Формализация задачи

Анализ показывает, что изменение численности КА с одновременным существенным ростом количества и площади конкурентных заявок, в так называемой нагруженной целевой обстановке, для наземного сегмента требует лишь его масштабирования, а для космического сегмента — изменения подходов к планированию сеансов съемки и сброса целевой информации на ППИ. Это вызвано тем, что [4–6]:

1) существующие алгоритмы в полной мере не адаптированы к работе аппаратуры КА в смешанном режиме «сброс и съемка одновременно» и требуют корректировки;

2) объективно большая размерность оптимизационной задачи и связанных с ней ограничений приводит к тому, что классические методы оптимизации в задачах определения съемочного плана в ряде случаев не обеспечивают нахождение решения;

3) в части заявок потребителей нагруженная целевая обстановка характеризуется наличием большого числа пересечений (наложений) районов съемки с учетом требований по облачности. В этом случае возникает задача неформального решения вопроса о приоритизации, что реализовать в существующих алгоритмах расчетов затруднительно.

В результате возникает необходимость во введении дополнительных эвристических допущений, к числу которых можно отнести:

– территорию района интересов произвольной формы представлять в виде окружности габаритного радиуса либо объединения двух-трех окружностей;

– уменьшение уровней приоритетности с 5 до 3;

– осуществление сброса информации всегда на ближайший по времени ППИ.

Несмотря на такие допущения, решение строгой оптимизационной задачи в приемлемое время не дает необходимого результата, поскольку:

– аппроксимация территории районов интересов окружностями потребует большой дополнительной «холостой» работы аппаратуры наблюдения с последующей загрузкой ППИ;

– при наложении нескольких районов съемки, а также облачности недостаточно дискретизации уровней приоритетности, здесь речь скорее должна идти о формировании уровня приоритетности в виде вещественного числа;

– учет облачности приводит к неоднородности приоритетности как внутри отдельно взятого района наблюдения, так и всего задания на съемки в целом.

Таким образом, одним из направлений адаптации методологического подхода к новым условиям функционирования с использованием сетевых орбитальных группировок является развитие технологий планирования и передачи целевой информации в наземный сегмент (ретрансляции на ППИ) (рис. 1).

В проектировании систем ДЗЗ, в такой комплексной постановке, до настоящего времени данного рода задачи не решались, особенно это касается нагруженной целевой обстановки при большом количестве КА и объектов съемки [4–6]. В основе предложенного методологического подхода [1–3] лежит представление решения задачи как оптимизация последовательности выполнения процессов обработки, образующих совокупность взаимосвязанных математических моделей.

Каждая из этих моделей должна в условиях ограничений на входе иметь некий объем информации, преобразовывать его (уменьшать или увеличивать), вычислять системные показатели эффективности — время, требуемое для реализации процесса, и его условную стоимость.

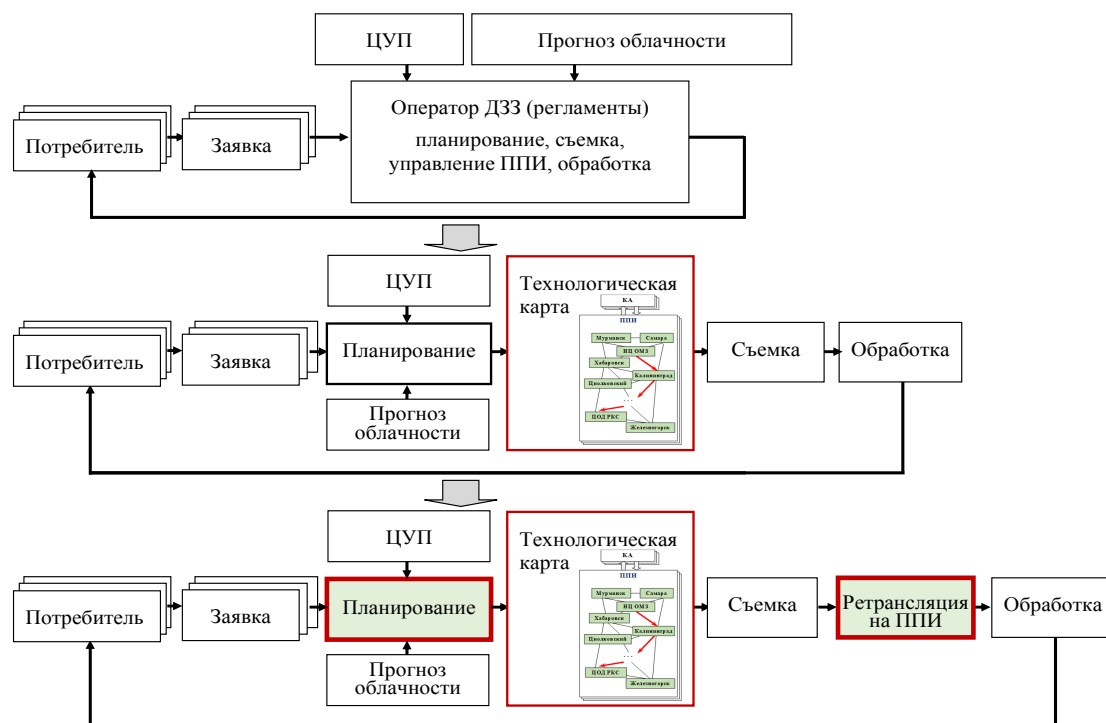


Рис. 1. Развитие методологического подхода
Источники: выполнено А.А. Морозовым

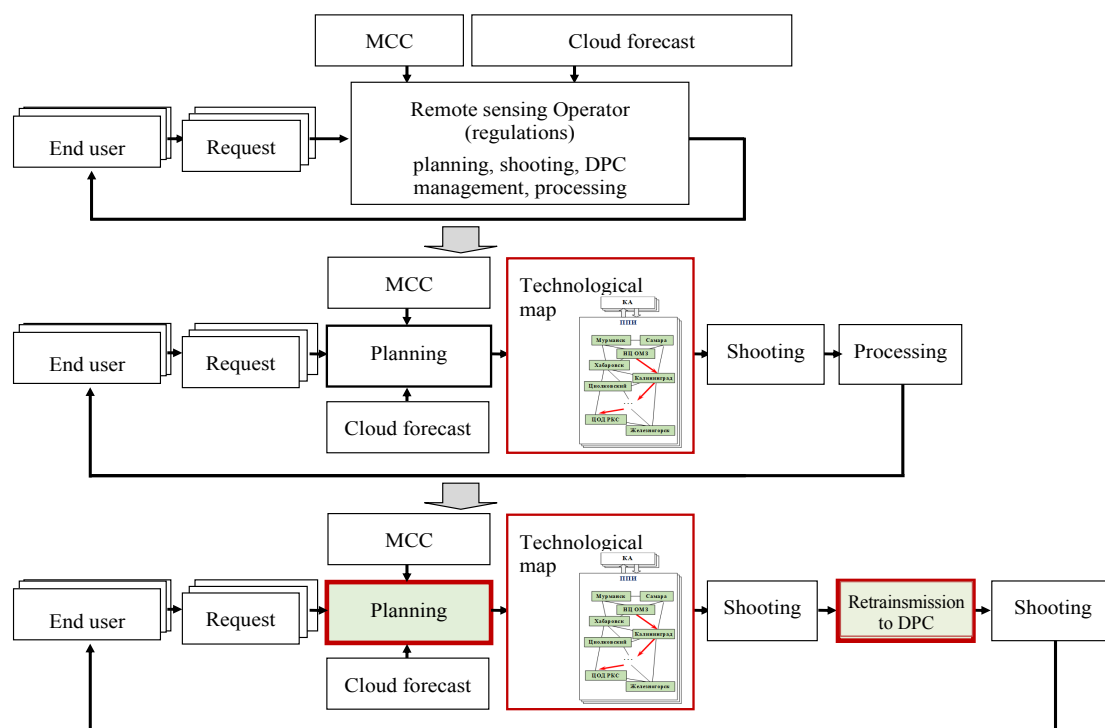


Figure 1. Development of a methodological approach
Source: by A.A. Morozov

При этом общая математическая постановка задачи заключается в оптимизации маршрута прохождения заявки по узлам графа, в котором вершиной является заявка, а формализованные данные заявки передаются последовательно на элементы космического и наземного сегментов:

$$\Gamma = \{\Gamma_k, k = \overline{1, K}\} = \{(Q, L)_k, k = \overline{1, K}\},$$

$$k_i = \text{const}, i = \overline{1, N}$$

с учетом возможности вычисления в каждом узле частных системных показателей, или их свертки, при наличии текущих ограничений.

В нашем случае, когда состав подсистемы ограничен компонентами космического сегмента, объективное свертывание позволяет перейти к частным показателям, характеризующим их эффективность целевого функционирования, которыми являются ценность информации и оперативность (время) ее ретрансляции в наземный сегмент. При этом оба этих частных показателя объединяет число КА ОГ ДЗЗ.

1.1. Оптимизация планирования съемки

Как правило, потребитель формирует заявку с указанием ее важности (приоритета). С точки зрения оператора системы важность заявки однозначно определяет ее условную стоимость. При этом пространственная протяженность объектов съемки и ограниченность полосы захвата аппаратуры наблюдения приводит к тому, что выполнение заявки происходит за несколько проходов, при этом интервал планирования ограничивает возможности по ее выполнению в полном объеме. Ценность в этом случае может быть определена как совокупность условных стоимостей наблюдаемых элементарных районов, входящих в заявки потребителей. Таким образом, в качестве частного показателя эффективности в задаче распределения целевой информации космического сегмента КС ДЗЗ в части оптимизации планирования съемки можно принять сумму всех условных стоимостей наблюдаемых элементарных районов при ограничениях на:

- условия работы целевой аппаратуры;
- внешние условия наблюдения;
- облачность в районах съемок.

При формировании условной стоимости элементарного района необходимо учитывать:

- приоритетность точки в рамках поданной заявки;
- наложение районов съемок;
- имеющийся, возможно неформальный, опыт планирования.

Условная стоимость съемки одного элементарного района определяется величиной

$$J_{ij} = C_{ij} \left(1 - \frac{|Q_{ij}|}{Q_{\max}} \right), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где C_{ij} — условная стоимость элементарного района (i, j) ; второй множитель — коэффициент качества изображения, учитывающий особенности работы целевой аппаратуры, характеризующиеся снижением качества снимков районов, удаленных от линии надир, и достигающий наибольшего значения при съемке в надир и наименьшего значения — при съемке под углом $Q_{\max}$; n — число разбиений интервала $[-180^\circ, +180^\circ]$ по долготе; m — число разбиений интервала $[-90^\circ, +90^\circ]$ по широте.

Критерий, характеризующий ценность отснятой информации k -м КА ОГ на интервале $[t_0, T]$, представляет собой линейную аддитивную функцию:

$$J_k(u_k, \theta_k(u_k)) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M J_{ij}(u_k, \theta_k(u_k)). \quad (2)$$

Ценность отснятой информации всеми КА ОГ на интервале планирования $[t_0, T]$ представляет собой совокупность зависимых друг от друга частных критериев:

$$I(u) = J(u, \theta(u)) = \{J_k(u_k, \theta_k(u_k)), k = \overline{1, K}\}, \quad (3)$$

где u_k — стратегия управления бортовой съемочной аппаратурой k -го КА; $\theta_k(u_k)$ — соот-

ветствующая этой стратегии программа переориентации съемочной аппаратуры. Фактически значение критерия представляет собой совокупную условную стоимость снимков земных объектов, совершенных за интервал планирования $[t_0, T]$.

С учетом введенных обозначений оперативный съемочный план, как совокупность программ съемок земных объектов каждым КА, можно записать:

$$\Pi_c = \{ \Pi_{ck}(u) = (u_k, \theta_k(u_k)), k = \overline{1, K} \}. \quad (4)$$

Частная задача планирования формулируется следующим образом: при заданной матрице стоимости определить такую совокупность стратегий управления $u^* = \{u_k, k = \overline{1, K}\}$ бортовой съемочной аппаратурой КА и соответствующих им программ переориентации съемочной аппаратуры $\theta^* = \{\theta_k, k = \overline{1, K}\}$, которые формируют рациональный план оперативной съемки земных объектов из условия максимизации критериальных функций (3):

$$\Pi_c^* = (u^*, \theta^*(u^*)) = \arg \max_{\substack{u \in U \\ \theta \in \Theta}} [J(u, \theta(u))], \quad (5)$$

где U , Θ — соответственно множества допустимых стратегий управления бортовой съемочной аппаратурой и программ ее переориентации для всех КА системы при соблюдении ограничений:

- на время маршрута:

$$t_{\min}^r \leq t_k^r \leq t_{\max}^r, k = \overline{1, K}; \quad (6)$$

- на межмаршрутный интервал:

$$t_k^{rr} \leq t_{\max}^{rr}, k = \overline{1, K}; \quad (7)$$

- на внешние условия съемки (освещенность, минимальный и максимальный углы Солнца);

- на емкость бортового запоминающего устройства (БЗУ) КА:

$$V_i \leq V_{\max k}, k = \overline{1, K}; \quad (8)$$

- на максимально допустимый угол визирования КА для наблюдаемого земного объекта:

$$|\theta_k| \leq \theta_{\max k}, k = \overline{1, K}; \quad (9)$$

- на скорость переориентации КА:

$$|\dot{\theta}_k| \leq \dot{\theta}_{\max k}, k = \overline{1, K}; \quad (10)$$

- на учет облачности в районе съемок.

Как было сказано выше, на основе условных стоимостей элементарных районов на поверхности Земли формируется обобщенная для всех КА ОГ ДЗЗ заявка.

При формировании исходных данных по условным стоимостям элементарных районов важным является их визуальное представление. Для удобства можно использовать стандартное графическое 24-битное BMP-изображение ($RGB24bit$), в котором в трех битах (R, G, B) сохранять условную стоимость элементарного района с использованием операции суммирования (рис. 2):

$$\begin{aligned} (R, G, B)_{01+02} = \\ = (R_{01} + R_{02}, G_{01} + G_{02}, B_{01} + B_{02}), \end{aligned} \quad (11)$$

где R, G, B — биты красного, зеленого и синего в пикселе $RGB24bit$ изображения. В качестве примера можно привести изображение в градациях серого, в котором биты R, G, B одинаковы.

Основой для решения задачи подготовки исходных данных является определение способов преодоления неопределенностей при формировании условной стоимости элементарных районов, связанных с наложением заявок, в том числе имеющих различный приоритет (рис. 2). Один из способов предполагает различные варианты скаляризации [7–9]. Их существенным недостатком является то, что экспертная оценка, заложенная в них, является статичной, без обратной связи по результатам практического применения и внесения оперативных изменений в процесс планирования.

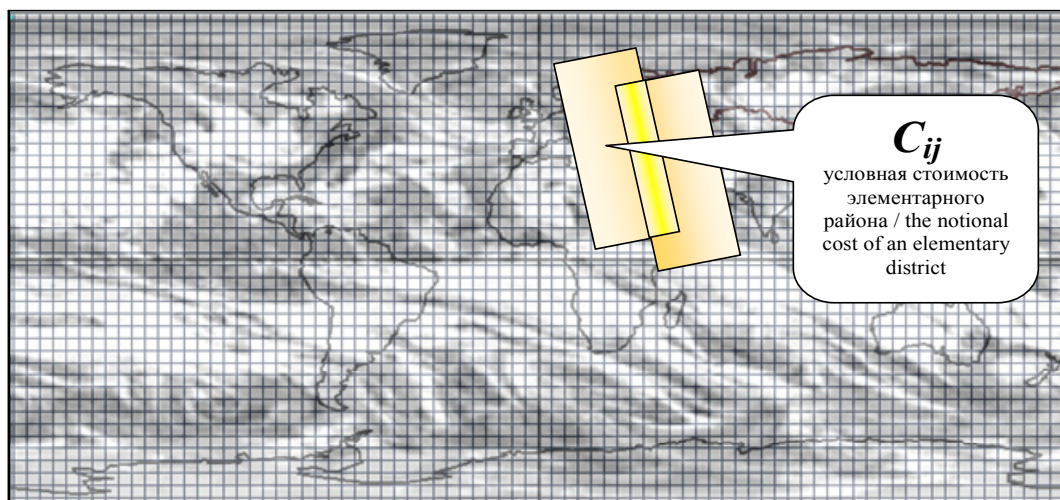


Рис. 2. Условная стоимость элементарных районов – визуальное представление
Источник: выполнено А.А. Морозовым

Figure 2. The visual representation of the conditional cost of elementary areas.
Source: by A.A. Morozov

Наиболее перспективным является группа способов, основанная на неформальном анализе множества исходных вариантов решений (рис. 3) [10]. При этом скаляризация является одним из вариантов такого анализа, где возможно использование специализированной искусственной нейронной сети (ИНС). Такой подход, помимо привлечения экспертов, предпо-

лагает обратную связь (обучение) по результатам функционирования системы. По сути, задачами ИНС являются анализ и обобщение информации о заявках, их приоритетности с учетом возможных пересечений районов, метеопрогнозов и на этой основе формирование условной стоимости элементарного района наблюдения (рис. 3).

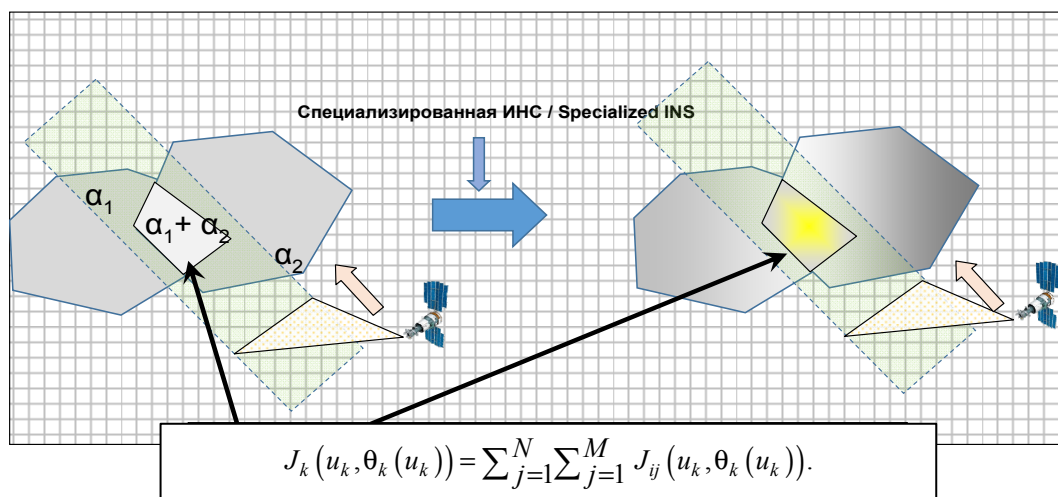


Рис. 3. Неформальный анализ с использованием специализированной нейронной сети
Источник: выполнено А.А. Морозовым

Figure 3. Informal analysis using a specialized neural network
Source: by A.A. Morozov

1.2. Ретрансляция в ППИ

Существенное повышение оперативности передачи информации при рациональном построении ОГ [13] может быть достигнуто следующими способами:

- ретрансляцией целевой информации посредством КА-ретрансляторов на геостационарных орбитах (ГСР);
- применением средств сжатия данных;
- использованием перспективных каналов межспутниковой передачи целевой информации.

Передача данных по схеме

КА→КА ГСР→ППИ,

на первый взгляд, решает проблему оперативности передачи данных, а также накопления большого количества данных в памяти КА. Однако при кратном увеличении числа КА ДЗЗ в современных условиях это потребует кратного увеличения дорогих в производстве и обслуживании КА ГСР, что автоматически нивелирует экономический эффект от развертывания крупной группировки КА ДЗЗ.

При использовании различных технологий сжатия изображений, передаваемых в потоке данных, на первый план выходит проблема достоверности восстановленных данных в ППИ для их дальнейшей тематической обработки. Это приводит к необходимости использования сложного помехоустойчивого кодирования и передачи информации.

В качестве альтернативы предлагается рассмотреть технологию функционирования космической системы ДЗЗ как сетевой орбитальной группировки с модернизированным антенно-фидерным устройством (АФУ) на борту каждого КА, способным к ретрансляции данных внутри ОГ КА ДЗЗ. Такой подход, с одной стороны, позволит более оперативно решать задачу ретрансляции данных на уровне не хуже передачи по схеме КА→КА ГСР→ППИ, а с другой — уменьшить влияние помех на итоговую достоверность полученной информации ДЗЗ.

При этом существующая технология передачи данных [11–13] с космических аппаратов

дистанционного зондирования Земли на наземные пункты приема информации (ППИ) или с ППИ на другой ППИ с помощью спутника-ретранслятора характеризуется некоторыми негативными факторами, среди которых требуется обращать внимание на невозможность оперативного приема данных, необходимость хранения большого количества данных в бортовом запоминающем устройстве (БЗУ) космического аппарата (КА), а также достоверность информации на выходе тракта высокоскоростной радиолнии (ВРЛ), выраженную средней вероятностью ошибки на бит информации [14–15].

Далее будем полагать, что целевое функционирование КС ДЗЗ в части ретрансляции целевой информации рассматривается при следующих допущениях [16–17]:

- радиосигналы между КА и абонентскими терминалами распространяются прямолинейно и мгновенно и ретранслируются без временных задержек;
- абонентский терминал способен поддерживать непосредственную связь с каждым КА, находящимся в зоне его радиовидимости;
- влияние помех на процессы передачи информации исключается;
- орбитальная структура КС ДЗЗ за интервал планирования не изменяется.

Под планом оперативной коммутации межспутниковых каналов в КС ДЗЗ будем понимать упорядоченное множество временных последовательностей выполнения операций по передаче данных для каждого КА на интервале планирования, в том числе:

- моменты времени включения/выключения бортовой коммутирующей аппаратуры для установления непосредственной связи в сети КА (программа коммутации радиоканалов в межспутниковых линиях);
- моменты времени перекоммутации бортовой аппаратуры для непосредственной связи КА (программа перекоммутации радиоканалов в межспутниковых линиях);
- моменты времени установления непосредственной связи КА с абонентскими терминалами (программа коммутации радиоканалов в абонентских линиях).

Основные параметры такого плана составляют последовательности первого типа, поскольку именно они определяют эффективность целевого функционирования КС ДЗЗ [18]. Программы перекоммутации радиоканалов в межспутниковых линиях и коммутации радиоканалов в абонентских линиях, в свою очередь, определяются программой коммутации радиоканалов в межспутниковых линиях и техническими возможностями бортовой аппаратуры КА [11–13]. С учетом этого в дальнейшем под планом оперативной ретрансляции целевой информации будем понимать совокупность программ коммутации радиоканалов в межспутниковых линиях, образуемых каждым КА системы. Формально на интервале $[t_0, T]$ план может быть записан в виде

$$\Pi_r = \{ \Pi_{rk}(u_k) = (u_k, f_k(u_k)), k = \overline{1, K} \}, \quad (12)$$

где u_k — последовательность или стратегия управления бортовой коммутирующей аппаратурой k -го КА для установления связи в межспутниковых линиях; $f_k(u_k)$ — соответствующая стратегия управления программой перекоммутации радиоканалов в межспутниковых линиях k -го КА. Фактически значение критерия представляет собой совокупную условную стоимость снимков земных объектов, совершенных за интервал планирования $[t_0, T]$.

Частная задача планирования формулируется следующим образом: при заданном состоянии орбитальной группировки определить такую совокупность стратегий управления $u^* = \{u_k, k = \overline{1, K}\}$ бортовой коммутирующей аппаратурой КА ОГ, которые формируют рациональный маршрут ретрансляции сигнала с КА на ППИ из условия минимизации времени

$$\Pi_r^* = (u^*) = \arg \min_{u \in U} [T(u)], \quad (13)$$

где U — соответственно множество допустимых стратегий управления программой перекоммутации радиоканалов в межспутниковых

линиях, при соблюдении описанных выше ограничений; T — суммарное время передачи информации.

На этапе планирования целевого функционирования КС ДЗЗ может быть сформировано большое число альтернатив планов (9), отличающихся по количественному и качественному составу КА-ретрансляторов. Но не все из них могут быть реализованы из-за ограниченных технических возможностей бортовой аппаратуры КА.

Задача планирования процесса целевого функционирования КС ДЗЗ в части ретрансляции целевой информации состоит в формировании такого плана (9), который включал бы минимальное количество КА-ретрансляторов для установления и удержания каналов межспутниковой связи и позволял бы при своей реализации на интервале планирования достичь минимально возможного среднего времени доставки данных на НКИ при ограничениях:

- а) на загруженность бортового запоминающего устройства каждого КА;
- б) на загруженность каналов межспутниковой связи;
- в) на загруженность каналов приема информации в ППИ.

Модель целевого функционирования сетевой ОГ КА ДЗЗ на интервале планирования может быть представлена в виде ориентированного графа Γ , вершины которого представляют собой некое множество целевых операций ОГ КА ДЗЗ, которые формируются в различные совокупности друг с другом с целью непосредственной передачи информационного потока, реализуемые в определенные интервалы времени. В свою очередь, дуги графа определяют связность и формируют совокупности операций выполнения вершин. Исходя из вышесказанного, математическое представление графа имеет вид

$$\Gamma = (Q, L) = (\{Q_i, i = \overline{1, N}\}, \{L_i, i = \overline{1, N}\}), \quad (14)$$

где $Q = \{q_j, j = \overline{1, B}\}$, где q_j — номера вершин графа; B — количество вершин;

$$L = \{(q_j, q_s), j = \overline{1, B}, s = \overline{1, B}\},$$

где q_j, q_s — являются обозначением дуги графа между q_j и q_s вершинами. При этом если дуга между вершинами отсутствует, то и пара (q_j, q_s) также не существует.

Такой граф Γ представим в виде матрицы, элементами которой являются данные о взаимосвязи вершин и возможных целевых операциях ОГ КА ДЗЗ:

$$\Gamma_c = \begin{bmatrix} z_1^1 & m_{11} & m_{12} & \dots & 0 & n_{11} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_i^1 & m_{i1} & m_{i2} & \dots & m_{ie} & n_{id} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_q^e & m_{q1} & m_{q2} & \dots & m_{ie} & n_{qd} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} z_i^1 & m_{i1} & \dots & m_{ie} & n_{id} \end{bmatrix}, i = \overline{1, q} \quad (15)$$

где q — количество строк матрицы Γ_c , что равно количеству уникальных вершин графа Γ , означающих наземные пункты приема данных, либо такому числу, что будет достаточно для описания всех маршрутов передачи целевых данных. Элементы $z_q^e, e = \overline{1, N_{KA}}$ означают количество целевых операций съемки ОГ КА ДЗЗ, выполнение которых начинается после выполнения предыдущей (при наличии) i -й операции. Элементы $m_{ie}, i = \overline{1, q}, e = \overline{1, N_{KA}}$ означают собой номера КА, используемых в данном маршруте передачи данных, при этом, если количество КА, используемых в маршруте передачи меньше, чем общее количество КА в рассматриваемой системе, вместо номеров КА применяются условные обозначения в виде 0 для поддержания прямоугольности матрицы. Элементы $n_{id}, i = \overline{1, q}, d = \overline{1, N_{ППИ}}$ означают номера ППИ, используемые в данном маршруте передачи данных и являющиеся в строке последним элементом. Размерность матрицы Γ_c

напрямую связана с количеством запланированных целевых операций съемки ОГ КА ДЗЗ и количеством узлов для передачи данных.

2. Общий подход к решению оптимизационной задачи

2.1. Построение рационального плана съемки

В нашем случае, когда имеются большое число КА ОГ и нагруженная объектовая обстановка, появляется задача многокритериальной оптимизации [19–20] в качестве задачи одновременной минимизации некоторой совокупности критериев $\{J_k(u_k, \theta_k(u_k)), k = \overline{1, K}\}$ как суммарной стоимости попавших в поле зрения аппаратуры наблюдения каждого КА ОГ элементарных районов с учетом ограничений (6)–(10). Следует отметить, что строго математически задача в такой постановке смысла не имеет, так как минимумы отдельных критериев оптимальности в общем случае достигаются при разных значениях аргумента [7–9]. Однако современные методы принятия решений в случае многокритериальной неопределенности, подкрепленные оптимизационными процедурами, могут помочь выбрать рациональное решение [7–9].

В нашем случае можно воспользоваться достаточно эффективным подходом, основанным на формировании контрольных значений для исходных критериев оптимальности J_k^* , в роли которых может выступать решение отдельных однокритериальных задач:

$$J_k^*(u_k^*, \theta_k^*(u_k^*)) = \arg \max_{\substack{u_k \in U \\ \theta_k \in \Theta}} [J_k(u_k, \theta_k(u_k))], \quad (16)$$

$$k = \overline{1, K}.$$

Решением задачи (16) является программа «идеального» крена, которой соответствует непрерывное изменение угла крена линии визирования, обеспечивающая получение максимальной условной стоимости при отсутствии ограничений на условия съемки. Если теперь ввести в рассмотрение некоторую скалярную

функцию, характеризующую степень этой близости, то ее можно использовать в качестве нового скалярного критерия оптимальности. В простейшем случае такой функцией может быть квадратичная форма вида

$$\tilde{J}(u, \theta(u)) = \sum_{k=1}^K (J_k(u_k, \theta_k(u_k)) - J_k^*)^2. \quad (17)$$

Непосредственное решение такой задачи представляет определенные трудности. Это вызвано в первую очередь тем, что имеется прямая зависимость решения для одного КА от результатов планирования для другого при динамическом изменении орбитальной обстановки. Возникает необходимость в запоминании будущей эволюции всей группировки КА на каждом шаге оптимизационной процедуры. Для разрешения такого «проклятия размерности» необходимо прибегать к различным приближенным методам, основанным на допущениях, к которым можно отнести следующие:

- совокупная стоимость тематического продукта на всем интервале планирования является суммой совокупных стоимостей на непесекающихся подынтервалах;

- совокупная стоимость на каждом подынтервале определяется как упорядоченная сумма стоимости попавших в поле зрения аппаратуры наблюдения КА элементарных районов при условии, что они не наблюдались другими КА;

- на каждом подынтервале программа изменения угла линии визирования аппаратуры наблюдения с учетом возможного изменения угла крена каждого КА формируется на основе программы «идеального» крена (2) и ограничений (6)–(10).

Это позволяет:

- перейти от неопределенной размерности задачи планирования, зависящей от многих, в том числе неформализуемых факторов, к задаче с прогнозируемой размерностью;

- за счет декомпозиции существенно сократить размерность подзадач, решаемых на различных этапах;

- при нагруженной объектовой обстановке гарантированно обеспечить нахождение рационального решения;

- гарантированно обеспечить разрешение неопределенностей, связанных с приоритизацией и учетом облачности в районах съемки.

Это дает возможность решать задачу построения рационального плана поэтапно:

- 1) определяется программа «идеального» крена θ_k^* на заданном интервале планирования;

- 2) определяется упорядоченная последовательность КА и подынтервалов планирования для дальнейшей кусочно-линейной аппроксимации программы «идеального» крена;

- 3) проводится кусочно-линейная аппроксимация «идеального» крена, обеспечивающая наименьшее отклонение, при условии выполнения ограничений (6)–(10);

Результатом оптимизации являются:

- план изменения угла крена линии визирования аппаратуры наблюдения в виде графической и текстовой информации;

- количественные параметры выполнения заявки в виде абсолютных показателей по площади наблюдаемых районов и их совокупной стоимости, и ее доли по отношению к общей заявленной площади при использовании результатов планирования.

2.2. Алгоритм ретрансляции данных на ППИ

Формально процесс поиска возможных маршрутов передачи данных сводится:

- к расширению списка маршрутов передачи данных на основе (15);

- отсечению заранее неудачных или наименее удачных маршрутов путем логического анализа из-за невозможности передать данные на конечный пункт приема (отсутствие целевых операций передачи данных после определенного времени или недостаток временного интервала для передачи данных с учетом заданных характеристик радиолоний между узлами), а также передача данных на уже существующий узел в данном маршруте (например, передача данных с КА № 1 на КА № 2 и снова на КА № 1).

Фактически предлагаемый подход состоит в построении модели целевого функциони-

рования ОГ КА ДЗЗ с учетом организации процедуры стандартной маршрутизации. Это позволяет значительно экономить технологические и временные ресурсы в ходе дальнейшего анализа возможностей реализации данных

маршрутов с учетом общей загруженности линий связи в системе.

Упрощенная блок-схема используемого в ПО алгоритма маршрутизации представлена на рис. 4.



Рис. 4. Блок-схема алгоритма ретрансляции данных на ППИ

И с т о ч н и к: выполнено А.А. Морозовым

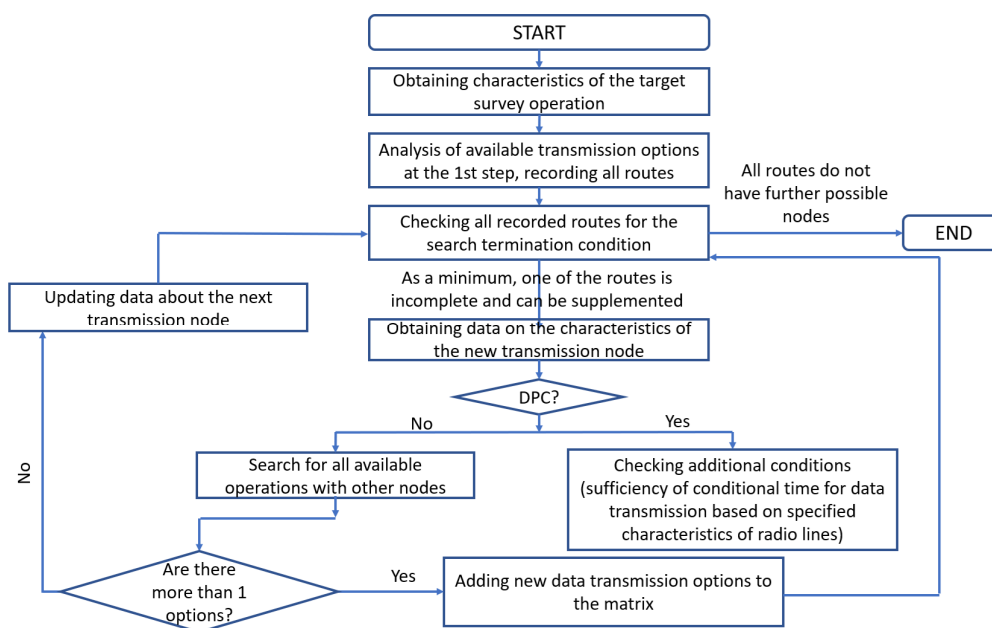


Figure 4. A block diagram of the data relay algorithm on the FIR

S o u r c e: by A.A. Morozov

В представленной блок-схеме алгоритма маршрутизации основным упрощением является «закрытость» блока проверки всех записанных маршрутов на условие окончания поиска. Поскольку данный этап является самым важным, он является триггером, когда стоит закончить поиск дополнительных вариантов маршрутов или отметить заранее неудачные маршруты.

3. Результаты экспериментальной отработки

Ниже представлены результаты экспериментальной отработки предлагаемого подхода, учитывающего специфику сетевых орбиталь-

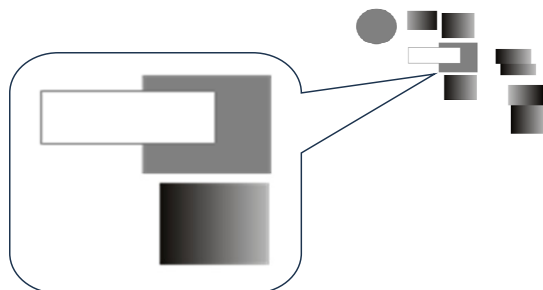


Рис. 5. Группировка элементарных районов для модельного примера

Источник: выполнено А.А. Морозовым

Figure 5. Grouping elementary districts for a model example

Source: by A.A. Morozov

Результат применения предлагаемых технологий планирования для нашего модельного примера наглядно показывает (рис. 6), что в условиях, приближенных к нагруженной целевой обстановки, когда элементарные районы конкурируют между собой по показателю условной стоимости, предлагаемые методические подходы гарантированно находят рациональный план проведения съемки.

На рисунке видно, что развороты по крену будут выполнены в сторону максимального захвата наиболее яркого изображения и, как следствие, более высокой условной стоимости элементарного района, при этом все ограничения

ных группировок ДЗЗ. Отработка представлена на модельных примерах, наглядно отражающих суть предлагаемых изменений. В качестве базовой для отработки выбрана существующая ОГ, состоящая из 5 КА типа «Канопус» и 13 наземных пунктов на территории Российской Федерации.

3.1. Экспериментальная отработка решения задачи планирования

Наиболее наглядно результаты планирования могут быть представлены для варианта, когда элементарные районы группируются так, что их условные стоимости образуют поле градиента (рис. 5).

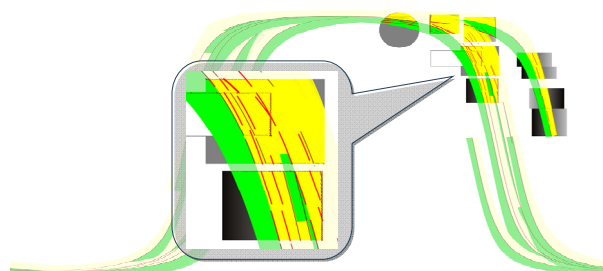


Рис. 6. Визуализация плана съемки для модельного примера

Источник: выполнено А.А. Морозовым

Figure 6. Visualization of the shooting plan for a model example

Source: by A.A. Morozov

выполняются. На рис. 6 зеленым цветом отмечена полоса захвата для положительного крена, желтым — для отрицательного. Красным цветом обозначена полоса захвата.

3.2. Экспериментальная отработка ретрансляции данных на ППИ

Целью экспериментальной отработки являлось подтверждение возможности реализации ретрансляции данных с КА на ППИ с одновременным определением возможных параметров ОГ. Ниже представлены сравнительные результаты для различных вариантов ретрансляции (рис. 7–9).

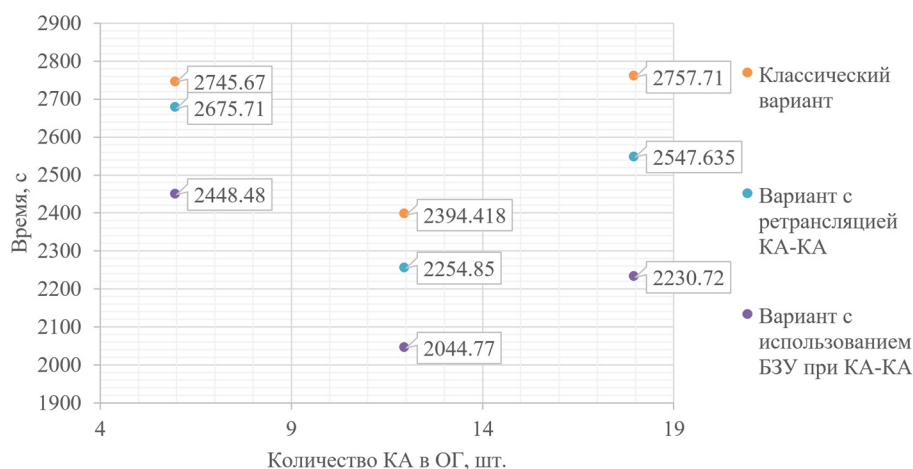


Рис. 7. Среднее время передачи целевой информации от КА на ППИ
Источник: выполнено А.А. Морозовым

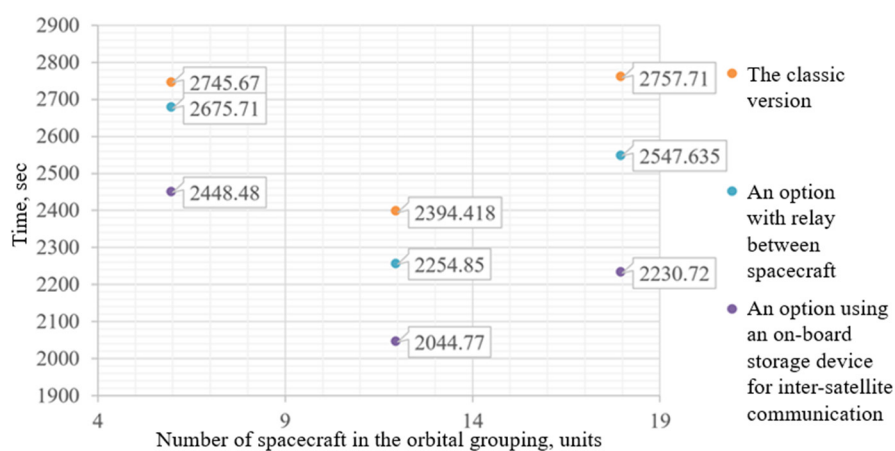


Figure 7. The average time of transmission of target information from the spacecraft to the FIR
Source: by A.A. Morozov

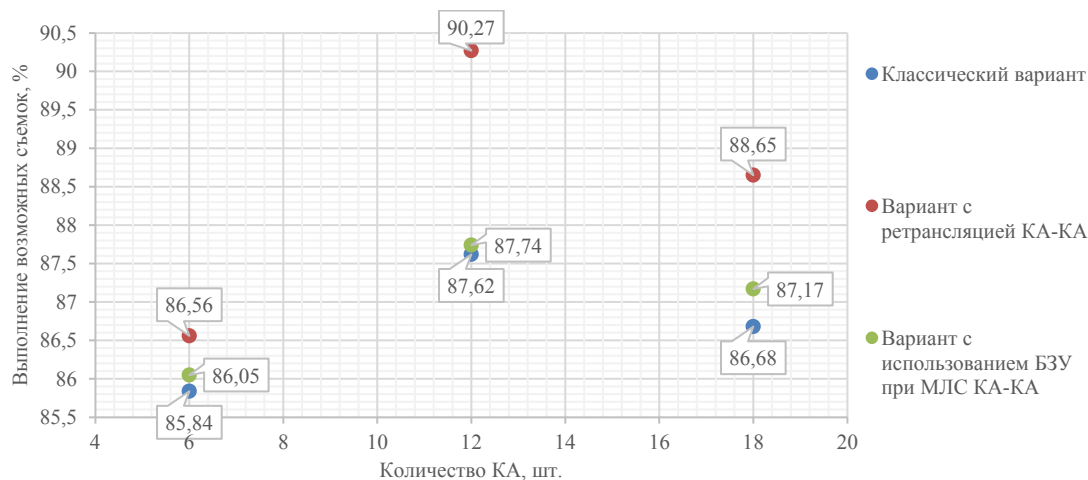


Рис. 8. Усредненное выполнение возможных съемок при планировании ОГ КА ДЗЗ
в различных вариантах распределения целевой информации
Источник: выполнено А.А. Морозовым

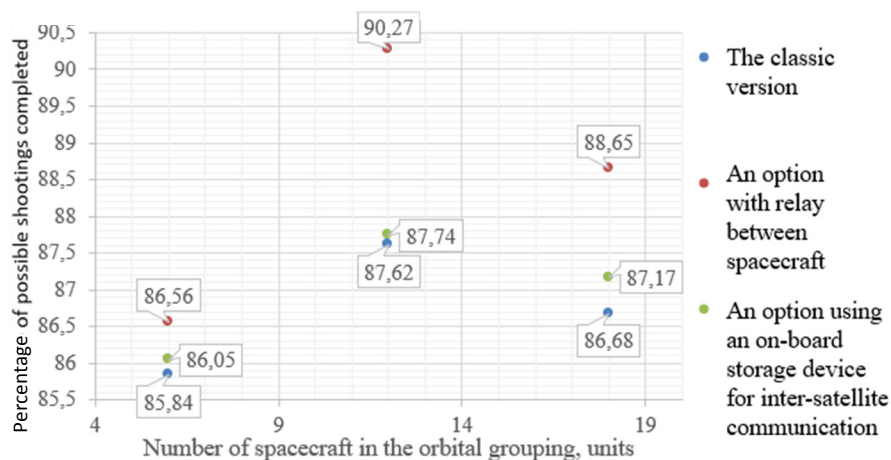


Figure 8. The average performance of possible surveys during the planning of remote sensing equipment in various target information distribution options
Source: by A.A. Morozov

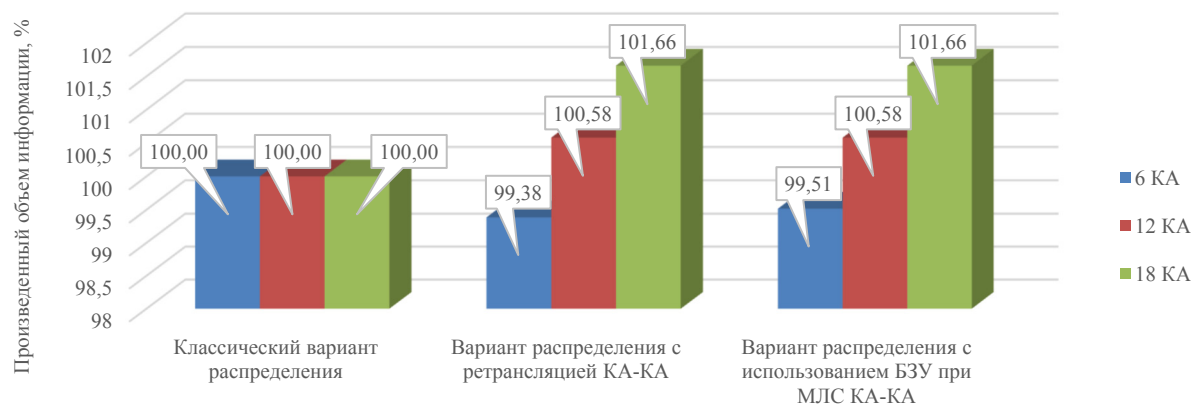


Рис. 9. Общий объем целевой информации в зависимости от различных вариантов распределения целевой информации
Источники: выполнено А.А. Морозовым

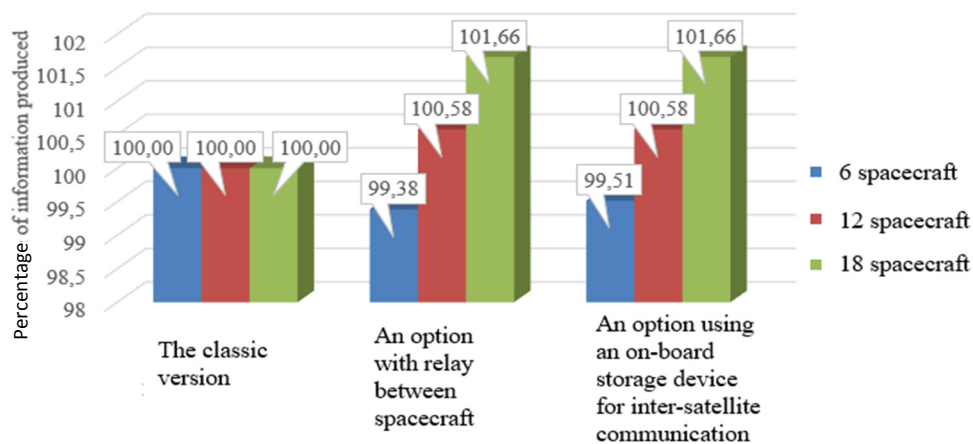


Figure 9. The total amount of target information depends on the different target information distribution options
Source: by A.A. Morozov

Заключение

В результате системного анализа существующей космической системы ДЗЗ, в том числе ее информационных продуктов и рабочих процессов, предложено дальнейшее развитие единого методического подхода к решению задачи управления потоками целевой информации в части детального учета процессов планирования работы целевой аппаратуры КА и использования перспективных межспутниковых каналов передачи целевой информации.

Основой предлагаемых изменений является совместное решение двух частных задач:

1) задачи планирования съемки в условиях нагруженной целевой обстановки (большое количество КА и разнородных объектов для съемки);

2) задачи дополнения классических каналов передачи информации между КА и ППИ широкополосными межспутниковыми каналами.

В части решения задачи планирования съемки предложено перейти от формализации отдельных заявок в виде описания их приоритетности и дополнительных ограничений к формализованному единому представлению заявок в виде совокупности условной стоимости элементарных районов, являющейся неформальной сверткой самих заявок, их условной стоимости, наложения районов, а также влияния внешних факторов на необходимость проведения съемки (метеопрогноза).

В части решения задачи ретрансляции целевой информации предложены и проанализированы перспективные технологии организации межспутниковой связи, целью которых, с одной стороны, является обеспечение возможности для более оперативного решения задачи передачи данных и уменьшения времени между съемкой и сброса результатов на ППИ, а с другой — снижение влияния различных условий на итоговую достоверность полученной информации ДЗЗ, тем самым повысив ее условную стоимость. Подтверждена возможность существенно повысить информационную эффективность КС ДЗЗ за счет использования средств межспутниковой передачи данных.

Список литературы

1. Старков А.В., Емельянов А.А., Гришанцева Л.А., Жуковская К.И., Морозов А.А., Тришин А.А. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Часть 1. Формализация задачи // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования, 2021. Т. 22. № 1. С. 54–64. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-54-64> EDN: EWFUYU
2. Старков А.В., Емельянов А.А., Гришанцева Л.А., Жуковская К.И., Морозов А.А., Тришин А.А. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Часть 2. Формирование системы взаимосвязанных математических моделей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 148–161. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-2-148-161> EDN: YDRRYG
3. Emelianov A.A., Grishantseva L.A., Zubkova K.I., Malyshev V.V., Nam N.V.H., Starkov A.V., Win Z.Y. Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution // *Advances in the Astronautical Sciences*. 2020. Vol. 170. P. 495–504. EDN: QUXMHN
4. Емельянов А.А. Многоспутниковые орбитальные группировки: подходы к управлению и применению // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 2023. С. 2. EDN: NUTSXP
5. Хайлов М.Н., Заичко В.А., Тюлин А.Е., Емельянов А.А. Влияние цифровой трансформации общества на приоритеты развития ДЗЗ из космоса в России // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2020. С. 3. EDN: KQPPBN
6. Тюлин А.Е., Селин В.А., Емельянов А.А. Актуализация приоритетов развития отечественной отрасли дистанционного зондирования Земли из космоса // Системный анализ, управление и навигация: тезисы докладов XXIII Международной научной конференции. Евпатория, 2018. С. 17–18. EDN: UVTUNQ
7. Malyshev V.V., Piyavsky B.S., Piyavsky S.A. A decision making method under conditions of diversity of means of reducing uncertainty // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2010. Vol. 49. No. 1. P. 44–58. <https://doi.org/10.1134/S1064230710010065>
8. Golubev S.I., Malyshev V.V., Piyavskii S.A., Sypalo K.I. Decision Making in MultiCriteria Problems at the Image Design Stage of Aviation Rocket Technique // *Journal of Computer and Systems Sciences International*.

2020. Vol. 59. No. 2. P. 223–231. <https://doi.org/10.1134/S1064230720020057>

9. *Malyshev V.V., Piyavskii S.A.* The confident judgment method in the selection of multiple criteria solutions // *Systems Analysis and Operations Research*. 2015. Vol. 54. P. 754–764.

10. *Cong Y, Mei X, Liu T, Guan G.* Mission-capable satellite prediction method for ultra large remote-sensing satellite constellation based on BP neural network // *Research Square*. 2024. P. 1–23. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5351953/v1>

11. *Занин К.А., Клименко Н.Н., Москатынъев И.В.* Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли. Часть 1. Базовые проектные решения и пути модернизации космических аппаратов оптико-электронного наблюдения // *Воздушно-космическая сфера*. 2020. № 2 (103). С. 82–89. <https://doi.org/10.30981/2587-7992-2020-103-2-82-89> EDN: ТТОУЕР

12. *Занин К.А., Клименко Н.Н., Москатынъев И.В.* Современные космические аппараты дистанционного зондирования Земли. Часть 2. Особенности применения коммерческих космических аппаратов оптико-электронного наблюдения для решения задач в интересах государственных и военных потребителей // *Воздушно-космическая сфера*. 2020. № 3 (104). С. 90–101. <https://doi.org/10.30981/2587-7992-2020-104-3-90-101> EDN: FWWEDK

13. *Занин К.А., Москатынъев И.В.* Рациональное баллистическое построение космической системы радиолокационного наблюдения // *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*. 2018. № 9. С. 23–29. EDN: XYXHPF

14. *Kadochnikov A., Tokarev A.* Cataloging system for Russian satellites remote sensing data: main characteristics and operating experience // *January 2020E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 223. No. 1. Article no. 03023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022303023> EDN: NTUUEF

15. *Ivanov A.Y., Kucheiko A.A.* Distribution of oil spills in inland seas based on SAR image analysis: a comparison between the Black Sea and the Caspian Sea // *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 37. No. 9. P. 1–14. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1088677> EDN: WNZLCV

16. *Болкунов А.И., Красильщиков М.Н., Малышев В.В.* Комплексная оценка эффективности навигационных спутниковых систем // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2022. № 3. С. 139–156. <https://doi.org/10.31857/S0002338822030039> EDN: WGKXTD

17. *Петрухин Б.М., Бычков Ю.В., Летягин А.А., Фурсаева Т.В.* О допустимом уровне рисков реализации программ стратегического планирования технологических инноваций в развитии космических средств //

Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23. № 4. С. 89–98. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2024-23-4-89-98> EDN: JKPORD

18. *Балухто А.Н., Твердохлебова Е.М.* Современный подход к исследованию эффективности космических систем дистанционного зондирования Земли // *Космонавтика и ракетостроение*. 2022. № 3 (126). С. 122–136. EDN: UXKNFR

19. *Li X., Sun Ch., Fan H., Yang J.* Remote-Sensing Satellite Mission Scheduling Optimisation Method under Dynamic Mission Priorities // *MDPI Mathematics*. 2024. Vol. 12. No. 11. Article no. 1704. <https://doi.org/10.3390/math12111704> EDN: JJUBY

20. *Li Y., Hao X., Zhang L.* Data processing system design methodology for high-orbit remote sensing satellites // *Journal of Physics Conference Series*. 2025. Vol. 2977. No. 1. Article no. 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2977/1/012005> EDN: NPQMQR

References

1. Starkov AV, Emelianov AA, Grishantseva LA, Zubkova KI, Morozov AA, Trishin AA. Methodology for managing the flows of target information in the remote sensing space system. Part 1. Task formalization. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2021;22(1):54–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-54-64> EDN: EWFUYU

2. Starkov AV, Emelianov AA, Grishantseva LA, Zubkova KI, Morozov AA, Trishin AA. Methodology for managing the flows of target information in the remote sensing space system. Part 2. Interrelated mathematical models systems formation. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2021;22(2):148–161. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-2-148-161>

3. Emelianov AA, Grishantseva LA, Zubkova KI, Malyshev VV, Nam NVH, Starkov AV, Win ZY. Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution. *Advances in the Astronautical Sciences*. 2020;170:495–504. EDN: QUXMHN

4. Emelianov AA. Multiple satellite orbital groupings: management and application approaches. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space: Proceedings of the 21st International Conference, 13–17 November, 2023*. Moscow. P. 2. (In Russ.) EDN: NUTSXP

5. Khailov MN, Zaichko VA, Tyulin AE, Yemelyanov AA. The impact of the digital transformation of society on the priorities of remote sensing development in Russia. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space. Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences: Proceedings of the 18th All-Russian Open Conference, 16–20 November, 2020*. Moscow. P. 3. (In Russ.) EDN: KQPPBN

6. Tyulin AE, Selin VA, Yemelyanov AA. Updating the priorities of the development of the domestic industry of remote sensing of the earth from space. *System analysis, management and navigation: Proceedings of the XXIII International Scientific Conference, 18 July, 2018*. Yevpatoria. P. 17–18. (In Russ.) EDN: UVTUNQ
7. Malyshev VV, Piyavsky BS, Piyavsky SA. A decision making method under conditions of diversity of means of reducing uncertainty. *Journal of Computer and Systems Sciences*. 2010;49(1):44–58. <https://doi.org/10.1134/S1064230710010065>
8. Golubev SI, Malyshev VV, Piyavskii SA, Sypalo KI. Decision Making in MultiCriteria Problems at the Image Design Stage of Aviation Rocket Technique. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2020;59(2): 223–231. <https://doi.org/10.1134/S1064230720020057>
9. Malyshev VV, Piyavskii SA. The confident judgment method in the selection of multiple criteria solutions. *Systems Analysis and Operations Research*. 2015;54: 754–764. <http://doi.org/10.1134/S1064230715050093>
10. Cong Y, Mei X, Liu T, Guan G. Mission-capable satellite prediction method for ultra large remote-sensing satellite constellation based on BP neural network. *Research Square*. 2024;1–23. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5351953/v1>
11. Zanin KA, Klimenko NN, Moskatinev IV. Modern Ers imagery satellites. Part 1. Basic design solutions and upgrade trends for ers imagery satellites. *Aerospace Sphere Journal*. 2020;(2):95–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.30981/2587-7992-2020-104-3-90-101> EDN: FWWEDK
12. Zanin KA, Klimenko NN, Moskatinev IV. Modern ers imagery satellites. Part 2. Peculiarities of commercial imagery satellites application for governmental and military users. *Aerospace Sphere Journal*. 2020;(3):90–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.30981/2587-7992-2020-104-3-90-101> EDN: FWWEDK
13. Zanin KA, Moskatinev IV. Rational ballistic construction of a space radar surveillance system. *Polet*. 2018;(9):23–29. (In Russ.) EDN: XYXHPF
14. Kadochnikov A, Tokarev A. Cataloging system for Russian satellites remote sensing data: main characteristics and operating experience. *January 2020E3S Web of Conferences*. 2020;223(1):03023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022303023>
15. Ivanov AY, Kucheiko AA. Distribution of oil spills in inland seas based on SAR image analysis: a comparison between the Black Sea and the Caspian Sea. *International Journal of Remote Sensing*. 2015;37(9):2101–2114. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1088677> EDN: NTUUEF
16. Bolkunov AI, Krasil'shikov MN, Malyshev VV. Comprehensive assessment of the effectiveness of navigation satellite systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2022;61(3):430–446. <https://doi.org/10.1134/S1064230722030030> EDN: PPWYMV
17. Petrukhin BM, Bychkov YuV, Letyagin AA, Fursaeva TV. On the acceptable level of risks in the implementation of strategic planning programs for technological innovations in the development of space systems. *Vestnik of Samara university. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024;23(4):89–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2024-23-4-89-98> EDN: JKPOED
18. Balukhto AN, Tverdokhlebova EM. Modern approach to research of the effectiveness of space systems of remote sensing of the Earth. *Cosmonautics and Rocket Engineering*. 2022;(3):122–136. (In Russ.) EDN: UXKNFR
19. Li X, Sun Ch, Fan H, Yang J. Remote-sensing satellite mission scheduling optimisation method under dynamic mission priorities. *MDPI Mathematics*. 2024; 12(11):1704. <https://doi.org/10.3390/math12111704> EDN: JJUBTY
20. Li Y, Hao X, Zhang L. Data processing system design methodology for high-orbit remote sensing satellites. *Journal of Physics Conference Series*. 2025;2977(1): 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2977/1/012005> EDN: NPQMOK

Сведения об авторах

Старков Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; eLIBRARY SPIN-код: 5242-3413, ORCID: 0000-0002-2332-904X; e-mail: starkov@goldstar.ru

Морозов Александр Андреевич, аспирант кафедры системного анализа и управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; eLIBRARY SPIN-код: 1394-5795, ORCID: 0000-0002-9325-3829; e-mail: aamorozko@mail.ru

About the authors

Alexander V. Starkov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of System Analysis and Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2332-904X, eLIBRARY SPIN-code: 5242-3413; e-mail: starkov@goldstar.ru

Alexander A. Morozov, Postgraduate student of the Department of System Analysis and Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 1394-5795, ORCID: 0000-0002-9325-3829; e-mail: aamorozko@mail.ru