



DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-148-161

УДК 629.78

Научная статья / Research article

Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли Часть 2. Формирование системы взаимосвязанных математических моделей

А.В. Старков^а✉, А.А. Емельянов^б, Л.А. Гришанцева^б, К.И. Жуковская^б, А.А. Морозов^б, А.А. Тришин^а

^аМосковский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

^бАкционерное общество «Российские космические системы», Научный центр оперативного мониторинга Земли,
Российская Федерация, 127490, Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25

✉ E-mail: starkov@goldstar.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 13 февраля 2021 г.

Доработана: 21 апреля 2021 г.

Принята к публикации: 14 мая 2021 г.

Аннотация. Во второй части цикла статей рассматриваются вопросы системной организации математических моделей для решения задачи управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Представлено описание взаимосвязанных математических моделей орбитальной группировки как составных частей информационной системы, основной задачей которой является съемка наземных объектов и формирование начального объема информации для ее дальнейшей обработки. Для расчета времени обслуживания заявки космическим сегментом предложены методики формирования: модели эволюции орбиты космического аппарата дистанционного зондирования Земли; модели прогноза возможных интервалов коррекции космического аппарата для поддержания номинальных параметров орбит; модели прогноза возможных интервалов времени циклов включения/выключения аппаратуры наблюдения; модели прогноза возможных интервалов времени для сброса полученной информации на пункт приема и передачи информации. При расчете затрат на обслуживание единичной заявки со стороны орбитального комплекса учитывалась как стоимость обслуживания одного космического аппарата в единицу времени, так и стоимость обработки единичной заявки со стороны наземного комплекса. В заключении предложена обобщенная форма представления модели потока целевой информации космической системы дистанционного зондирования Земли как взаимосвязанная последовательность функций изменения объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функций изменения трафика). Рассмотрены общие подходы к решению оптимизационной задачи.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, обработка данных, распределение информационных ресурсов, оптимизация, эффективность, пункты приема информации, наземный комплекс приема обработки и распределения информации

Для цитирования

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. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-148-161

© Старков А.В., Емельянов А.А., Гришанцева Л.А., Жуковская К.И., Морозов А.А., Тришин А.А., 2021



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

Methodology for managing the flows of target information in the remote sensing space system

Part 2. Interrelated mathematical models systems formation

A.V. Starkov^a✉, A.A. Emelianov^b, L.A. Grishantseva^b, K.I. Zhukovskaya^b, A.A. Morozov^b, A.A. Trishin^a

^aMoscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoe Shosse, 125993, Moscow, Russian Federation

^bRussian Space Systems, Research Center for Earth Operative Monitoring,
b. 51, h.25, Decabristov St, 127490, Moscow, Russian Federation

✉ E-mail: starkov@goldstar.ru

Article history

Received: February 13, 2021

Revised: April 21, 2021

Accepted: May 14, 2021

Keywords: remote sensing of the Earth, data processing, distribution of information resources, optimization, efficiency, information reception points, ground-based information reception and distribution complex

Abstract. In the second part of the series of articles, the issues of the systemic organization of mathematical models for solving the problem of controlling the flows of target information in the Earth remote sensing space system are considered. A description of the interrelated mathematical models of the orbital constellation as components of the information system, the main task of which is to survey ground objects and the formation of the initial volume of information for its further processing, is presented. To calculate the time of servicing the request by the space segment, the following methods of formation are proposed: a model of the evolution of the Earth remote sensing spacecraft orbit; model for forecasting possible spacecraft correction intervals to maintain nominal orbital parameters; model for forecasting possible time intervals for on / off cycles of observation equipment; model for forecasting possible time intervals for dumping the received information to the information reception points. When calculating the cost of servicing a single request from the orbital complex, both the cost of servicing one spacecraft per unit of time and the cost of processing a single request from the ground complex were taken into account. In conclusion, a generalized form of representation of the target information flow model of the Earth remote sensing space system is proposed as an interconnected sequence of functions for changing the amount of information when an appropriate processing process (traffic change functions) is applied to it. General approaches to solving the optimization problem are considered.

For citation

Starkov AV, Emelianov AA, Grishantseva LA, Zhukovskaya 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 Researches*. 2021;22(2):148–161. (In Russ.) doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-148-161

Введение

В первой части данной серии статей были представлены результаты формализации актуальной задачи управления потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), сформулирована техническая постановка задачи и предложен общий методический подход к решению поставленной технической задачи управления, который включает в себя: формулировку постановки оптимизационной задачи, выбор общего подхода к ее решению и определение условий применимости [1—9].

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:

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

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

с учетом возможности вычисления представленных выше системных показателей, или их свертки, при наличии текущих ограничений Характеристики узлов

и каналов связи между ними считаются известными и по ним мы можем определить время и стоимость передачи информации. Прохождение трафика по графу приводит к вычислению системных показателей.

Представленная математическая постановка определяет необходимость в разработке согласованных между собой математических моделей более низкого уровня [2–4], декомпозиция которых изображена на рис. 1.

1. Общие подходы к формированию отдельных элементов системы взаимосвязанных моделей

К ним относятся (см. рис. 1): модель движения в задаче определения и прогнозирования состояния космического аппарата (КА), а также проведения орбитальных коррекций; модели описания земных объектов модель проведения съемки, включая модели

целевой аппаратуры; модели проведения сеансов связи и передачи целевой информации между КА и пунктом приема и передачи информации (ППИ) [2].

Результатом применения моделей являются:

— множество интервалов времени вывода КА на техобслуживание, связанное с необходимостью проведения коррекций орбиты [10–18];

— последовательность возможных интервалов времени проведения наблюдений заданного района

$$\{(t_{ik}^1, t_{ik}^2)\}, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K};$$

— последовательность возможных интервалов времени проведения сеансов связи КА ↔ ППИ

$$\{(t_{il}^1, t_{il}^2)\}, i = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}.$$

В качестве модели движения можно принять систему дифференциальных уравнений, описывающих пространственное движение космического аппарата в оскулирующих элементах [10–15]:

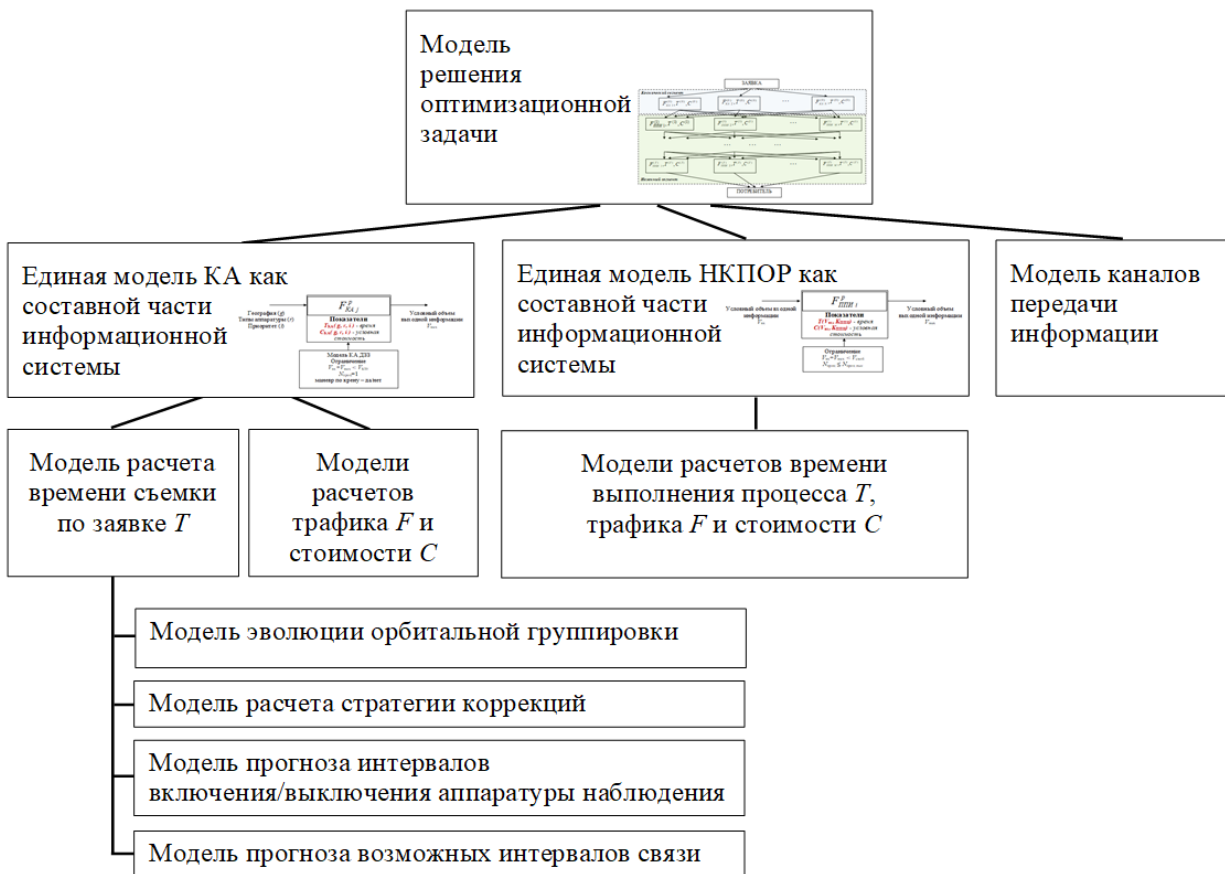


Рис. 1. Система взаимосвязанных моделей

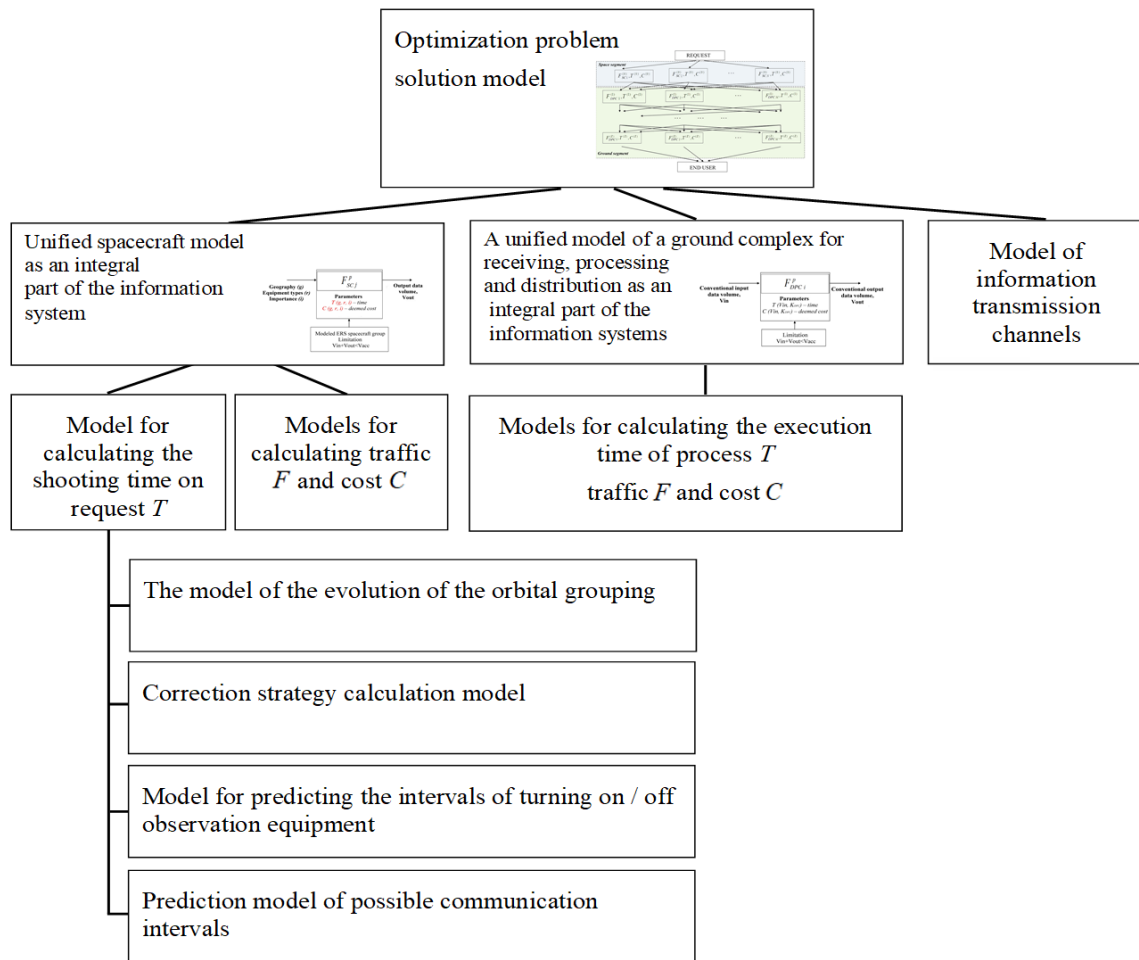


Figure 1. System of interconnected models

$$\frac{dp}{dt} = 2r \sqrt{\frac{p}{\mu}} \sum g_y; \quad \frac{de}{dt} = \sqrt{\frac{p}{\mu}} \left\{ \sin \vartheta \sum g_x + \left[\cos \vartheta + \frac{r}{p} (\cos \vartheta + e) \right] \sum g_y \right\}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \frac{\sin u}{\sin i} \sum g_z; \quad \frac{di}{dt} = \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \cos u \sum g_z$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\sqrt{\mu p}}{r^2} + \frac{\cos \vartheta}{e} \sqrt{\frac{p}{\mu}} \sum g_x - \frac{\sin \vartheta}{e} \left(1 + \frac{r}{p} \right) \sqrt{\frac{p}{\mu}} \sum g_y;$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{\sqrt{\mu p}}{r^2} - \frac{r}{\sqrt{\mu p}} \frac{\sin u}{\tan i} \sum g_z$$

с учетом влияния нецентральности гравитационного поля Земли, возмущений гравитационной природы от Луны и Солнца, давления солнечного света,

торможения атмосферой и работы корректирующей двигательной установки.

Основными возмущениями типовых орбит КА орбитальной группировки (ОГ) ДЗЗ являются долгопериодические возмущения гринвичской долготы восходящего узла трасс, вековые возмущения эксцентриситета, аргумента перигея, наклона и абсолютной долготы восходящего узла.

Для типовых орбит эти задачи в основном сводятся [10—18] к формированию (поддержанию) гринвичских долгот восходящих узлов орбит в заданном ограниченном диапазоне, который определяет возможные колебания трасс полета. Поэтому при построении космических систем необходимо решать задачу приведения и стабилизации трасс полета КА.

Классическое решение предполагает проведение орбитальных коррекций с целью изменения двух параметров — высоты перигея орбиты и периода обращения КА [10—18]. Задача об изменении высоты перигея формулируется следующим образом. Задана исходная орбита. Полагается, что она определяется апогейным и перигейным расстояниями соответственно $r_{п1}$, $r_{а1}$. Требуется определить величину, направление и точку приложения управляющего импульса скорости, обеспечивающего изменение перигейного расстояния с $r_{п} = r_{п1}$ на $r_{п} = r_{п2}$ при условии сохранения апогейного расстояния орбиты, т.е. при условии $r_{а1} = r_{а2}$. Оптимальный маневр при изменении большой полуоси орбиты характеризуется известным трансверсальным импульсом, приложенным в перигее орбиты.

Стохастический подход к решению задачи управления подразумевает линеаризацию исходных уравнений движения в окрестности средней долготы [13—14]. Это позволяет синтезировать алгоритм управления для проведения динамических операций в окрестности опорной орбиты. Так как главными возмущениями, изменяющими драконический период обращения КА по орбите, являются возмущения вследствие резонанса с долготными членами разложения гравитационного потенциала и доминирующими являются компоненты возмущений с индексами (2, 2, 1, 1) в разложении геопотенциала, то в уравнениях движения можно выделить уравнения, описывающие эволюцию средней долготы и периода обращения (скорости дрейфа). С учетом ошибок реализации управляющего ускорения при корректировании средней долготы и возмущений от коррекции наклона уравнение движения долготы восходящего узла представимо в дискретном виде (см. [13—14]).

Для определения последовательности возможных интервалов времени проведения наблюдений отдельным КА заданного района можно использовать представленную выше модель прогноза с учетом запретов на проведение съемки, связанных с техобслуживанием КА и проведением коррекций. Иллюстрация возможных моделей объектов съемки и проверки возможности наблюдения и сеанса связи приведена на рис. 2—4 [2].

При этом должны учитываться возможности многопроходной съемки, выполняемой в надир, многопроходной съемки, выполняемой с переориентацией оси визирования камеры, съемки в азимутальном режиме, реализуемом за счет синхронизированного программного разворота по тангажу и крену, одновитковой двухпо-

лосной съемки со скачкообразной переориентацией оси визирования камеры по тангажу и крену после первого прохода. В модели переориентации КА участкам изменения углов визирования земных объектов бортовой съемочной аппаратурой КА соответствуют участки кусочно-постоянной функции скорости их переориентации, а сам процесс переориентации бортовой съемочной аппаратуры КА характеризуется предельным углом визирования земного объекта и предельной скоростью.

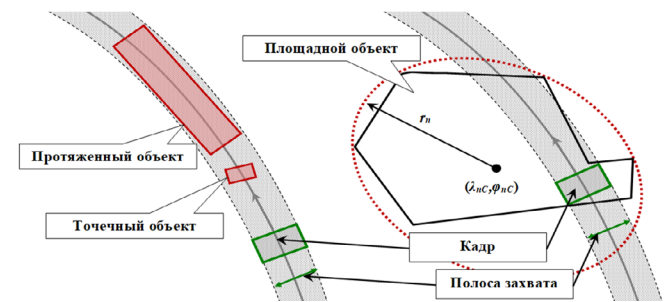


Рис. 2. Типы объектов съемки

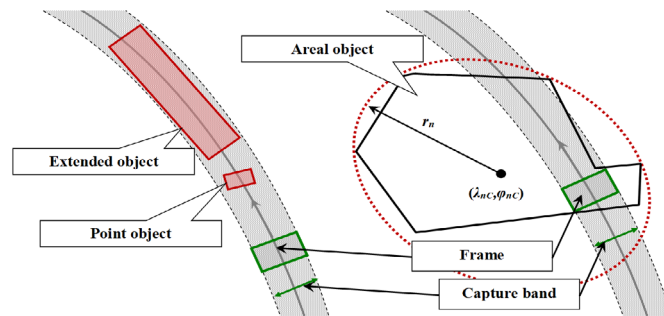


Figure 2. Types of shooting objects

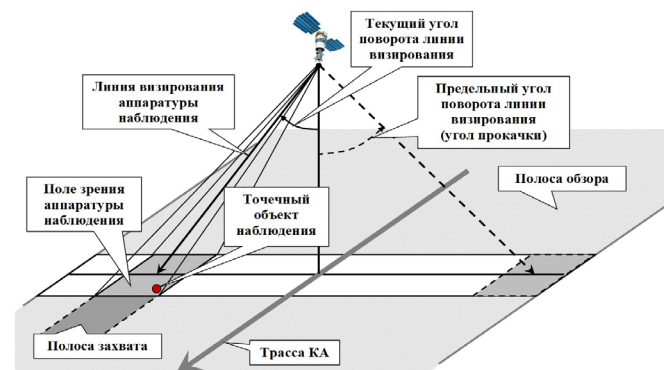


Рис. 3. Проверка возможности наблюдения

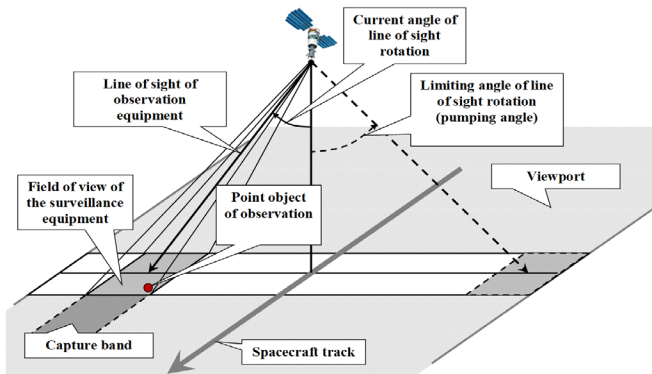


Figure 3. Checking the possibility of observation

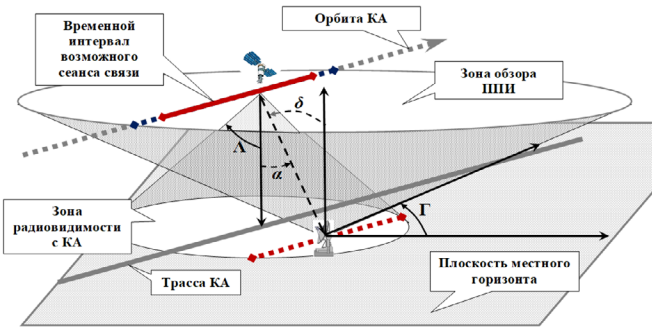


Рис. 4. Проверка возможности проведения сеанса связи КА ↔ ППИ

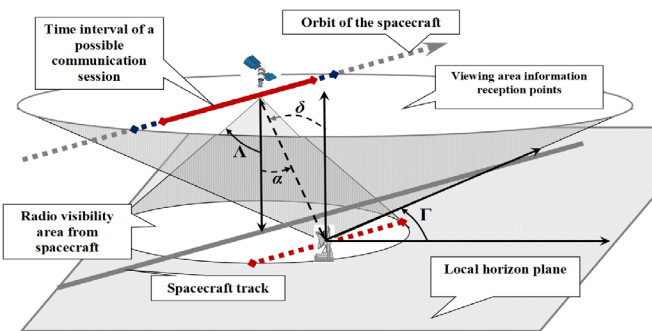


Figure 4. Checking the possibility of conducting a communication session Spacecraft ↔ information reception points

Для расчета ограничений на объем данных отдельно взятого КА можно принять модель динамики бортового запоминающего устройства, в которой занятый объем БЗУ увеличивается/уменьшается линейно по времени, скорость роста зависит от числа одновременно работающих камер, скорость сброса определяется производительностью передающей аппаратуры, а приращение занятого объема бортового запоминающего устройства (БЗУ) за счет съемки

одного объекта определяется суммарным объемом снимков одновременно задействованных камер.

Как было отмечено ранее обобщенная форма представления модели потока целевой информации космической системы ДЗЗ может быть представлена как взаимосвязанная последовательность функций изменения объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функций изменения трафика).

Формально каждый элемент рассматриваемой системы представляется как функция преобразования объема входной информации в объем выходной информации инвариантно к ее тематическому содержанию, при одновременном вычислении показателей эффективности: времени, необходимого для выполнения процесса; условной стоимости обработки. И проверке ограничений: на максимальное количество одновременно выполняющихся однотипных процессов; на максимальный общий объем памяти.

В рамках такой формализации для космических аппаратов, наземных пунктов и линий необходимо сформировать модель расчета объема выходной информации; модель расчета времени выполнения процесса; модель расчета стоимости.

Для оценки объема сбрасываемой с отдельного КА на ППИ информации (начального трафика) можно принять, что для каждого типа аппаратуры наблюдения имеется прямая связь между общей площадью района съемки, заданного в заявке, и объемом информации, передаваемым с каждого конкретного КА на ППИ. Эта связь может быть задана как в виде аналитической функции, так и таблично. Время выполнения процесса определяется как время, необходимое для передачи циклограммы работы на борт КА, для проведения съемки и передачи снимка на ППИ. Ограничением является объем БЗУ. Все эти параметры вычисляются с использованием математического аппарата, методика формирования которого представлена выше.

Для оценки затрат на обслуживание единичной заявки со стороны орбитального комплекса можно считать, что стоимость обслуживания одного КА в единицу времени $C_{уд}$ зависит от сложности КА — $Q_{КА}$ и затрат на оплату труда операторов смены. Тогда оценку стоимости обслуживания заявки $C_{iqКА}$ одним КА можно рассчитать по формуле [2—4]

$$C_{jq \text{ КА}} = (C_{уд}(Q_{ка}) + C_{оп} \cdot N_{оп}) \cdot (t_{пд2} - t_0),$$

где $C_{оп}$ — стоимость чел.-ч в конкретном ППИ; $N_{оп}$ — число операторов в смене. Параметр $C_{уд}(Q_{ка})$, входящий в эмпирическую формулу, существенно зависит от уровня развития техники и нуждается в периодическом уточнении на основании обработки статистических данных по различным КА. Также возможно более упрощенное, табличное представление уравнения для стоимости обслуживания заявки.

Для оценки изменения объема информации при применении к ней процесса обработки будем считать, что имеется прямая связь между объемом входной и выходной информации. Эта связь может быть задана как в виде аналитической функции, так и таблично. Тогда общее время выполнения процесса рассчитывается по формуле [2—4]

$$T_{проц i} = K_{ппи} \cdot T_{эталон.проц i}(V_{вх}) + T_{ожидания}, \quad (1)$$

где $T_{ожидания}$ — время ожидания до момента освобождения ресурсов в следующем узле, когда для каждого момента времени выполнения процесса выполняются условия: количество одновременно запущенных однотипных процессов на каждом наземном пункте строго меньше заданного $V_{вх} + V_{вых} < V_{своб}$; объем входной и выходной информации не превышает уровня объема свободной памяти $N_{проц} \leq N_{проц max}$; $T_{эталон.проц i}$ — эталонное время выполнения процесса в эталонном наземном пункте, зависящее от объема входной информации; $K_{ппи}$ — коэффициент производительности наземного пункта, в котором выполняется процесс обработки данных.

Возможно также более упрощенное представление расчета времени в виде таблицы.

Для оценки затрат на обслуживание процесса при обработке единичной заявки со стороны наземного пункта можно принять, что стоимость обслуживания процесса в единицу времени $C_{проц.уд}$ зависит от его сложности — $Q_{проц}$ и затрат на оплату труда задействованных операторов. Тогда для стоимости обслуживания заявки $C_{iqпроц}$ одним ППИ будем иметь

$$C_{jq \text{ проц}} = (C_{проц.уд}(Q_{проц}) + C_{оп} \cdot N_{оп}) \cdot C_{ппи} \cdot T_{эталон.проц i},$$

где $C_{оп}$ — стоимость чел.-ч в конкретном наземном пункте; $N_{оп}$ — число операторов, задействованных в процессе обработки; $C_{ппи}$ — коэффициент себестоимости наземного пункта, в котором выполняется процесс обработки данных.

Возможно более упрощенное представление расчета стоимости в виде таблицы.

Представленный подход к формированию математических моделей позволяет определить способы их дальнейшей программной реализации. При этом должна быть учтена необходимость обеспечения возможности оперативного внесения изменений как в форму представления, так и в параметры модели. Механизмы, которые обеспечат такую возможность, формируются одним из нижеперечисленных способов:

1. Текстовой формулой в синтаксисе языка программирования, например:

$$V_{вых} = \text{sqr}(V_{вход}).$$

В этом случае в параметры правой части формулы помимо $V_{вход}$ могут входить как длительность процесса, так и общие константы.

2. В виде полинома, например:
 $V_{вых} = aV_{вход}^2 + bV_{вход} + c$, где коэффициенты a, b, c задаются экспертами.

3. Таблично.

4. Внешней вычислительной библиотекой, если расчет показателей связан с привлечением сложной вычислительной процедуры.

2. Описание системы взаимосвязанных математических моделей

Модель процесса обработки информации космическим сегментом представляется в виде функции генерации трафика, входом которой являются параметры заявки потребителя. Результатом применения модели является величина информации, которая после проведения сеанса связи попадает для дальнейшей обработки в НКПОР. В процессе вычислений определяются показатели эффективности — время и стоимость [3].

Для расчета времени и стоимости обслуживания заявки космическим сегментом должны быть сформированы:

— модель эволюции орбиты КА ДЗЗ;

— модель прогноза возможных интервалов коррекции КА для поддержания номинальных параметров орбит (стратегии коррекций);

— модель прогноза возможных интервалов времени циклов включения/выключения аппаратуры наблюдения;

— модель прогноза возможных интервалов времени для сброса полученной информации на ППИ.

Для модели съемки земных объектов должны быть сформированы [2]:

— модель съемочного плана, включающая в себя: модели объектов съемки, модели для проверки выполнения условий съемки и модель временных последовательностей выполнения съемочных операций;

— модель съемки точечных объектов;

— модель съемки площадных объектов, сформированная на основе аппроксимации объекта съемки как в виде замкнутого полигона, так и в виде совокупности точечных объектов.

Модель передачи целевой информации между КА и ППИ в общем случае служит для определения интервалов взаимной видимости ППИ → КА и КА → ППИ.

Совокупность моделей целевого функционирования аппаратуры бортового информационного

комплекса КА составляют модель динамики состояния БЗУ и модели переориентации бортовой съемочной аппаратуры. Для модели изменения памяти в БЗУ можно считать, что в процессе съемки занятый объем БЗУ увеличивается линейно по времени, в процессе сброса — уменьшается также линейно по времени. Скорость роста зависит от числа одновременно работающих камер, скорость сброса определяется производительностью передающей аппаратуры. Приращение занятого объема БЗУ за счет съемки одного объекта определяется суммарным объемом снимков одновременно задействованных камер.

При выполнении съемки земных объектов бортовая съемочная аппаратура КА изменяет свою ориентацию. Переориентация аппаратуры совершается равномерно, скорость переориентации представляет собой кусочно-постоянную функцию, участки которой определяются парами последовательных моментов съемки земных объектов.

В результате время, необходимое для проведения съемки по заявке, определяется как совокупность суммарного времени проведения съемки, времени, необходимого для переориентации аппаратуры наблюдения, и времени, необходимого для того, чтобы КА

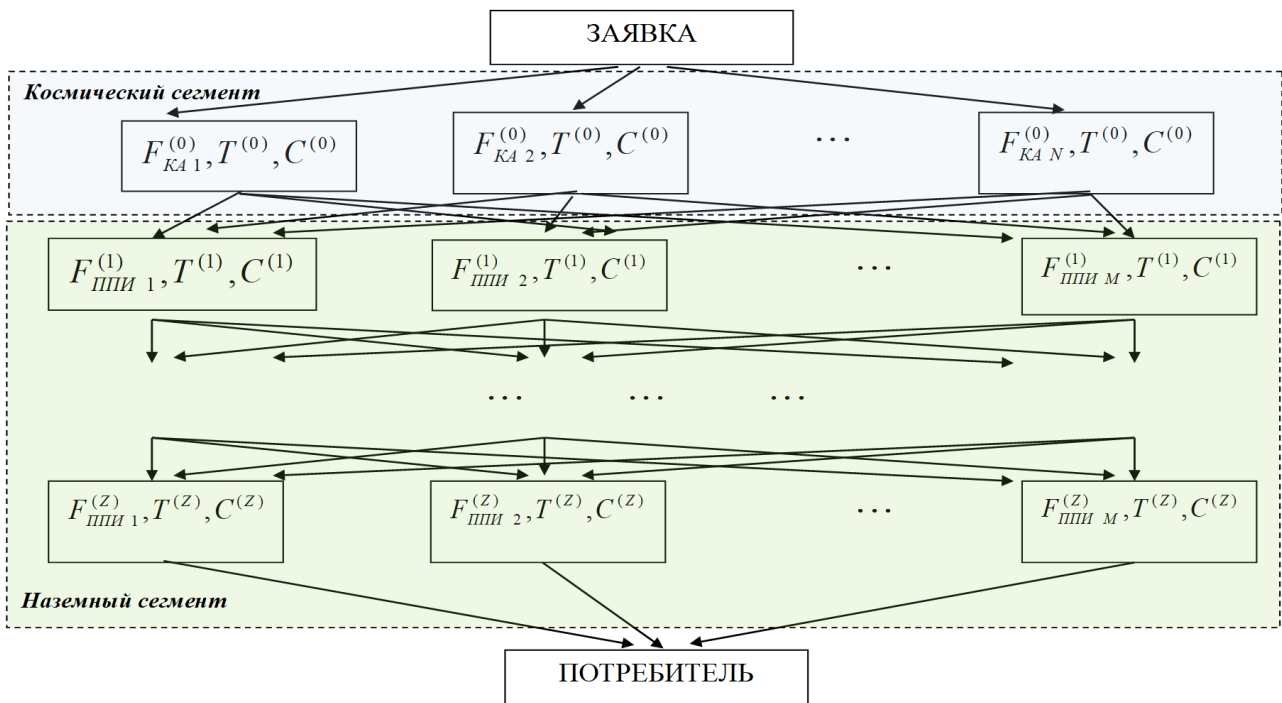


Рис. 5. Граф возможных вариантов выполнения заявки

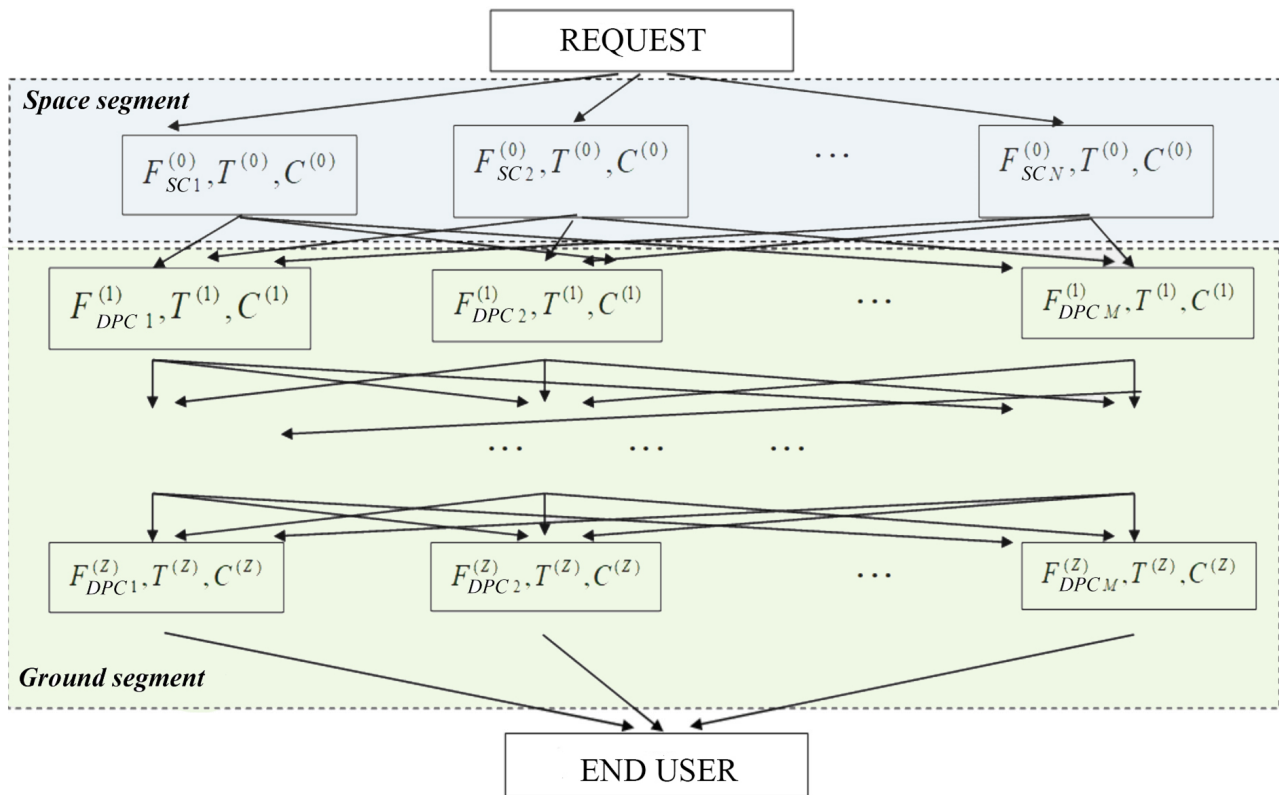


Figure 5. Graph of possible options for executing an order

оказался в зоне взаимной радиовидимости с одним из ППИ, при условии, что:

- КА в это время не совершает корректирующие маневры;
- объема памяти БЗУ достаточно для сохранения снимка объекта съемки на протяжении всего интервала наблюдений.

В конечном итоге каждый элемент рассматриваемой системы формально представляется как функция преобразования объема входной информации в объем выходной информации инвариантно к ее тематическому содержанию, при одновременном вычислении показателей эффективности:

- времени, необходимого для выполнения процесса;
- условной стоимости обработки и проверке ограничений;
- на максимальное количество одновременно выполняющихся однотипных процессов;
- на максимальный общий объем памяти.

Таким образом, возникает полностью определенная задача оптимизации распределения процессов обработки с учетом возможности вычисления представленных выше системных показателей или их свертки, при наличии текущих ограничений. Эта задача может быть интерпретирована как задача оптимизации маршрута на взвешенном графе (рис. 5) [4].

3. Общий подход к решению оптимизационной задачи

Как следует из постановки, задача оптимального распределения целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям системы является двухкритериальной. В связи с тем, что число критериев невелико, для ее решения можно воспользоваться классическим математическим аппаратом многокритериальной оптимизации [19—20], предварительно адаптировав их к условиям функционирования. Это позволит определить и выработать наиболее предпочтительные варианты распределения целевой инфор-

мации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям системы. Таким образом, целью является принятие решений в условиях многокритериальной неопределенности, позволяющей

- рассматривать множество всех допустимых способов учета неопределенности;
- формировать комплексную оценку решений в условиях неопределенности, используя любые известные и неизвестные свертки;
- рассматривать как количественные, так и качественные критерии;
- использовать интервальные оценки частных критериев;
- не задавать весовые коэффициенты (они считаются неопределенными);
- устанавливать предпочтения между отдельными критериями.

В случае, если число процессов и доступных ППИ для обработки заявки невелико, задача оптимального распределения может быть решена методом перебора. Кроме того, возможно применение одного из классических методов:

- метод сведения к однокритериальной задаче с использованием линейной свертки критериев;
- метод поиска Парето-оптимальных решений;
- метод последовательных назначений;
- метод случайной оптимизации.

В нашем случае, когда число критериев минимально и равно двум, по-видимому, наиболее эффективным вариантом служит представление всего множества Парето в виде графика, что позволяет проанализировать последствия всех возможных эффективных решений. Это не обеспечивает полного решения задачи, так как по-прежнему остается множество альтернатив, для которых необходимо выбрать единственное наилучшее. Один из современных путей развития Парето-оптимальных методов многокритериальной оптимизации состоит в том, чтобы предоставить возможность опираться на все множество допустимых способов учета неопределенности, что, однако, требует больших вычислительных ресурсов. Такой подход может быть реализован с использованием метода уверенных суждений [19—20].

Изучение частных методов и алгоритмов решения задачи позволяет выработать единый методический подход к их решению. Во-первых, можно заметить, что предлагаемые для решения численные методы

и алгоритмы являются стандартными при минимальной адаптации к рассматриваемой предметной области, что позволяет достаточно легко выполнить их программную реализацию.

Во-вторых, предложенная формализация моделей процессов обработки заявки также иллюстрирует общность в способах их формирования и программной реализации.

Наконец, в-третьих, реализация последовательности «модель–алгоритм–оптимизация» также свидетельствует о возможности выработать единый методический подход, в основе которого предлагается последовательное выполнение четырех основных этапов вычислений (расчетов), укрупненная блок-схема которых представлена на рис. 6.

Первый этап — моделирование динамики орбитальной группировки КА ДЗЗ. Целью является исследование взаимного расположения космических аппаратов и ППИ на всем интервале планирования. Определяется множество интервалов времени, доступных для проведения сеансов съемки и приема-передачи информации с учетом эволюции орбит и необходимости вывода КА на техническое обслуживание. Рассчитываются параметры для управления бортовой целевой аппаратурой.

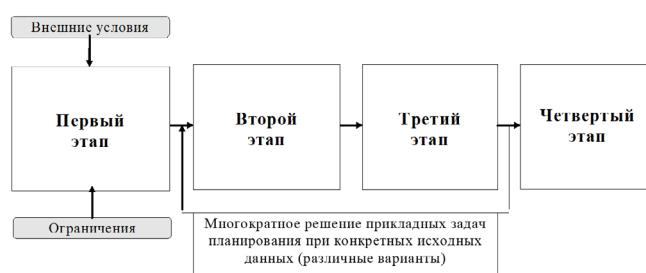


Рис. 6. Схема формирования и использования математических моделей

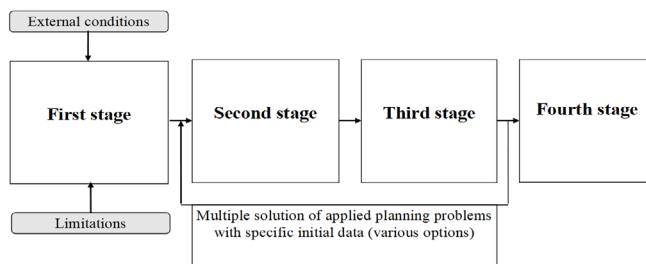


Figure 6. Scheme of the formation and use of mathematical models

Исходными данными являются:

- параметры орбиты КА;
- характеристики целевой аппаратуры;
- циклограммы работы отдельно взятых КА ОГ

ДЗЗ;

- информация о НКПОР (географическое расположение, зоны радиовидимости ППИ и др.).

К внешним условиям относятся:

- условия освещенности и наличие теней в районе съемки;
- облачность в районе съемки;
- совместимость радиочастотных диапазонов приема-передачи информации и др.

Необходимо отметить, что для проведения исследований необходимо использовать:

- упрощенные модели, которые позволяют интегрировать уравнения движения как без учета внешних управляющих воздействий, так и при использовании наиболее значимых;
- полные модели, учитывающие весь спектр возмущений, для расчетов орбитального движения КА на длительных интервалах времени вплоть до периода их активного существования.

Результатом *первого этапа* являются:

- возможные интервалы времени проведения съемки и их продолжительность;
- возможные интервалы проведения сеансов связи с наземными ППИ, их продолжительность и объем информации;
- условная стоимость реализации процесса съемки как параметров заявки потребителя.

Второй этап — формирование модели КА и элементов НКПОР как взаимосвязанных составных частей функционирования космической системы ДЗЗ, представляющей собой модель планирования с учетом специфики сценария ее целевого функционирования и постановки оптимизационной задачи. На этом этапе используются и обобщаются результаты выполнения предыдущего этапа в виде параметров математической модели.

Такая модель служит основой для реализации процедуры формирования (поиска) плана целевого функционирования. Элементы модели, по существу, выражают значения показателей эффективности выполнения целевых операций КА системы (см. п. 1.4), а также возможность или отсутствие возможности

потенциальных переходов между двумя последовательными процессами с учетом имеющихся ограничений.

Третий этап — решение задачи оптимизации распределения целевой информации по элементам (узлам) системы. Проводится синтез временной последовательности выполнения операций на основе модели первого и второго этапа. Следует отметить, что на данном этапе допускается возможность существования нескольких (или множества) планов, что особенно характерно для задач многокритериальной оптимизации.

Реализовать процедуру формирования оптимального плана можно с применением одного из классических, например, рассмотренных выше методов либо специально разработанных методов оптимизации.

Результатом выполнения рассматриваемого этапа методического подхода является один (или набор) оптимальных (близких к оптимальному) планов распределения целевой информации по узлам системы.

Четвертый этап — многократное решение задачи распределения потоков информации в целях проведения системных исследований. На этом этапе осуществляется многократное решение задачи управления при различных вариантах исходных данных, в качестве которых могут выступать параметры орбит КА ОГ ДЗЗ, характеристики бортовой аппаратуры КА, параметры и расположение элементов НКПОР, требования потребителей к результатам тематической обработки и т.д. Результаты многократного решения задачи позволяют выявить зависимости показателей эффективности целевого функционирования при реализации предложенного программно-математического подхода, т.е. провести параметрический анализ целевого функционирования системы в целом.

Заключение

В статье на основе математической постановки оптимизационной задачи определен перечень взаимосвязанных математических моделей, требующих дальнейшей разработки. В совокупности эти модели описывают процесс обработки, в том числе определяют, что происходит с объемом информации, и вычисляют системные показатели эффективности — время, требуемое для реализации процесса и его условную стоимость. Это позволяет окончательно представить

модель обработки информации как взаимосвязанную последовательность функций изменения условного объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функция изменения трафика), а сама математическая постановка задачи может быть сведена к оптимизации маршрута прохождения заявки по графу. Таким образом, можно сказать, что предлагаемый подход к формированию и использованию математических моделей при решении прикладных задач оптимизации распределения потоков целевой информации является системным, а для доведения ее до практического использования необходимо формирование соответствующих численных методов, алгоритмов и программного обеспечения.

Список литературы

1. Selin V.A., Emelyanov A.A., Sizov O.S., Emelyanov K.S., Borisov A.V. Medium-resolution optical range space images: consumer expectations // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. Т. 56. № 9. P. 1182—1189.
2. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Управление потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли: монография. М.: Изд-во МАИ, 2020. 232 с.
3. Емельянов А.А., Малышев В.В., Нгуен Виет Хоай Нам, Старков А.В. Математическая модель функционирования наземного сегмента обработки данных ДЗЗ в части распределения процессов обработки // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 2. С. 74—79.
4. Emelianov A.A., Grishantseva L.A., Zubkova K.I., Malyshev V.V., Nguyen Viet Hoai Nam, Starkov A.V., Zay Yar Win. Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution // *Advances in the Astronautical Sciences*. CA, USA: Univelt Inc. 2020. Vol. 170. P. 495—504.
5. Leun E.V., Leun V.I., Sysoev V.K., Zanin K.A., Shulepov A.V., Vyatlev P.A. The active control devices of the size of products based on sapphire measuring tips with three degrees of freedom // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 944. P. 012073. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012073
6. Zanin K.A., Moskatinev I.V. Improvement of Methods for Evaluating the Resolving Power of a Space Synthetic Aperture Radar // *Solar System Research*. 2018. Vol. 52. No. 7. P. 666—672. doi: 10.1134/S0038094618070213.
7. Zay Yar Win, Malyshev V.V., Bobronnikov V.T., Starkov A.V. The joint solution of problem of evasion and keeping in a neighborhood reference orbit // *Advances in the Astronautical Sciences*. CA, USA: Univelt Inc., 2020. Vol. 170. P. 433—442.
8. Malyshev V.V., Starkov A.V., Fedorov A.V. Orbital Corrections of Space Vehicles while Performing Dynamic Operations // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2013. Vol. 52. No. 2. P. 313—325. doi: 10.1134/S1064230713010085
9. Malyshev V.V., Starkov A.V., Zay Yar Win. The Decision of Problems of Evasion When Holding the Geostationary Satellites in the Neighborhood of The Reference Orbit // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 13-Special Issue, 2018. Vol. 10. P. 53—58.
10. Razoumny Y., Razoumny V., Kozlov P., Baranov A., Varatharajoo R. Method of optimization of the servicing space-based system orbits and detached units maneuvers parameters in the problem of on-orbit-servicing of the given multi-satellite space infrastructure // *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*. 2016.
11. Baranov A.A., Razoumny V.Y., Razoumny Y.N., Malyshev V.V. Low orbit spacecraft service planning // *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*. 2017. P. 835—844.
12. Baranov A.A., Grishko D.A., Mayorova V.I. The features of constellations' formation and replenishment at near circular orbits in non-central gravity fields // *Acta Astronautica*. November–December, 2015. Vol. 116. P. 307—317.
13. Krasil'shchikov M.N., Malyshev V.V., Fedorov A.V. Autonomous implementation of dynamic operations in a geostationary orbit. I. Formalization of control problem // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2015. Vol. 54(6). P. 916—930. doi: 10.1134/S1064230715060118
14. Voiskovskii A.P., Krasil'shchikov M.N., Malyshev V.V., Fedorov A.V. Autonomous implementation of dynamic operations in a geostationary orbit. II. Synthesis of control algorithms // *Journal of computer and systems sciences international*. 2016. Vol. 55 (6). P. 948—968. doi: 10.1134/S1064230716060113
15. Petukhov V.G. Application of the Angular Independent Variable and Its Regularizing Transformation in the Problems of Optimizing Low-Thrust Trajectories // *Cosmic Research*. 2019. Vol. 57 (5). P. 351—363. doi: 10.1134/S001095251905006X
16. Ivanyukhin A.V., Petukhov V.G. Low-Energy Sub-Optimal Low-Thrust Trajectories to Libration Points and Halo-Orbits // *Cosmic Research*. 2019. Vol. 57 (5). P. 378—388. doi: 10.1134/S0010952519050022
17. Petukhov V.G., Ivanyukhin A.V., Sang Wook W. Joint Optimization of Control and Main Trajectory and Design Parameters of an Interplanetary Spacecraft with an Electric Propulsion System // *Cosmic Research*. 2019. Vol. 57 (3). P. 188—203. doi: 10.1134/S0010952519030079
18. Grechkoseev A.K., Krasil'shchikov M.N., Kruzhkov D.M., Mararescul T.A. Refining the Earth Orientation Parameters Onboard Spacecraft: Concept and Information Technologies //

J. Comput. Syst. Sci. Int. 2020. Vol. 59 (4). P. 598—608. doi: 10.1134/S1064230720040061

19. 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 // J. Comput. Syst. Sci. Int. 2020. Vol. 59 (2). P. 223—231. doi: 10.1134/S1064230720020057

20. Brusov V.S., Korchagin P.O., Malyshev V.V., Piyavsky S.A. Advanced «Confident Judgments» Method when Choosing Multicriteria Solutions in a Multipurpose Approach // J. Comput. Syst. Sci. Int. 2020. Vol. 59 (1). P. 83—94. doi: 10.1134/S1064230720010049

References

1. Selin VA, Emelyanov AA, Sizov OS, Emelyanov KS, Borisov AV. Medium-resolution optical range space images: consumer expectations. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020;56(9):1182—1189. doi: 10.1134/S0001433820090224

2. Emel'yanov AA, Malyshev VV, Smol'yaninov YuA, Starkov AV. *Upravlenie potokami celevoj informacii pri funkcionirovanii kosmicheskoy sistemy distancionnogo zondirovaniya Zemli [Control of target information flows in the functioning of the space system of remote sensing of the Earth: Monograph]*. Moscow: MAI-PRINT Publ.; 2020. (In Russ.)

3. Emelyanov AA, Malyshev VV, Nguyen VHN, Starkov AV. Mathematical model of functioning of the ground segment in distributed remote sensing data processing. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]*. 2018;2:74—79. (In Russ.)

4. Emelianov AA, Grishantseva LA, Zubkova KI, Malyshev VV, Nguyen VHN, Starkov AV, Zay YW. Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution. *Advances in the Astronautical Sciences* (vol. 170). CA, USA: Univelt Inc.; 2020. p. 495—504.

5. Leun EV, Leun VI, Sysoev VK, Zanin KA, Shulepov AV, Vyatlev PA. The active control devices of the size of products based on sapphire measuring tips with three degrees of freedom. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018;944:012073. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012073

6. Zanin KA, Moskatinev IV. Improvement of Methods for Evaluating the Resolving Power of a Space Synthetic Aperture Radar. *Solar System Research*. 2018;52(7):666-672. doi: 10.1134/S0038094618070213

7. Zay Yar Win, Malyshev VV, Bobronnikov VT, Starkov AV. The joint solution of problem of evasion and keeping in a neighborhood reference orbit. *Advances in the Astronautical Sciences*. CA, USA: Univelt Inc. 2020;170:433—442.

8. Malyshev VV, Starkov AV, Fedorov AV. Orbital Corrections of Space Vehicles while Performing Dynamic

Operations. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2013.52(2):313—325. doi: 10.1134/S1064230713010085

9. Malyshev VV, Starkov AV, Zay Yar Win. The Decision of Problems of Evasion When Holding the Geostationary Satellites in the Neighborhood of The Reference Orbit. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 13-Special Issue, 2018;10:53—58.

10. Razoumny Y, Razoumny V, Kozlov P, Baranov A, Varatharajoo R. Method of optimization of the servicing space-based system orbits and detached units maneuvers parameters in the problem of on-orbit-servicing of the given multi-satellite space infrastructure. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*. 2016.

11. Baranov AA, Razoumny VY, Razoumny YN, Malyshev VV. Low orbit spacecraft service planning. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC68*. 2017:835—844.

12. Baranov AA, Grishko DA, Mayorova VI. The features of constellations' formation and replenishment at near circular orbits in non-central gravity fields. *Acta Astronautica*. November–December 2015;116:307—317.

13. Krasil'shchikov MN, Malyshev VV, Fedorov AV. Autonomous implementation of dynamic operations in a geostationary orbit. I. Formalization of control problem. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2015;54(6):916—930. doi: 10.1134/S1064230715060118

14. Voiskovskii AP, Krasil'shchikov MN, Malyshev VV, Fedorov AV. Autonomous implementation of dynamic operations in a geostationary orbit. II. Synthesis of control algorithms. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2016;55(6):948—968. doi: 10.1134/S1064230716060113

15. Petukhov VG. Application of the Angular Independent Variable and Its Regularizing Transformation in the Problems of Optimizing Low-Thrust Trajectories. *Cosmic Research*. 2019; 57(5);351—363. doi: 10.1134/S001095251905006X

16. Ivanyukhin AV, Petukhov VG. Low-Energy Sub-Optimal Low-Thrust Trajectories to Libration Points and Halo-Orbits. *Cosmic Research*. 2019;57(5):378-388. doi: 10.1134/S0010952519050022

17. Petukhov VG, Ivanyukhin AV, Sang Wook W. Joint Optimization of Control and Main Trajectory and Design Parameters of an Interplanetary Spacecraft with an Electric Propulsion System. *Cosmic Research*. 2019;57(3):188-203. doi: 10.1134/S0010952519030079

18. Grechkoseev AK, Krasil'shchikov MN, Kruzhkov DM, Mararescul TA. Refining the Earth Orientation Parameters Onboard Spacecraft: Concept and Information Technologies. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(4):598—608. doi: 10.1134/S1064230720040061

19. Golubev SI, Malyshev VV, Piyavskii SA, Sypalo KI. Decision making in multicriteria problems at the image design

stage of aviation rocket technique. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(2):223–231. doi: 10.1134/S1064230720020057 *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(1):83–94. doi: 10.1134/S1064230720010049

20. Brusov VS, Korchagin PO, Malyshev VV, Piyavsky SA. Advanced «Confident Judgments» Method when Choosing Multicriteria Solutions in a Multipurpose Approach.

Сведения об авторах

Старков Александр Владимирович, профессор кафедры системного анализа и управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), доктор технических наук; Scopus Author ID: 56205648500, eLIBRARI SPIN-код: 5242-3413; e-mail: starkov@goldstar.ru

Емельянов Андрей Александрович, начальник Научного центра оперативного мониторинга Земли — заместитель директора проектов по созданию систем дистанционного зондирования Земли, акционерное общество «Российские космические системы», кандидат технических наук; Scopus Author ID: 57214857574, eLIBRARI SPIN-код: 4484-1479; e-mail: ntsomz@ntsomz.ru

Гришанцева Любовь Александровна, начальник сектора Научного центра оперативного мониторинга Земли, акционерное общество «Российские космические системы», кандидат физико-математических наук; eLIBRARI SPIN-код: 9940-8756; e-mail: grishantseva_la@ntsomz.ru

Жуковская Ксения Ивановна, инженер-исследователь 1 категории Научного центра оперативного мониторинга Земли, акционерное общество «Российские космические системы»; eLIBRARI SPIN-код: 4805-5960; e-mail: zubkova.k@ntsomz.ru

Морозов Александр Андреевич, инженер-исследователь 3 категории Научного центра оперативного мониторинга Земли, акционерное общество «Российские космические системы»; e-mail: aamorozko@mail.ru

Тришин Алексей Александрович, студент кафедры информационно-управляющих комплексов летательных аппаратов, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: trishin0202@mail.ru

About the authors

Alexander V. Starkov, Professor of the Department of System Analysis and Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), Doctor of Technical Sciences; Scopus Author ID: 56205648500, eLIBRARI SPIN-code: 5242-3413; e-mail: starkov@goldstar.ru

Andrey A. Emelyanov, Head of the Research Center for Earth Operative Monitoring, Russian Space Systems, Candidate of Technical Sciences; Scopus Author ID: 57214857574, eLIBRARI SPIN-code: 4484-1479; e-mail: ntsomz@ntsomz.ru

Lyubov A. Grishantseva, Head of the Sector of the Research Center for Earth Operative Monitoring, Russian Space Systems, Candidate of Physical and Mathematical Sciences; eLIBRARI SPIN-code: 9940-8756; e-mail: grishantseva_la@ntsomz.ru

Ksenia I. Zhukovskaya, Research Engineer of the 1st Category of the Research Center for Earth Operative Monitoring, Russian Space Systems; eLIBRARI SPIN-code: 4805-5960; e-mail: zubkova.k@ntsomz.ru

Alexander A. Morozov, Research Engineer of the 3rd category of the Research Center for Earth Operative Monitoring, Russian Space Systems; e-mail: aamorozko@mail.ru

Alexey A. Trishin, Student of the Department of Information and Control Systems of Aircraft, Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: trishin0202@mail.ru