

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

М.М. Матюшин, Д.А. Зеленов, Е.В. Бакланов

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш), 141070, Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, д. 4

baklanov@mcc.rsa.ru

В настоящее время при оперативном управлении космическими аппаратами (КА) существует возможность выбора маршрутов передачи данных с задействованием различных контуров, включающих наземные и орбитальные средства доставки информации. В то же время инструмент для определения оптимальных маршрутов, увязывающий возможности передачи данных через различные контуры, отсутствует и оптимальные маршруты выбираются в ручном режиме руководителем полета, с привлечением большого количества специалистов. Применение систем ретрансляции, установка на КА абонентской аппаратуры, унификация командной и телеметрических радиолиний, объединение объектов наземной и космической инфраструктуры в единую систему передачи информации будет способствовать увеличению количества возможных маршрутов доставки данных при оперативном управлении КА. При планируемом росте орбитальной группировки КА, развитии наземной и космической инфраструктуры актуальной задачей становится выбор оптимальных маршрутов передачи данных; ее решение повысит эффективность оперативного управления КА. Этот выбор основан на сводном критерии, определяющем оптимальность исходя из текущей ситуации. Предложены подходы к разработке инструмента для определения оптимальных маршрутов доставки данных с задействованием средств наземного и космического базирования. Выработаны критерии оптимальности, представлены графоаналитические модели системы выбора оптимальных маршрутов при оперативном управлении космическими аппаратами.

**Ключевые слова:** оперативное управление, космические аппараты, передача данных, критерии оптимальности, маршруты

**Ссылка для цитирования:** Матюшин М.М., Зеленов Д.А., Бакланов Е.В. Выбор оптимальных маршрутов передачи данных при оперативном управлении космическими аппаратами // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 125–130. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-125-130

В настоящее время при оперативном управлении космическими аппаратами (КА) существует возможность выбора маршрутов передачи данных с задействованием различных контуров, включающих наземные и орбитальные средства доставки информации. Оптимизация маршрутов передачи данных относится к динамической модели сложных технических систем и представляет собой большой массив особых теоретических и технических проблем. При этом для поиска и реализации оптимальных маршрутов требуется управление всеми компонентами системы, включающей технические средства наземного и космического базирования [1].

Решение данных задач по выбору маршрутов передачи информации заключается в нахождении массивов данных, компонентами которых являются последовательность технических средств приема-передачи данных и линии связи между ними.

Например, при управлении российским сегментом Международной космической станции (РС МКС) существует 4 основных контура (рис. 1), с помощью которых можно передать информацию на борт и обратно.

1. Передача данных через наземные средства МО РФ. Расчетом возможных маршрутов пе-

редачи данных занимаются специалисты Главной оперативной группы управления РС МКС, с Центром управления полетами (ЦУП) ЦНИИмаш, г. Королев) во взаимодействии с представителями МО РФ.

2. Маршруты передачи данных через средства Наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) Роскосмос. Расчетом возможных вариантов передачи данных занимается Центр ситуационного анализа, координации и планирования (ЦСАКП) (ЦУП ЦНИИмаш, г. Королев).

3. Контур маршрутов передачи данных через средства ретрансляции Tracking and Data Relay Satellite System (TDRSS). Расчетом возможных маршрутов занимается NASA.

4. Контур маршрутов передачи данных через средства Многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСП) «Луч». Выбором маршрутов передачи данных занимается Центр управления ретрансляцией связи (ЦУРС) (ЦУП ЦНИИмаш, г. Королев).

В то же время инструмент для определения оптимальных маршрутов, увязывающий возможности передачи данных через различные контуры, отсутствует и оптимальные маршруты выбираются в ручном режиме руководителем

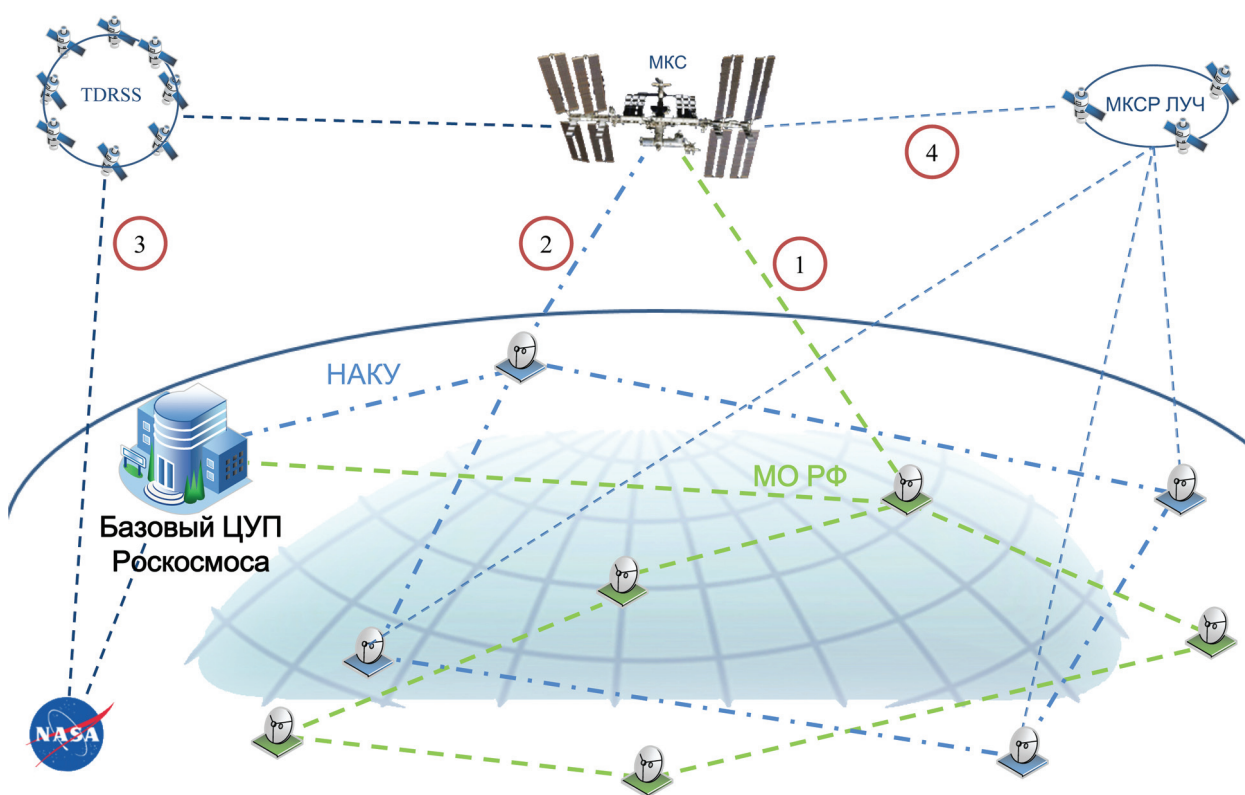


Рис. 1. Возможные маршруты передачи данных на примере управления РС МКС  
 Fig. 1. Possible transmission routes on the ISS RS Control Example

полета, с привлечением большого количества специалистов.

Применение систем ретрансляции, установка на КА абонентской аппаратуры, унификация командной и телеметрических радиолиний, объединение объектов наземной и космической инфраструктуры в единую систему передачи информации будет способствовать увеличению количества возможных маршрутов доставки данных при оперативном управлении КА. Планируемый рост орбитальной группировки КА, развитие наземной и космической инфраструктуры приведет к тому, что актуальность решения задачи выбора оптимальных маршрутов передачи данных при оперативном управлении КА будет только расти [2].

Разработка инструмента для определения оптимальных маршрутов передачи данных с использованием средств наземного и космического базирования повысит эффективность оперативного управления КА. Выбор маршрута основан на сводном критерии, определяющем оптимальность исходя из текущей ситуации.

Создание такого инструмента включает комплекс следующих мероприятий:

- анализ известных научно-методических подходов, позволяющих решать задачи выбора

маршрутов доставки данных исходя из требуемых критериев оптимальности с учетом особенностей управления КА (зон радиовидимости, оперативности, характеристик каналов связи, уровней защиты информации и др.);

- моделирование системы передачи данных, включающей средства наземного и космического базирования;

- определение набора базовых требований к узлам системы передачи данных при оперативном управлении, учитывающих критерии оптимальности;

- разработку структуры базового элемента;

- определение параметров взаимодействия в модели, набора критериев оптимальности;

- обеспечение автоматизации процесса моделирования, отработку множества вариантов маршрутизации и сравнение с вариантами, выбранными руководителем полета.

Моделью системы передачи данных является граф (рис. 2) с постоянным числом вершин и изменяемыми количеством и весами ребер. Вершинами графа являются объекты наземной и космической инфраструктуры: Центр управления полетами, земные станции, космические аппараты и спутники-ретрансляторы. Ребрами графа являются каналы связи между взаимодействующими объектами. Маршрутом

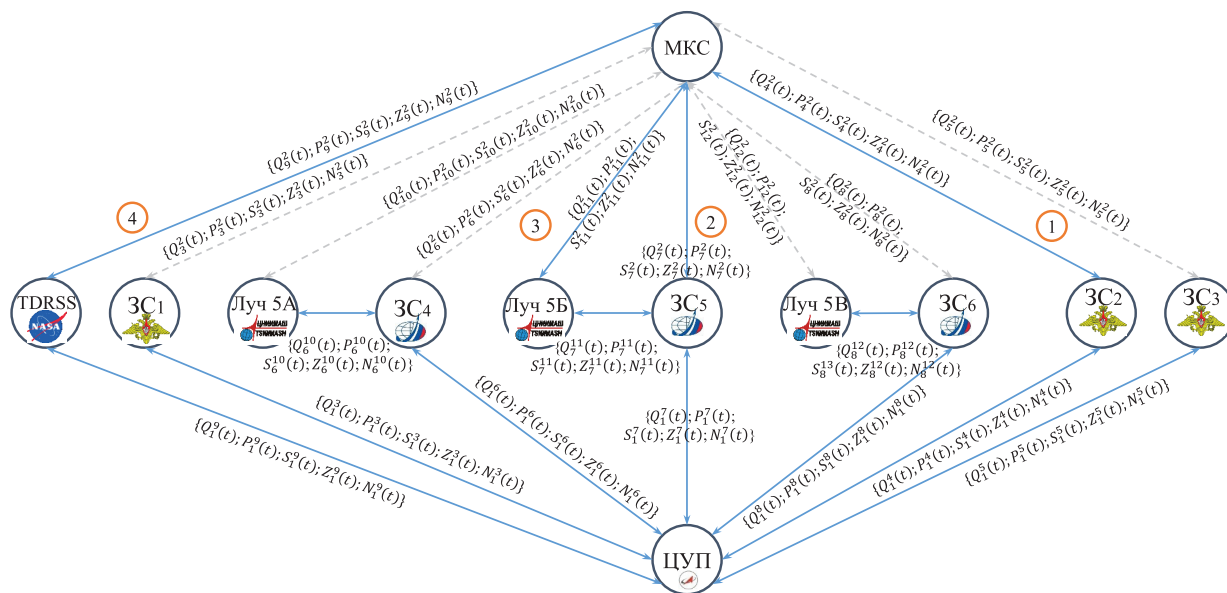


Рис. 2. Пример графовой модели системы передачи данных при оперативном управлении на примере МКС  
 Fig. 2. An example of the graph model of data transmission system for the operational control of the ISS example

является кортеж  $M[E_j^i, E_j^k, E_j^m, \dots, E_j^s]$  смежных вершин от вершины — источника данных ( $V_i$ ) к вершине — стоку данных ( $V_s$ ) [3–6].

При изменении состава наземного комплекса управления, систем ретрансляции, космических аппаратов и т. д. система передачи данных и ее топология также изменяются.

Для поддержания модели в актуальном состоянии предусмотрена возможность ввода новых вершин и связей через описание базового элемента.

В общем случае вес каждого ребра определяется выражением вида

$$C_i^j = f(Q_i^j, P_i^j, Z_i^j, S_i^j, N_i^j, k)$$

при ограничениях

$$\{Q_{ITP}^s \leq Q_i^s, P_{ITP}^s \leq P_i^s, N_{ITP}^s \leq N_i^s, Z_{ITP}^s \leq Z_i^s, S_{ITP}^s \leq S_i^s\},$$

где  $Q_i^j$  — скорости передачи данных на участке  $i-j$ ;

$P_i^j$  — пропускная способность канала связи на участке  $i-j$ ;

$Z_i^j$  — защищенность канала связи на участке  $i-j$ ;

$S_i^j$  — стоимость затрат на предоставление канала связи на участке  $i-j$ ;

$N_i^j$  — энергетические затраты на предоставление канала связи на участке  $i-j$ ;

$k$  — нормирующий коэффициент важности критериев (варьируется руководителем полетов в соответствии с текущей полетной ситуацией).

Соответственно, вес маршрута  $C_i^s$  от истока в вершине  $i$  до стока в вершине  $s$ , составленного

из дуг  $[E_j^i, E_j^k, E_j^m, \dots, E_j^s]$ , взятых из множества  $A$  дуг графа [3], задается формулой

$$C_i^s(A) = \sum_{(V_i, V_j) \in A} C_i^j.$$

Одним из способов формального задания системы выбора оптимальных маршрутов передачи данных при оперативном управлении является его представление через матрицу смежности (табл. 1) [7–11]  $A(t)$  (где столбец матрицы — это исток ( $i$ ) данных; строка — сток ( $j$ ) данных) и таблицы маршрутов (табл. 2) [5].

Процесс выбора оптимальных маршрутов передачи данных при оперативном управлении космическими аппаратами по данному подходу сводится к 4 этапам.

Этап 1. Построение графа с меняющейся топологией  $G(\Delta t)$ .

Закон изменения состава и весов ребер определяется в зависимости от характеристик движения КА и задействования космической инфраструктуры. Изменения топологии и характеристик маршрутов приема-передачи данных проходят динамично, тем не менее в большинстве своем являются предсказуемыми.

Топология и зоны радиовидимости наземной и космической инфраструктуры детерминированы, так как КА движутся практически с неизменными баллистическими параметрами. Поэтому местоположение КА, зоны, время радиовидимости, характеристики задействования инфраструктуры могут быть рассчитаны заранее.

Изменение топологии системы во времени отображается в виде последовательности

Т а б л и ц а 1

**Матрица нагрузки между элементами системы передачи данных при оперативном управлении КА на примере доставки данных на РС МКС**  
**The matrix of the load between the elements of the data transmission system in the operational control of the spacecraft on the example of data delivery to the ISS**

	ЦУП	МКС	ЗС <sub>1</sub>	ЗС <sub>2</sub>	...	ЗС <sub>6</sub>	TDRSS	Луч 5А	Луч 5Б	Луч 5В
1. ЦУП	0	0	$C_1^3(t)$	$C_1^4(t)$	...	$C_1^8(t)$	$C_1^9(t)$	$C_1^{10}(t)$	$C_1^{11}(t)$	$C_1^{12}(t)$
2. МКС	0	0	$C_2^3(t)$	$C_2^4(t)$	...	$C_2^8(t)$	$C_2^9(t)$	$C_2^{10}(t)$	$C_2^{11}(t)$	$C_2^{12}(t)$
3. ЗС <sub>1</sub>	$C_3^1(t)$	$C_3^2(t)$	0	$C_3^4(t)$	...	$C_3^8(t)$	0	0	0	0
4. ЗС <sub>2</sub>	$C_4^1(t)$	$C_4^2(t)$	$C_4^3(t)$	0	...	$C_4^8(t)$	0	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
8. ЗС <sub>6</sub>	$C_8^1(t)$	$C_8^2(t)$	$C_8^3(t)$	$C_8^4(t)$	...	0	0	$C_8^{10}(t)$	$C_8^{11}(t)$	$C_8^{12}(t)$
9. TDRSS	$C_9^1(t)$	$C_9^2(t)$	0	0	...	0	0	0	0	0
10. Луч 5А	$C_{10}^1(t)$	$C_{10}^2(t)$	0	0	...	$C_{10}^8(t)$	0	0	0	0
11. Луч 5Б	$C_{11}^1(t)$	$C_{11}^2(t)$	0	0	...	$C_{11}^8(t)$	0	0	0	0
12. Луч 5В	$C_{12}^1(t)$	$C_{12}^2(t)$	0	0	...	$C_{12}^8(t)$	0	0	0	0

Т а б л и ц а 2

**Возможные маршруты передачи данных при оперативном управлении космическими аппаратами**  
**An example of a table of possible data transmission routes at the operational control of space vehicles**

Конфигурация графа $G$ в момент времени $\Delta t$	Исток данных	Сток данных	Номер маршрута	Важность критериев					Кортеж маршрута	Вес маршрута	
				$Q$	$P$	$Z$	$S$	$N$			
$\Delta t_1$ 00:00:00 — 00:01:59 01.01.2016	$V_i$	$V_s$	1	$U_Q$	$U_P$	$U_Z$	$U_S$	$U_N$	$E_i^j, E_j^k, E_k^m, \dots, E^s$	$\sum_{i=1}^s C_i^s(\Delta t_1)^{-1}$	
			2						$E_i^j, E_j^k, E_k^m, \dots, E^s$	$\sum_{i=1}^s C_i^s(\Delta t_1)^{-1}$	
			...						...	...	
	$V_i$	$V_s$	1						...	...	...
			2						...	...	...
			...						...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...			
$\Delta t_2$ 00:02:00 — 00:03:45 01.01.2016	$V_i$	$V_s$	1	$U_Q$	$U_P$	$U_Z$	$U_S$	$U_N$	$E_i^j, E_j^k, E_k^m, \dots, E^s$	$\sum_{i=1}^s C_i^s(\Delta t_2)^{-1}$	
			2						$E_i^j, E_j^k, E_k^m, \dots, E^s$	$\sum_{i=1}^s C_i^s(\Delta t_2)^{-1}$	
			...						...	...	
	$V_i$	$V_s$	1						...	...	...
			2						...	...	...
			...						...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...			

$\{G(\Delta t)\} = G(\Delta t_0) \rightarrow G(\Delta t_1) \rightarrow \dots \rightarrow G(\Delta t_n)$  конфигураций графа продолжительностью  $\Delta t$ . Конфигурации представляются в виде статического графа с постоянным числом вершин, изменяемым количеством ребер и изменяемыми весами ребер.

Этап 2. Определение элементов матрицы смежности.

При изменении состава наземного комплекса управления, систем ретрансляции и т. д. систе-

ма передачи данных и ее топология также изменяются. Для поддержания модели в актуальном состоянии предусмотрена возможность ввода новых вершин и связей через описание базового элемента.

Этап 3. Расчет кратчайших путей между всеми парами вершин графа  $G(\Delta t_i)$  по сводному критерию.

Для каждой конфигурации  $G(\Delta t_i)$  между всеми вершинами — источниками космических



данных и всеми вершинами стоками данных рассчитывается число  $K$  кратчайших путей — основные и резервные маршруты

$$\sum_i^s C_i^s(\Delta t_i).$$

Полученные массивы данных вносятся в таблицу маршрутов (см. табл. 2.).

Этап 4. На основании сводного критерия оптимальности формальная постановка задачи принимает вид

$$C_i^s(t) = \sum_{t=t_0}^{t \rightarrow \infty} \sum_{(V_i, V_j) \in A} C_i^j(t) \rightarrow \min$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} Q_i^s(t)_{TP} \leq Q_i^s(t) \rightarrow \max, \\ P_i^s(t)_{TP} \leq P_i^s(t) \rightarrow \max, \\ N_i^s(t)_{TP} \leq N_i^s(t) \rightarrow \min, \\ Z_i^s(t)_{TP} \leq Z_i^s(t) \rightarrow \min, \\ S_i^s(t)_{TP} \leq S_i^s(t) \rightarrow \max. \end{cases}$$

Этап 5. Выдача рекомендаций.

Варьируя показателями важности критериев, выбирают основные и резервные маршруты передачи данных по наилучшему совпадению для всей последовательности множеств конфигураций графа (см. табл. 2.).

Таким образом, в настоящее время и в будущем при увеличении количества маршрутов передачи данных определение оптимальных маршрутов данных с помощью автоматизированного научно обоснованного инструмента будет актуальным и эффективным.

Выбор заключается в определении структуры системы передачи космических данных как сложной технической системы и закона

ее функционирования, моделировании изменений конфигурации системы в течение данного периода времени, в расчете кратчайших путей для каждой конфигурации системы и минимизации сводного критерия доставки космических данных для повышения эффективности оперативного управления КА и задействования космической инфраструктуры, включающей средства наземного и орбитального базирования.

## Список литературы

- [1] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами: учеб. пособие: в 2 ч. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
- [2] Матюшин М.М., Зеленев Д.А., Соколов Н.Л., Бакланов Е.В. Базовый ЦУП Роскосмоса как высокотехнологичный инструмент управления сложными системами космического назначения // Тр. XVII Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: Институт проблем управления сложными системами РАН, 2015.
- [3] Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
- [4] Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд. СПб.: Питер, 2012. 680 с.
- [5] Алиев Т.И. Сети ЭВМ и телекоммуникации, 2011.
- [6] Овчинников В.А. Графы в задачах анализа и синтеза структур сложных систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 423 с.
- [7] Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 245 с.
- [8] Ларичев О.И. Наука и искусство принятия решений. М.: Наука, 200 с.
- [9] Радиосистемы передачи информации: учеб. пособие для вузов / В.А. Васин, В.В. Калмыков, Ю.Н. Себекин, А.И. Сенин, И.Б. Федоров. М.: Горячая линия Телеком, 2005. 472 с.
- [10] Сомов А.М. Распространение радиоволн и антенны спутниковых систем связи: учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия Телеком, 2015. 456 с.
- [11] Sanjay K. Chaturvedi. Network Reliability: Measures and Evaluation. Scrivener Publishing LLC. Published 2016 by John Wiley & Sons, Inc.

## Сведения об авторах

**Матюшин Максим Михайлович** — д-р техн. наук, зам. генерального директора по управлению полетами — начальник ЦУП, ФГУП ЦНИИмаш, область научных интересов: технологии системного анализа и моделирования управления космическими полетами, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

**Зеленев Денис Александрович** — канд. техн. наук, зам. начальника ЦУП по науке, ФГУП ЦНИИмаш, область научных интересов: управление полетами космических аппаратов, инновационные технологии в космической деятельности, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

**Бакланов Евгений Владимирович** — инженер 1 категории, ФГУП ЦНИИмаш, область научных интересов: оптимизация процесса передачи данных при управлении полетом космических аппаратов, инновационные технологии в космической деятельности, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

Статья поступила в редакцию 01.11.2016 г.

## THE CHOICE OF AN OPTIMAL DATA TRANSFER PATH AT THE OPERATIONAL SPACECRAFT CONTROL

M.M. Matyushin, D.A. Zelenov, Ye.V. Baklanov

Central Research Institute for Engineering Technology, 4, st. Pionerskaya, Korolev, Moscow region, 141070, Russia

baklanov@mcc.rsa.ru

Currently, with the operational control of a spacecraft (SC), there is a choice of various data transfer paths including ground-based and orbiting means of information delivery. At the same time, a tool for determining optimal routes which could link the transfer of data through the various contours is not available, and optimal routes are selected manually by a shift flight director, with the involvement of a large number of specialists. The activation of the data relay system, the installation of the subscriber equipment on board a SC, the unification of command and telemetry links, incorporating the objects of ground and space infrastructure into a single data transfer system will increase the number of possible paths of delivering data that are urgent for the operational control of a SC. The plan to increase the orbital group of a SC, the development of ground and space infrastructures results in the fact that the urgency of solving the problem of choosing the optimal data transfer path for the operational control of a spacecraft will only grow. The development of a tool determining the optimal data transfer paths using ground-based and orbiting means will enhance the effectiveness of operational control by determining optimal routes for data transfer based on the combined criteria, finding an optimal path depending on the situation. This article deals with the solution of actual problems and offers some approaches to the development of a tool determining the optimal data transfer paths by using ground-based and orbiting means. The article includes a set of optimality criteria which are presented by the graphical-analytical models to select the optimal paths at the operational control of a spacecraft.

**Keywords:** operational control, a spacecraft, data transfer, optimality criteria, paths, routes

**Suggested citation:** Matyushin M.M., Zelenov D.A., Baklanov Ye.V. *Vybor optimal'nykh marshrutov peredachi dannykh pri operativnom upravlenii kosmicheskimi apparatami* [The choice of an optimal data transfer path at the operational spacecraft control]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 125–130. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-125-130

### References

- [1] Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Mission control]. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2009, pp. 902. (in Russian)
- [2] Matyushin M.M., Zelenov D.A., Sokolov N.L., Baklanov E.V. *Bazovyy TsUP Roskosmosa kak vysokotekhnologichnyy instrument upravleniya slozhnyimi sistemami kosmicheskogo naznacheniya* [Basic MCC of the Russian space Agency as a high-tech tool in the management of complex systems for space application] *Trudy XVII mezhdunarodnoy konferentsii «Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh* [Proceedings of the XVII international conference «Problems of control and modeling in complex systems»]. Samara: Institut problem upravleniya slozhnyimi sistemami Rossiyskoy akademii nauk (RAN) Publ., 2015, 400 p. (in Russian)
- [3] Kristofides N. *Teoriya grafov. Algoritmicheskiy podkhod* [Graph theory. Algorithmic approach]. Moscow: Mir Publ., 1978, pp. 175-214. (in Russian)
- [4] Tanenbaum E., Uezeroll D. *Komp'yuternye seti* [Computer networks]. Saint Petersburg: Piter Press, pp. 43-186.
- [5] Aliev T.I. *Seti EVM i telekommunikatsii* [Computer networks and telecommunications]. Saint Petersburg: ITMO, 2011, pp. 54-61. (in Russian)
- [6] Ovchinnikov V.A. *Grafy v zadachakh analiza i sinteza struktur slozhnykh sistem* [Graphs in problems of analysis and synthesis of structures of difficult systems]. Moscow: Bauman MSTU, 2014, p. 423. (in Russian)
- [7] Mikrin E.A. *Bortovye kompleksy upravleniya kosmicheskikh apparatov* [Avionics spacecraft control]. Moscow: Bauman MSTU, 2014, p. 245. (in Russian)
- [8] Larichev O.I. *Nauka i iskusstvo prinyatiya resheniy* [The art and science of decision-making]. Moscow: Nauka Publ., 1979, pp. 28-88. (in Russian)
- [9] Vasin V.A., Kalmykov V.V., Sebekin Yu.N., Senin A.I., Fedorov I.B. *Radiosistemy peredachi informatsii* [Radio systems of information transmission]. Moscow: Goryachaya liniya Telekom Publ., 2005, pp. 291-377. (in Russian)
- [10] Somov A.M. *Rasprostranenie radiovoln i anteny sputnikovyykh sistem svyazi* [Radiowave propagation and antennas for satellite communication systems]. Moscow: Goryachaya liniya Telekom Publ., 2015, pp. 5-50. (in Russian)
- [11] *Sanjay K. Chaturvedi*. Network Reliability: Measures and Evaluation. Scrivener Publishing LLC. Published 2016 by John Wiley & Sons, Inc., 248 p.

### Author's information

**Matyushin Maksim Mikhaylovich** — Dr. Sci. (Tech.), Deputy Director General for Mission Control — Head of PMU, TsNIImash, scientific interests — System Analysis and Mission Control Simulation Technology, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

**Zelenov Denis Aleksandrovich** — Cand. Sci. (Tech.), Deputy Head of the PMU for Science, TsNIImash, scientific interests — Office space missions, innovative technologies in space activities, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

**Baklanov Evgeniy Vladimirovich** — Engineer, TsNIImash, scientific interests — Optimizing data transfer process in the management of the spacecraft mission, innovative technologies in space activities, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

Received 01.11.2016