

УДК 629.78.086

ОСОБЕННОСТИ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ СЕАНСОВ СВЯЗИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ РАЗНОРОДНЫХ ДАННЫХ ГРУППИРОВКИ КА И ЦУП ЧЕРЕЗ СЕТЬ НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ*

*Д.А. Калашиников¹, В.А. Соловьев¹, П.О. Скобелев⁵, Е.В. Симонова²,
И.В. Майоров³, С.П. Грачев⁴, Д.И. Тихонов⁵, В.Н. Ворожейкин⁵*

¹ ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева»
Россия, 141070, Московская область, Мытищинский район, г. Королев, ул. Ленина, 4а

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

³ Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

⁴ Научно-производственная компания «Разумные решения»
Россия, 443013, г. Самара, Московское шоссе, 17 (ТОЦ «Вертикаль»), офис 1201

⁵ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: esib@samgtu.ru

Рассматриваются особенности постановки задачи оптимизации показателей надежности и экономичности сеансов связи для передачи разнородных данных для группы космических аппаратов (КА) и центра управления полетами (ЦУП) через сеть наземных станций. Показывается, что для решения поставленной задачи требуется нахождение динамического баланса интересов задач и ресурсов, что предполагает взаимно согласованный учет целого ряда индивидуальных особенностей проводимых операций, оборудования станций и других важных параметров. Обосновывается вывод, что для решения поставленной задачи становится целесообразным применение мультиагентных технологий, позволяющих создавать гибкие самоорганизующиеся расписания сеансов связи группировки КА с ЦУП через сеть наземных станций.

Ключевые слова: командно-измерительный комплекс, оптимизация, надежность, моделирование, экономичность, сеансы связи, КА, ЦУП, мультиагентные технологии.

1. Общее описание задачи

Среди задач управления космическими аппаратами особое место занимает планирование сеансов связи КА и ЦУП через сеть наземных станций.

Сложность задачи в значительной мере увеличивается, если вместо одного КА рассматривается группировка КА, каждый из которых решает свои целевые задачи, имеет на борту свои технические средства приема-передачи информации с наземными отдельными командно-измерительными комплексами (ОКИК).

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Дмитрий Алексеевич Калашиников, начальник отдела анализа работы и обеспечения эксплуатации бортовых радиотехнических систем и технических средств наземного комплекса управления космических аппаратов и средств выведения ОАО «РКК «Энергия».

Кроме этого необходимо учитывать требования, накладываемые на сеансы связи отдельных КА из группировки, связанные с необходимым уровнем резервирования ресурсов при выполнении ими сложных и ответственных операций. Необходимо, чтобы ряд таких операций, как коррекция орбиты КА, затопление КА, информационная поддержка научных программ и др., осуществлялись на витках орбиты в зоне взаимной видимости более чем одной ОКИК.

Задача построения сеансов связи КА, группировки КА и ЦУП через сеть ОКИК рассматривались в работах [1–8]. Однако вопросы динамической оптимизации показателей надежности и экономичности сеансов связи группировки КА с ЦУП через ОКИК не нашли в них свое отражение.

В настоящей работе впервые сформулирована постановка задачи динамического планирования сеансов связи группировки КА и ЦУП через сеть наземных станций для оптимизации их надежности и экономичности. Данная постановка задачи позволяет применить для ее решения мультиагентные технологии [9–12].

Суть сформулированной ниже задачи состоит в следующем:

- обеспечить максимальную зону обмена необходимой информацией с группировками КА при выполнении заданных операций;
- обеспечить максимальную непрерывную зону обмена необходимой информацией с КА на каждом витке в зависимости от специфики выполняемых операций с необходимым уровнем резервирования ресурсов.

Примеры сложных и ответственных операций, требующих высокой надежности:

- коррекция орбиты КА;
- затопление космического аппарата;
- информационная поддержка научных программ и др.

Упрощенная схема, поясняющая суть решаемой задачи, представлена на рис. 1.

Здесь виток 1 попадает в зону действия первых двух станций (С1 и С2) и имеет более высокую надежность, виток 2 – в зону только одной С3 (низкая надежность), а виток 3 – снова в зону действия двух станций, но уже теперь С2 и С3 (более высокая надежность).

Разумно предположить, что наиболее ответственные операции следует выполнять на 1-м и 3-м витке. Но при этом каждая станция может иметь свою аппаратуру, различающуюся качеством и скоростью приема-передачи, а также разную стоимость, которую следует принимать во внимание. Более важные операции могут быть забронированы на самых дорогих ресурсах, если нет других вариантов; менее важные вполне могут подождать до более дешевых станций.

Владимир Алексеевич Соловьев (д.т.н., проф.), член-корреспондент Российской академии наук, первый заместитель генерального конструктора.

Петр Олегович Скобелев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность».

Елена Витальевна Симонова (к.т.н., доц.), доцент кафедры» Информационные системы и технологии».

Игорь Владимирович Майоров, ведущий специалист научно-исследовательского отдела научно-исследовательской группы лаборатории интеллектуальных технологий.

Сергей Павлович Грачев, заместитель генерального директора.

Денис Игоревич Тихонов, аспирант.

Владимир Николаевич Ворожейкин (к.т.н., доц.), заместитель заведующего кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность».

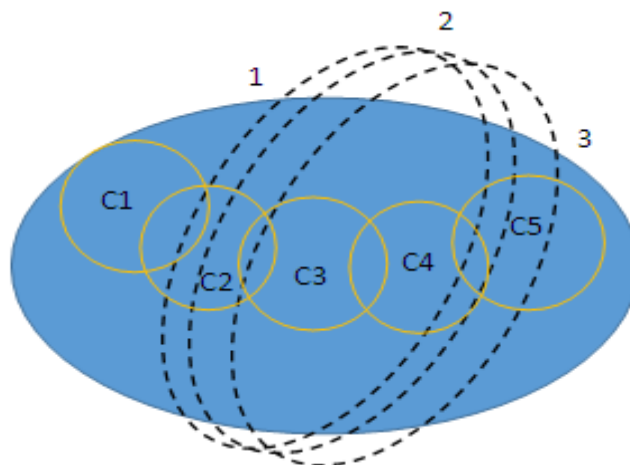


Рис. 1. Упрощенная схема, поясняющая решаемую задачу

2. Формализованная постановка задачи

2.1. Пусть задан набор наземных ОКИК

$$\{P_i\}_{i=1}^k,$$

где P_i – отдельный командно-измерительный комплекс;

k – число ОКИК в сети, на данный момент $k = 8$,

с набором технических средств для приема-передачи информации на каждом ОКИК

$$P_i = \{r_i, \{E_{i,j}\}_{j=1}^{r_i}\};$$

где r_i – число технических средств на отдельном ОКИК (P_i);

$E_{i,j}$ – техническое средство для приема-передачи информации.

Техническое средство приема-передачи данных однозначно определяется типом передаваемой информации и описывается множеством

$$E_{i,j} = \{I_{i,j}, B_{i,j}, C_{i,j}\}_{j=1}^{r_i},$$

где i – индекс отдельного ОКИК (P_i);

r_i – число технических средств на отдельном ОКИК;

I – тип передаваемой информации (командно-программная информация – команды, цифровые массивы на борт группы космических аппаратов (ГКА), квитанции на них с борта; телеметрическая информация с борта; информация радиоконтроля орбиты; телефонная информация – голосовой обмен с экипажами КА; телевизионная информация с борта);

B – скорость передачи информации, бод;

C – стоимость резервирования и возможного дальнейшего использования технического средства, руб/час.

2.2. Задана группа космических аппаратов

$$\{A_k\}_{k=1}^m,$$

где m – число космических аппаратов в составе ГКА, каждый из которых определяется как набор технических средств для приема-передачи информации;

$$A_k = \{E_{k,j}\}_{j=1}^{a_i},$$

где a_i – число технических средств на отдельном космическом аппарате в составе ГКА (A_k), которые определяются так же, как и технические средства ОКИК в п. 2.1.

2.3. Циклограммы видимости ГКА каждым ОКИК (см. рис. 2) заданы как множество периодов времени с постоянным числом ОКИК в зоне видимости ГКА (используется московское декретное время (МДВ))

$$\{T_x\}_{x=1}^p,$$

где p – число периодов времени, каждый из которых определяется как

$$T_x = \{tvs_x, tvf_x, tss_x, tsf_x, ke_x\};$$

tvs – время начала периода видимости, МДВ;

tvf – время окончания периода видимости, МДВ;

tss – время начала периода устойчивого приема (угол над горизонтом $\geq 7^\circ$), МДВ;

tsf – время окончания периода устойчивого приема (угол над горизонтом $\geq 7^\circ$), МДВ;

ke – количество ОКИК в зоне видимости ГКА, $ke \in \{0, \dots, k\}$.

2.4. Задания на передачу информации определяются как множество (см. рис. 3)

$$\{L_y\}_{y=1}^q,$$

где q – число заданий на передачу информации в планируемый период времени;

$$L_y = \{v_y, tr_y, tc_y, pr_y, R_{req_y}, R_y, C_y\};$$

v – объем информации к передаче, байт;

tr – время готовности информации к передаче, МДВ;

tc – самое позднее возможное время выполнения задания, МДВ;

pr – приоритет задания, $pr \in \{\text{низкий, средний, высокий}\}$;

R_{req} – требуемый уровень резервирования ресурсов, $R_{req} \in \{0, \dots, k\}$;

R – планируемый уровень резервирования ресурсов, $R \in \{0, \dots, k\}$;

C – планируемая стоимость выполнения задания, руб.

Здесь параметры задания R и C являются выходной информацией, вычисляются для определенного расписания и пересчитываются при изменении требований к расписанию.

В данной постановке на первом этапе принимается неделимость задания на части по времени выполнения.

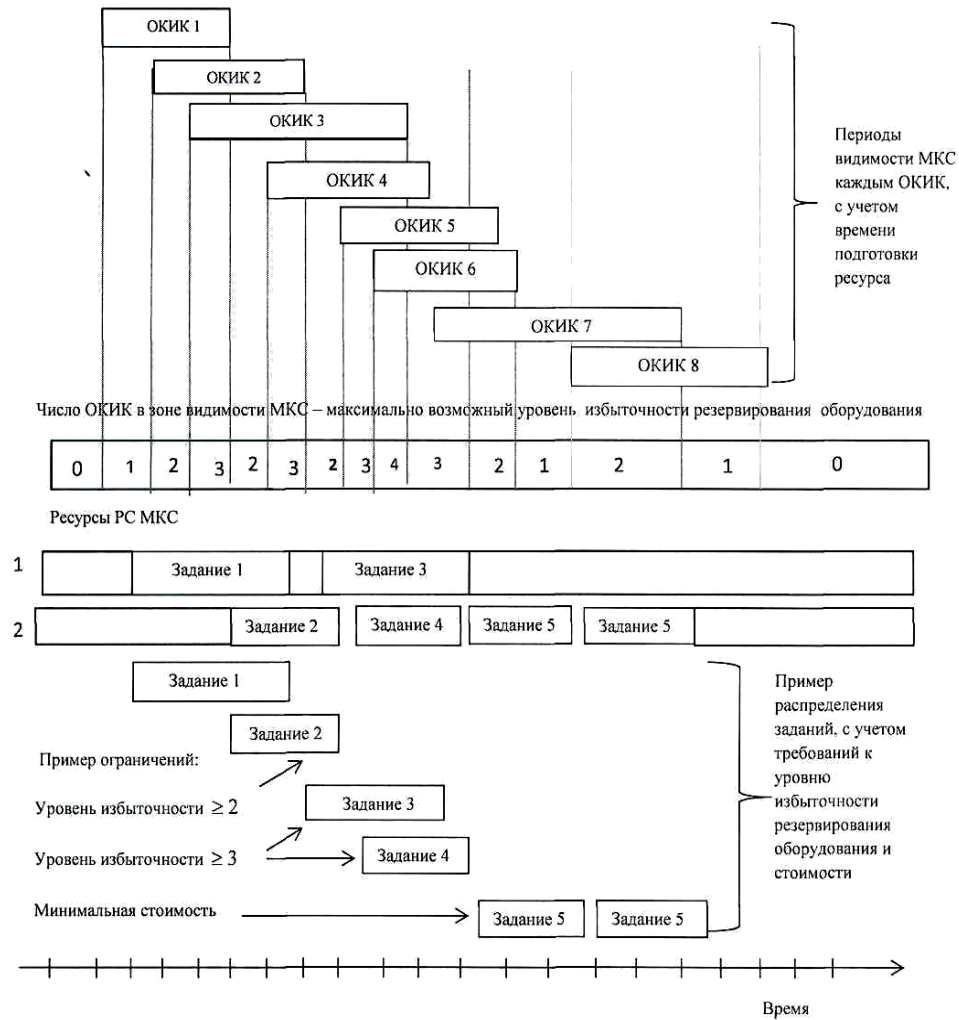


Рис. 3. Пример распределения заданий

3. Расчетные данные

3.1. План взаимодействия со станциями и обмена информацией, который состоит из запланированных сеансов связи – периодов времени, на которые резервируются определенные технические средства определенного ОКИК для выполнения определенного задания ГКА для обмена информацией:

$$S_z = \{sq_z, \{L_y\}, ts_z, tf_z, \{A_k\}, \{E_{k,j}\}, \{P_i\}, \{E_{i,j}\}, \{T_x\}, C_z\}_{z=1}^m,$$

где m – число сеансов связи; sq_z – число заданий на передачу информации, запланированных на сеанс,

$$sq_z \in \{0, \dots, q\};$$

$\{L_y\}$ – набор заданий на передачу информации, запланированных на сеанс;

ts – время начала сеанса, МДВ;

tf – время окончания сеанса, МДВ;

$\{A_k\}$ – набор КА, задействованных в сеансе;
 $\{E_{k,j}\}$ – набор зарезервированных технических средств на задействованных КА;
 $\{P_i\}$ – набор зарезервированных ОКИК;
 $\{E_{i,j}\}$ – набор зарезервированных технических средств на зарезервированных ОКИК;
 $\{T_x\}$ – множество периодов времени с постоянным числом ОКИК в зоне видимости ГКА, на которые запланирован сеанс;
 C – стоимость резервирования ресурсов для сеанса связи, руб.

3.2. Стоимость выполнения и уровень резервирования ресурсов по каждому заданию:

$$\{C_y\}_{y=1}^q \text{ и } \{R_y\}_{y=1}^q,$$

где q – число заданий на передачу информации в планируемый период времени.

3.3. Суммарная стоимость сеансов связи в расписании

$$C = \sum_{z=1}^m C_z,$$

где m – число сеансов связи;

C_z – стоимость резервирования ресурсов для сеанса связи, руб.

4. Примеры критериев решения задачи

Построение расписания обмена информацией с ГКА на каждом витке, выбирая периоды времени и варьируя время начала выполнения заданий, требуется осуществлять:

1. С максимальной непрерывной по времени зоной обмена информацией

$$T = \sum_{u=1}^{p-1} (tsf_u - tss_u) \rightarrow \max, \\ tsf_u \geq tss_{u+1}$$

где p – число периодов времени, каждый из которых определяется следующим образом:

tss – время начала периода устойчивого приема (угол над горизонтом $\geq 7^\circ$), МДВ;

tsf – время окончания периода устойчивого приема (угол над горизонтом $\geq 7^\circ$), МДВ.

2. С максимальным планируемым выполнением заданий обмена информацией, с учетом приоритетности заданий:

– по количеству запланированных заданий из общего числа заданий, представленных к планированию:

$$L_q = \sum_{z=1}^m sq_z \rightarrow \max,$$

где m – число сеансов связи;

sq_z – число заданий на передачу информации, запланированных на сеанс,

$sq_z \in \{0, \dots, q\}$;

– по объему запланированной к передаче информации:

$$L_v = \sum_{z=1}^m \sum_{y=1}^{sq_z} v_y \rightarrow \max,$$

где m – число сеансов связи;

sq_z – число заданий на передачу информации, запланированных на сеанс,

$sq_z \in \{0, \dots, q\}$;

v – объем информации к передаче в отдельном задании, байт.

3. С требуемым или максимальным уровнем резервирования ресурсов.

Требуемый уровень резервирования ресурсов

$$R = \frac{\sum_{z=1}^n ke_z}{n} \geq R_{req},$$

где n – количество временных отрезков с постоянным числом ОКИК, задействованных в расписании;

R_{req} – требуемый уровень надежности.

4. С минимальной или не превышающей бюджетных ограничений суммарной стоимостью сеансов связи в расписании:

– минимальная стоимость

$$C = \sum_{z=1}^m C_z \rightarrow \min,$$

где m – количество сеансов связи;

C_z – стоимость резервирования ресурсов для сеанса связи;

– бюджетные ограничения

$$C = \sum_{z=1}^m C_z \leq C_{req},$$

где m – количество сеансов связи;

C_z – стоимость резервирования ресурсов для сеанса связи, руб.;

C_{req} – бюджетное ограничение, руб.

Метод решения задачи должен предусматривать возможность расширения числа критериев и изменения их приоритетности при изменении ситуации.

Задание комбинаций критериев

В общем случае суть задачи состоит в том, чтобы в зависимости от ситуации, диктуемой текущей доступностью ресурсов и наземных станций, а также с учетом сложности, длительности и важности задачи (приоритетов), наличия денежных средств и других факторов построить наиболее сбалансированное по указанным критериям расписание сеансов связи.

Общую оценку текущего расписания (целевую функцию) предлагается производить сверткой (взвешенной суммой критериев), учитывая множество частных критериев:

$$X = \{x_i\}_{i=1}^5,$$

где $x_1 = T$ – непрерывность зоны обмена информацией;

$x_2 = L_q$ – полнота обмена информацией по количеству запланированных заданий;

$x_3 = L_v$ – полнота обмена информацией по объему переданной информации;

$x_4 = R$ – уровень резервирования ресурсов;

$x_5 = C$ – суммарная стоимость сеансов связи в расписании,

а также предполагаемые идеальные значения этих критериев x_i^{id} , и определяя свертку оценочных функций $f_i(x_i - x_i^{id})$ с заданными весовыми коэффициентами $\alpha_i \geq 0$.

Надлежащим выбором знаков и вида функций можно свести рассматриваемую задачу к максимизации целевой функции:

$$H = \sum_i \alpha_i \cdot f_i(x_i - x_i^{id}),$$

где весовые коэффициенты нормируются: $\sum_{i=1}^5 \alpha_i = 1$.

Заключение

В данной работе впервые сформулирована задача оптимизации показателей надежности и экономичности сеансов связи группировки КА и ЦУП через сеть наземных станций как максимизации суммы удовлетворенностей всех участников этого процесса (минимизации разницы между текущими и идеальными значениями), что позволяет добиться ситуативно формируемого баланса интересов задач (операций), космических аппаратов и наземных станций.

Данный подход позволяет начать разработку набора методов решения поставленной задачи на основе применения мультиагентных технологий для построения гибкого самоорганизующегося расписания работы КА и наземных станций по приему/передаче данных, пригодного для ситуационного разрешения конфликтов и поиска компромиссов между участниками, а также для интерактивной доводки или дальнейшей адаптивной перестройки плана сеансов связи в ответ на любые возникающие непредвиденные события с учетом заданных индивидуальных критериев, ограничений и предпочтений.

Реализация предлагаемого подхода будет способствовать повышению надежности функционирования любых сложных технических комплексов в условиях самых различных применений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Соловьев В.А.* Управление космическими полетами: учеб. пособие в 2 ч. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 476 с.
2. *Бетанов В.В., Демидов А.С., Ступак Г.Г., Янчик А.Г.* Теоретические основы построения автоматизированной системы организационно-технического управления космическими средствами. – М: Военная академия РВСН им. Петра Великого, 2002. – 154 с.
3. *Макаров М.И., Медведев А.А.* Наземные комплексы управления космическими аппаратами. – М.: Наука и технологии в промышленности, 2012. – № 1. – 20-29 с.
4. *Галантерник Ю.М., Горши А.В., Калинин А.Ф.* Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами: Монография. – М.: МГУП, 2003.
5. *Качеев Н.А., Чаплинский В.С., Панферов В.В.* Наземно-космические информационные сети управления низкоорбитальными космическими аппаратами и обмена сообщениями между различными абонентами: принципы создания и применения, методы оценки эффективности // Новые наукоемкие технологии в технике: Энциклопедия / Под общ. ред. К.С. Касаева. – М.: ЭНЦИТЕХ, 2006.
6. *Молотов Е.П.* Наземные радиотехнические системы управления аппаратами. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 256 с.
7. *Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Сологуб А.В., Макаров В.П.* Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии. – М.: Машиностроение, 2010. – 384 с.
8. *Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Иванов Н.М., Соловьев В.А.* Математическое моделирование реализации технологического цикла баллистико-навигационного обеспечения при управлении космическим полетом // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики. – 2000. – № 1. – С. 37-44.
9. *Скобелев П.О.* Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. – 2002. – № 6. – С. 45-61.
10. *Андреев В.А., Виттих В.А., Батищев С.В., Скобелев П.О. и др.* Методы и средства создания открытых мультиагентных систем для поддержки процессов принятия решений // Известия академии наук. Теория и системы управления. – 2003. – № 1. – С. 126-137.
11. *Андреев В.В., Глащенко А.В., Иващенко А.В., Иноземцев С.В., Скобелев П.О., Швейкин П.К.* Мультиагентные системы адаптивного планирования мобильных ресурсов в реальном времени // Сб. трудов 4-й Междунар. конф. по проблемам управления МКПУ – IV (26-30 января 2009). – М.: Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2009. – С. 1534-1542.

12. Батищев С.В., Батищева Т.В., Иноземцев С.В., Ивжушкин К.В., Скобелев П.О. Опыт применения мультиагентной системы планирования расписаний в задаче транспортной логистики // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. VII Междунар. конф. – Самара, СНЦ РАН, 27 июля 2005. – С. 388-396.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2014 г.

PROBLEM STATEMENT OF RELIABILITY AND EFFICIENCY OPTIMIZATION OF COMMUNICATION SESSIONS FOR HETEROGENEOUS DATA TRANSFER BETWEEN SWARM OF SPACECRAFTS AND MISSION CONTROL CENTRE VIA NETWORK OF GROUND STATIONS

***D.A. Kalashnikov¹, V.A. Solovyov¹, P.O. Skobelev⁵, E.V. Simonova²,
I.V. Mayorov³, S.P. Grachev⁴, D.I. Tichonov⁵, V.N. Voroszhaykin⁵***

¹ JSC “S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”
4A Lenin Street, Korolev, Moscow Region, 141070, Russia

² Samara State Aerospace University
34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia

³ Institute for the Control of Complex Systems, Russian Academy of Sciences
61 Sadovayastreet, Samara, 443020, Russia

⁴ Software Engineering Company “Smart Solutions” Ltd.
17 Moskovskoe shosse, office center “Vertikal”, office 1201, Samara, 443013, Russia

⁵ Samara State Technical University
244 Molodogvardeyskayastreet, Samara, 443100, Russia

Problem statement specifics are considered the problem of reliability and efficiency optimization of communication sessions for swarm of spacecrafts (SC) and Mission Control Centre (MCC) heterogeneous data transfer via ground stations network.

To solve this problem, we need to find a dynamic balance of interests between tasks and resources. This means that the number of individual operations characteristics, stations equipment specifics and other significant parameters will be considered.

The multi-agent approach in order to solve this problem is justified. Multi-agent technologies allow to create flexible self-organizing schedules of communication sessions of SC group with MCC via the ground stations network.

Keywords: *command and measurement complex, optimization, reliability, simulation, efficiency, communication sessions, SC, MCC, multi-agent technologies.*

Dmitry A. Kalashnikov, Head of “Operation Analysis and Support of the On-Board Radio Engineering Systems and Technical Means of Ground Control of Spacecraft and Launch Vehicles” Department at RSC “Energia”.

Vladimir A. Solovyov, First Deputy General Designer, Deputy Director of Prime Design Bureau in charge of flight operational use, testing rocket-space complexes and systems of RSC “Energia” named after S.P. Korolev”.

Petr O. Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Elena V. Simonova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Igor V. Mayorov, Senior Specialist.

Sergey P. Grachev, Deputy CEO.

Denis I. Tichonov, Postgraduate Student.

Vladimir N. Voroszhaykin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.