

Теоретико-множественная постановка задачи выбора рационального варианта управления орбитальной группировкой малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Set-theoretic formulation of the problem of selecting a rational management option for an orbital constellation of small Earth remote sensing satellites

Мосин / Mosin D.

Дмитрий Александрович

(vka@mil.ru)

доктор военных наук, доцент.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ

(ВКА им. А. Ф. Можайского),

начальник 91-й кафедры (системного анализа и математического обеспечения АСУ).

г. Санкт-Петербург

Паршиков / Parshikov A.

Антон Александрович

(vka@mil.ru)

кандидат технических наук.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

старший преподаватель 91-й кафедры.

г. Санкт-Петербург

Васьков / Vaskov A.

Алексей Геннадьевич

(vka@mil.ru)

ВКА им. А. Ф. Можайского,

адъюнкт 91-й кафедры.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: малые космические аппараты – small spacecraft; дистанционное зондирование Земли – Earth remote sensing; технические средства – technical means; командно-измерительный комплекс – command-measurement complex; наземный автоматизированный комплекс управления – ground automated control system; операция обслуживания – maintenance operations.

В статье представлена теоретико-множественная постановка задачи выбора рационального варианта управления орбитальной группировкой малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. В системе управления орбитальной группировкой предлагается использовать технические средства наземного автоматизированного комплекса управления научного и социально-экономического назначения, расположенные на территории Российской Федерации.

The article presents a set-theoretic formulation of the problem of selecting an optimal control option for an orbital constellation of small spacecraft for Earth remote sensing. It is proposed to use the technical means of the ground automated control complex for scientific and socio-economic purposes, located within the territory of the Russian Federation, in the orbital constellation management system.

Введение

В настоящее время наметилась тенденция на увеличение состава орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли на основе малых КА (МКА) ДЗЗ. Эффективность функционирования ОГ МКА напрямую зависит от качества решения задач управления бортовыми системами КА с использованием технических средств (ТСр) наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) научного и социально-экономического назначения (НСЭН) и минимизации объема составляющих в ее работе операций обслуживания (ОО) [2]. При организации управления оперативно развертываемой многоспутниковой ОГ на основе МКА необходимо рассмотреть возможности привлечения всех технических средств (ТСр), расположенных на территории России.

Применимо к российским МКА ДЗЗ можно говорить о координатно-временном принципе управления, при котором часть функций управления реализуется на уровне наземного сегмента, часть – на борту МКА. Данный принцип управления включает в себя технологический цикл управления (ТЦУ), описывающий формальные правила взаимодействия бортовой

целевой аппаратуры (БЦА) МКА и ТСр на типовом интервале времени. Одной из составляющих ТЦУ можно выделить закладку на борт рабочей программы, определяющей циклограмму работы ТСр и сеансов сброса целевой информации на командно-измерительных пунктах (КИП) [5].

Учитывая современные технологии и принципы управления МКА ДЗЗ, к территориально распределенной сети КИП предъявляются повышенные требования. Несмотря на внедрение технологий и методов оптимального распределения информационных потоков, ключевой проблемой системного проектирования сети КИП является её неоднородность, то есть часть её пунктов даёт крайне низкий вклад в принятый объем целевой информации. Развертывание перспективной ОГ МКА ДЗЗ требует соответствующего системного подхода по формированию конфигурации сети КИП, обеспечивающей требуемую полноту и оперативность приема целевой информации.

Применение концептуального подхода в моделировании обусловлено тем, что ввиду географической распределённости сети КИП в совокупности с ОГ МКА ДЗЗ большой размерности и структурной неоднородности нецелесообразно проводить моделирование на временном отрезке, сопоставимом с временными отрезками типовых циклов ТЦУ и рабочих программ МКА. Структурная неоднородность ОГ МКА ДЗЗ означает наложение различных орбитальных циклов каждого МКА ДЗЗ [3]. Следовательно, из-за значительного количества элементов космического и наземного сегментов космической системы (КС) МКА ДЗЗ неоднородной структуры необходимо использовать концептуальное моделирование, учитывающее ключевые параметры, для получения предварительной (промежуточной) информации для последующего анализа, то есть уточненные исходные данные для детализованного моделирования (приближенного к условиям функционирования элементов КС МКА ДЗЗ) уровня разработки циклограмм и опорного плана съёмки объектов на поверхности Земли.

Также для качественного принятия решений по формированию тактико-технических требований необходима научно-методическая основа, которая позволит определить максимально достижимую систему

целевых характеристик с учетом текущего научно-технологического развития.

Теоретико-множественная постановка задачи

Задача выбора структуры и параметров управления МКА напрямую связана с решением задачи оптимизации ее функционирования, заключающейся в распределении функций между ее подсистемами и элементами в процессе выполнения целевой задачи наилучшим образом. С целью формализации решаемой задачи прежде всего дадим ее обобщенное теоретико-множественное описание [6]. Для этого введем основные множества и отношения, позволяющие описать функционирование различных технических средств (ТСр).

$A = \{a_j, j \in N^A \mid N^A = \{1, \dots, n^A\}\}$ – множество МКА, которое представляет собой совокупность следующих подмножеств: $A = A_1 \cup A_2$ (причем, $A_1 \cap A_2 = \emptyset$), $A_1 = \{a_j, j \in N_1^A \mid N_1^A = \{1, \dots, n_1^A\}\}$ подмножество МКА, оборудованных комплектом БЦА 1-го типа (ДЗЗ), и $A_2 = \{a_j, j \in N_2^A \mid N_2^A = \{(n_1^A + 1), \dots, n_2^A\}\}$ подмножество МКА, оборудованных комплектом БЦА 2-го типа (передача данных).

$B = \{b_i, i \in N^B \mid N^B = \{1, \dots, n^B\}\}$ – множество ТСр,

$C = \{c_l, l \in N^C \mid N^C = \{1, \dots, n^C\}\}$ – множество территориально-разнесенных КИП,

$D = \{d_m, m \in N^D \mid N^D = \{1, \dots, n^D\}\}$ – множество технологических циклов управления (ТЦУ), при этом каждому $a_j \in A$ МКА соответствует свое подмножество ТЦУ $D_j = \{d_m \in D, m \in N_j^D \mid N_j^D \subseteq N^D\}$, накладывающих технологические ограничения на процесс управления ТСр КИП данным МКА.

Следует отметить, что ТЦУ для каждого МКА может быть описан И-ИЛИ графом $G^D = (O, W^O)$, в котором множество вершин $O = \{o_k, k \in N^O \mid N^O = \{1, \dots, n^O\}\}$ представляет собой ОО, входящие в ТЦУ, и множество логических взаимосвязей (дуг) $W^O = \{w_k^o, \tilde{k} \in N^{W^O} \mid N^{W^O} = \{1, \dots, n^{W^O}\}\}$ между ОО (фрагмент такого графа представлен на рис. 1). Каждой o_k ОО соответствует q_k^O длительность ее проведения, а каждому d_m ТЦУ – q_m^D .

Представленный фрагмент ТЦУ на рис. 1 содержит следующие ОО, которые являются вершинами графа: вершина 1 – выдача на борт командно-программной информации;

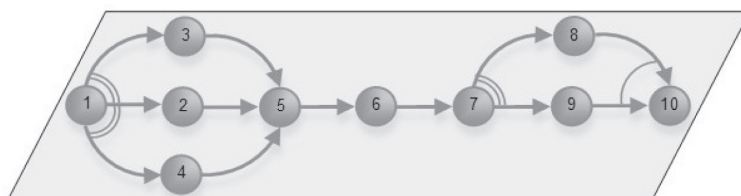


Рис. 1. Фрагмент возможного ТЦУ

- вершина 2 – съём телеметрической информации в режиме 1 с помощью ТСр;
- вершина 3 – съём телеметрической информации в режиме 2 с помощью ТСр;
- вершина 4 – съём телеметрической информации через МКА-ретранслятор;
- вершина 5 – проведение измерения текущих навигационных параметров;
- вершина 6 – выдача на борт командно-программной информации;
- вершина 7 – проведение измерения текущих навигационных параметров;
- вершина 8 – съём телеметрической информации в режиме;
- вершина 9 – проведение измерения текущих навигационных параметров;
- вершина 10 – выдача на борт командно-программной информации.

Наряду с указанными множествами и отношениями целесообразно ввести функции, позволяющие реализовать пространственно-временные ограничения и технические возможности при взаимодействии ТСр с МКА.

Для учета требования p_1 (нахождения МКА зон радиовидимости (ЗРВ) ТСр) введем матричную временную функцию $R = \{r_{ij}(t) : r_{ij} \in \{0;1\}\}$ (контактный потенциал), принимающую значения: $r_{ij}(t) = 1$, если a_j МКА в момент времени t находится в ЗРВ b_i ТСр и $r_{ij}(t) = 0$ в противном случае.

Для учета требования p_2 («доступности» – готовности ТСр к проведению сеанса управления) введем матричную временную функцию $\theta = \{\theta_{ijk}(t) : \theta_{ijk} \in \{0;1\}\}$ (потенциал доступности), характеризующую готовность b_i ТСр выполнять o_k ОО с a_j МКА и принимающую значения: $\theta_{ijk}(t) = 1$, если b_i ТСр в момент времени t готово выполнить o_k ОО с a_j МКА, и $\theta_{ijk}(t) = 0$ – в противном случае.

Проведенный анализ показал, что планирование применения ТСр КИПов при управлении МКА целесообразно осуществлять с учетом указанных требований p_1, p_2 на суженном множестве альтернатив $\Delta_{p_1, p_2}^{(u)} \in \Delta^{(u)}$, математическая конструкция которого имеет вид:

$$\Delta_{p_1, p_2}^{(u)} = \left\{ \langle b_i, a_j, o_k, t \rangle \in B \times A \times O \times T \mid \chi_{ijk}(t) = r_{ij}(t)\theta_{ijk}(t) = 1 \right\}. \quad (1)$$

Теоретико-множественная модель планирования проведения ОО ТСр КИПов может быть представлена в виде математической структуры выбора с мультипредпочтением [6]:

$$\left(Q(S), \overset{(u)}{\Delta}_{p_1, p_2}, \{P_3, P_4, P_5, P_6, P_7\}, \{h_\sigma, \sigma \in \Gamma\}, \{\tilde{F}_\gamma, \gamma \in \tilde{\Phi}\} \right), \quad (2)$$

где: $Q(S)$ – исходная математическая структура типа S , которая определяет тип модели (статический, динамический и т. п.);

$\Delta_{p_1, p_2}^{(u)}$ – суженное множество альтернатив (решений), на котором осуществляется выбор плана применения ТСр КИПов;

P_3, P_4, P_5, P_6, P_7 – требования, связанные с технологическими и техническими ограничениями;

$\{h_\sigma, \sigma \in \Gamma\}$ – множество отношений предпочтения, позволяющих выбрать рациональные планы применения σ ТСр, к которым относятся стремление максимизировать количество обслуженных МКА по ТЦУ (пропускная способность) и обеспечить своевременность и полноту выполнения ОО (качество информационного взаимодействия);

$\{\tilde{F}_\gamma, \gamma \in \tilde{\Phi}\}$ – множество операторов, позволяющих задавать результирующее отношение предпочтения $h_{\text{рез}} = \tilde{F}_\gamma[\{h_\sigma, \sigma \in \Gamma\}]$ выбора рациональных планов применения ТСр.

С учетом приведенного описания функционирования различных ТСр на теоретико-множественном уровне рассматриваемую задачу (формула 2) представим в общем виде:

$$\left((G^C \circ G^A) \times \Omega, \Delta_\beta, \{h_\beta^b, \beta \in \Gamma\}, \{h_\sigma^a, \sigma \in \tilde{\Gamma}\}, \{F_\gamma, \gamma \in \Phi\} \right), \quad (3)$$

где:

$(G^C \circ G^A) \times \Omega$ – отражает процесс взаимодействия всех возможных вариантов ТСр, представленных гиперграфом G^C (рис. 2), со всеми возможными вариантами построения ОГ МКА перспективных космических систем (комплексов), представленных гиперграфом G^A , в условиях деструктивных воздействий среды естественного и искусственного происхождения Ω . Процесс взаимодействия конкретного варианта использования ТСр с вариантом построения ОГ МКА осуществляется в рамках вышеописанного процесса функционирования НАКУ на теоретико-множественном уровне и представленного математической структурой с мультипредпочтением (формула 2). Гиперграф возможных вариантов применения ТСр $G^C = (B, W^C, V^C)$ представляет собой множество КИП S , множество объединяющих несколько КИП гиперребер $W^C = \{w_i^c, i \in N^{W^C} \mid N^{W^C} = \{1, \dots, n^{W^C}\}\}$, и множество значений параметров КИП

$$V^C = \left\{ \vec{v}_i^c = |v_{1i}^c, v_{2i}^c, v_{3i}^c, \vec{v}_{4i}^c|, i \in N^C \mid N^C = \{1, \dots, n^C\} \right\},$$

в котором параметры $v_{1i}^c, v_{2i}^c, v_{3i}^c$ принимают положительные и целочисленные значения, обозначающие количество ТСр, дислоцируемых на i КИП, а вектор \vec{v}_{4i}^c характеризует положение КИП в пространстве (геодезические долгота, широта и высота), значения которого известны при решении рассматриваемой задачи. Гиперграф возможных вариантов построения ОГ МКА ДЗЗ $G^A = (A, W^A, V^A)$ представляет собой множество МКА A , множество объединяющих несколько МКА гиперребер $W^A = \{w_j^a, j \in N^{W^A} \mid N^{W^A} = \{1, \dots, n^{W^A}\}\}$, обозначающих состав ОГ МКА ДЗЗ, и множество значений параметров МКА $V^A = \left\{ \vec{v}_j^a = |v_{1j}^a, v_{2j}^a|, j \in N^A \mid N^A = \{1, \dots, n^A\} \right\}$,

в котором вектор \vec{v}_{ij}^A характеризует положение a_j МКА в пространстве и известен при решении рассматриваемой задачи, а параметр $v_{2j}^A \in D_j$ определяет ТЦУ, в соответствии с которым осуществляется управление a_j МКА.

Для достоверного оценивания целевых и информационно-технологических возможностей системы управления ТСр выбор ТЦУ осуществляется с учетом обеспечения максимальной загруженности его ТСр [6]. Под деструктивными воздействиями среды естественного и искусственного происхождения Ω полагаем опосредованные детерминированные целенаправленные и непосредственные неизвестные целенаправленные воздействия. Опосредованные детерминированные целенаправленные воздействия представляют собой уничтожение или выход из строя МКА-ретрансляторов, при этом полагаем, что в результате таких воздействий невозможно применять ретрансляционные технологии управления. Непосредственные целенаправленные воздействия представляют собой комплексное воздействие среды на наземную космическую инфраструктуру (КИП, ТСр), при этом полагаем, что ввиду существенной неопределенности информации касательно данного воздействия его результаты неизвестны.

1. Δ_β – суженное множество альтернатив, на котором осуществляется решение задачи многокритериального выбора варианта задействования ТСр.

2. $\{h_\beta^g, \beta \in \Gamma\}$ – множество отношений, ограничивающих выбор, к которым относятся следующие ограничения:

h_1^β – ресурсные (экономические) ограничения, формализующие требование p_8 к стоимости варианта оснащения ТСр КИП и задаваемые в виде некоторой области допустимых значений;

h_2^β – специальные ограничения, формализующие требование p_9 к возможности размещения ТСр КИП,

отражающее влияние климатических условий на процесс функционирования ТСр, электромагнитной совместимости и пр.;

h_3^β – пространственно-временные ограничения, формализующие требование p_1 контакта, отражающее необходимость соблюдения при выполнении ОО условия нахождения МКА в зонах радиовидимости ТСр, и требование p_2 доступности, отражающее необходимость готовности ТСр к проведению СУ;

h_4^β – технические ограничения, формализующие требование p_7 одновременности, означающее невозможность выполнения одной и той же ОО по одному МКА;

h_5^β – технологические ограничения, формализующие требование p_3 неразрывности, требование p_4 несовместности, требование p_5 совместности, требование p_6 следования.

3. $\{h_\sigma^a, \sigma \in \tilde{T}\}$ – множество отношений предпочтения, связанных с качеством выполнения задач по предназначению каждой(-ым) КС(К).

К показателям качества варианта использования ТСр относятся:

h_1^a – вариант оснащения ТСр КИП;

h_2^a – пропускная способность;

h_3^a – качество информационного взаимодействия;

h_4^a – технологическая связность.

$\{F_\gamma, \gamma \in \Phi\}$ – множество операторов, позволяющих задавать результирующее отношение предпочтения

$$h_{\text{рез}} = F_\gamma \left[\{h_\sigma^a, \sigma \in \tilde{T}\} \right].$$

Описанные математические конструкции позволяют представить правило, в соответствии с которым осуществляется выбор варианта управления ОГ МКА ДЗЗ, задействуя ТСр в следующем виде:

$$(W^{C^*}, V^{C^*}) = \underset{(W^C, V^C) \in \Delta_\beta}{\text{Arg opt}} \left\{ h_{\text{рез}}^a(W^C, V^C), W^C = \{w_i^c, \tilde{i} \in N^{W^C}\}, V^C = \{v_i^c, i \in N^C\} \right\}$$

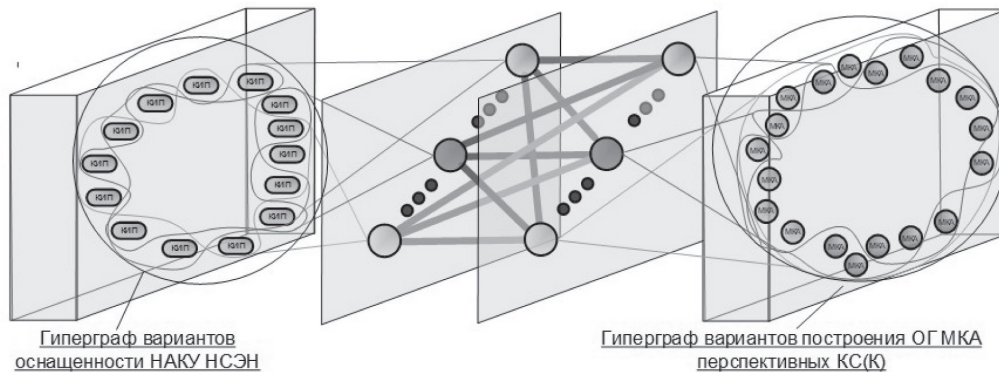


Рис. 2. Графовая модель задачи выбора рациональных вариантов использования ТСр

Таким образом, задача выбора варианта управления ТСр сведена к классической задаче линейного программирования, которую целесообразно решать, например, методами декомпозиции Данцига – Вульфа и Корнаи – Липтака [2].

Выводы

Применение предложенного подхода выбора варианта управления ТСр позволяет наиболее полно учесть все возможные ограничения, рассчитывать суточные планы задействования ТСр, гибко реагирующие на изменения обстановки, добиться более полного по сравнению с существующими методами сочетания разноплановых целей, поставленных перед разработчиками перспективных программ совершенствования космических систем. На основе системного подхода обеспечивается требуемая полнота и оперативность приёма целевой информации.

Литература

1. ГОСТ Р 53802–2010. Системы и комплексы космические. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 34 с.
2. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления : учебник / Ю.С. Мануйлов, В.Н. Калинин, В.С. Гончаревский [и др.]. – Санкт-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. – 609 с.
3. Емельянов, А. А. Проблемные вопросы построения наземной космической инфраструктуры ДЗЗ и комплексного целевого применения российских космических комплексов и систем ДЗЗ / А.А. Емельянов, А.В. Борисов, Л.А. Гришанцева // Сборник трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (1–3 июня 2016 г.) / под ред. д.т.н., проф. А.А. Романова. – Москва : АО «РКС», 2016. – С. 90–98.
4. Колпин, М. А. Методика оценивания эффективности функционирования наземного автоматизированного комплекса управления КА / М.А. Колпин, П.А. Проценко, А.В. Слащев // Труды МАИ. – 2017. – № 92. – С. 24.
5. ЕТРИС ДЗЗ – современные решения в развитии отечественной наземной космической инфраструктуры дистанционного зондирования Земли из космоса / В.В. Ромашкин, П.А. Лошкарев, Д.И. Федоткин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 220–227.
6. Калинин, В. Н. Теоретические основы системных исследований : учебник / В.Н. Калинин. – Санкт-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – 293 с.
7. Дуга, В. В. К вопросу о развитии направления малых космических аппаратов / В.В. Дуга, Д.А. Мосин, А.А. Полехин // Авиакосмическое приборостроение, 2020. – № 10. – С. 26–33.
8. Городецкий, В. И. Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения / В.И. Городецкий, О.В. Карсаев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017 – № 2 (187). – С. 234–247.
9. Белокопытов, М. А. Методика определения рационального состава наземного комплекса управления космическими аппаратами дистанционного зондирования земли с учетом значимости номенклатуры средств наземного автоматизированного комплекса управления / М.А. Белокопытов, А.В. Кокорев // Информация и Космос. – 2019. – № 3. – С. 157–163.
10. Карытко, А. А. Методика анализа динамической и диффузионной составляющей стратегии управления многоспутниковой орбитальной группировкой на основе СРС-метода / А.А. Карытко, Э.М. Халиков // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2025. – № 639. – С. 50–60.
11. Минаков, Е. П. Модель оценивания эффективности управления многоспутниковыми орбитальными системами / Е.П. Минаков, А.Е. Привалов, П.Ю. Бугайченко // Труды МАИ. – 2022. – № 125. – С. 125–129.
12. Прикладные аспекты оптимизации орбитальных структур спутниковых систем за счет уточнения параметров орбитального движения / В.Ф. Волков, А.В. Кульвиц, А.Ю. Коваленко, В.И. Салухов // Информатика и автоматизация. – 2020. – Т.19, № 4. – С. 719–746.
13. Белихин, Е. Н. Обоснование вариантов построения орбитальной группировки малых космических аппаратов-ретрансляторов данных дистанционного зондирования Земли для оперативной передачи информации на наземные пункты приема / Е.Н. Белихин, П.А. Проценко // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2025. – Вып. 696. – С. 84–93.