Формирование требований к перспективной системе средств выведения космических аппаратов на основе концепции опережающего развития

The formation of requirements for new system launch spacecraft based on the concept of priority development

Казаков / Kazakov R.
Рустем Рифатьевич
(kazakov13kaf@mail.ru)
кандидат технических наук.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА им. А. Ф. Можайского),
старший научный сотрудник 25 отдела ВИ (НИ).
г. Санкт-Петербург

Семенов / Semenov E.
Евгений Николаевич
(vka@mail.ru)
ВКА имени А. Ф. Можайского,
адъюнкт кафедры конструкции ракет-носителей и ракетных двигателей.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: космический аппарат – the spacecraft; система средств выведения – launch system; управление развитием – management development; формирование требований к системе – formation of system requirements.

В статье описана методика формирования требований к перспективной системе средств выведения космических аппаратов. В основу методики положена концепция опережающего развития средств выведения. Концепция предполагает формирование вариантов развития на основе прогнозов состава и параметров целевых задач, а также ограничений на интервале планирования. Описаны основные этапы методики. Материал статьи может быть полезен при обосновании требований к перспективной системе средств выведения и разработке планов развития космической инфраструктуры.

The article describes the method of formation of requirements for new system launch spacecraft. The methodology is based on the concept of priority development of launch vehicles. The concept involves the formation of development options, based on projections of the composition and characteristics of tasks and restrictions on planning. Describes the main stages of the methodology. The material may be useful in the justification of requirements for the advanced system of launch vehicles and the development of space infrastructure.

Введение

В настоящее время наблюдается существенное возрастание роли отечественных орбитальных космических средств (группировок космических аппаратов (КА)) в экономике и оборонной сфере государства. Полнота состава, своевременность развертывания и восполнения орбитальных группировок (ОГ) КА определяются возможностями системы средств выведения (ССВ) космических аппаратов [1]. Под системой средств выведения будем понимать совокупность эксплуатируемых (применяемых или готовых к применению) ракет-носителей, разгонных блоков и иных средств, предназначенных для запуска космических аппаратов различного целевого назначения и соответствующую наземную космическую инфраструктуру. От состояния и возможностей системы средств выведения напрямую зависит уровень обороноспособности государства и эффективность функционирования его социально-экономического комплекса [2,3].

Цель исследования

Цель исследования – разработка методики обоснования требований к системе средств выведения КА, обеспечивающей полноту решения текущих и перспективных задач выведения КА при ограничениях на надежность, стоимость и интенсивность выведения.

Исходные предположения и допущения метода исследования

Принципиальной особенностью ССВ является ее открытость (незамкнутость), означающая функционирование в условиях динамически изменяющейся среды [4]. Данные изменения обусловлены двумя группами факторов: внешними, связанными с динамикой состава задач по запуску космических аппаратов, и внутренними, связанными с процессами изменения

2 2020.indd 152 23.06.2020 9:27:26

состояния собственно средств выведения. Динамика состава задач может проявляться как в появлении потребности решения новых задач по освоению космического пространства и расширении его использования в интересах государства, так и в потере актуальности некоторых ранее решаемых задач. В частности, могут измениться параметры орбит выведения вследствие проявления отрицательного влияния на возможность хозяйственного использования орбит фактора загрязнения космическим мусором [5]. Изменение состояния средств выведения может выражаться, в том числе, в их моральном старении [6,7] – отставании их технического уровня, элементной базы, эксплуатационно-технических характеристик (например, ремонтопригодности, контролепригодности) от изменившегося вследствие технического прогресса общего уровня. И в том и в другом случаях возникает потребность во внесении своевременных изменений в структуру системы средств выведения, касающихся разработки и введения в эксплуатацию новых средств выведения, снятия с эксплуатации устаревших средств выведения, либо их модернизации. Так как в основу вносимых изменений в ССВ должен быть положен прогноз состояния средств выведения и множества перспективных задач выведения, речь идет о применении концепции опережающего развития ССВ, ориентированного на своевременное реагирование на будущее. Таким образом, речь идет об опережающем управлении структурной динамикой ССВ КА.

Постановка задачи исследований

При заданных исходных данных: о $T_{\text{Пл}}$ – горизонте планирования космической деятельности государства; о $Z^t_{\{K\}} = \{z^t_1, z^t_2, ..., z^t_K\}$ – перечне задач по выведению КА заданной массы m_k на заданную орбиту; о значениях требований к $P^{\min}_k$ – надежности и $S^{\max}_k$ – стоимости выведения КА; о $B^t_{\{N\}} = \{b^t_1, b^t_2, ..., b^t_N\}$ – составе элементов ССВ

Рис. 1. Структура предлагаемой методики

2 2020.indd 153 23.06.2020 9:27:26

и их параметрах: M_{no} – максимальной массы выводимого груза, показателей надежности P_{no}, стоимости S_{no} и максимальной интенсивности $W_{no}^{\max}$ выведения грузов на типовые орбиты $\in \{1,2,...,O^*\}$ необходимо разработать научно-методическое обеспечение, позволяющее определить достаточность существующей системы средств выведения для решения текущих и перспективных задач выведения при оптимальном распределении задач по элементам ССВ.

При недостаточности существующей системы средств выведения – предпочтительные варианты развития ССВ с учетом ограничений, связанных с нестабильным выделением ресурсов.

Описание методики решения задачи исследований

Предлагаемая методика основывается на концепции опережающего развития ССВ, вытекающей из концепции более высокого уровня, а именно – концепции функционально-структурного анализа и синтеза эволюционирующих систем Е. Балашова [8], которая предполагает построение перспективных вариантов технических структур развивающихся систем на основе прогноза развития функциональной структуры сложной системы.

Ввиду этого обстоятельства, решение задачи формирования требований к перспективной системе средств выведения, как видно из рис. 1, целесообразно начать с прогнозирования перспективных направлений космической деятельности государства для заданного горизонта планирования. Состав таких направлений позволит определить значения массогабаритных характеристик перспективных КА и орбит их выведения. При этом следует учесть возможные ограничения по орбитам выведения с учетом влияния космического мусора. Все это позволит сформировать окончательный состав и определить параметры текущих и перспективных задач выведения КА для заданного горизонта планирования.

Возможность выполнения всего спектра перспективных задач выведения КА определяется составом и возможностями средств выведения КА [9,10]. Поэтому следующим этапом методики является уточнение структуры и параметров состояния существующей системы средств выведения. При этом большую роль может сыграть система мониторинга технического состояния и остаточного ресурса наземной составляющей ССВ, активно развиваемая в течение последних двадцати лет как в теоретическом, так и в практическом направлениях.

После того как получены прогнозы состава и параметров задач выведения КА на рассматриваемый период планирования, уточнены значения показателей остаточного ресурса и срока службы наземной инфраструктуры средств выведения, необходимо найти наиболее приемлемый вариант распределения задач выведения по элементам системы средств выведения, чтобы при имеющихся ограничениях по надежности, стоимости и интенсивности выведения максимизировать число успешно выполняемых задач на интервале планирования. Формальная постановка данной задачи может быть реализована в виде задачи одномерного булевого целочисленного программирования с целевой функцией (1)

$$X^* = \arg\max_{X\in\Delta_X} J(X),\ J(X) = \sum_{k=1}^{K}\sum_{n=1}^{N}\beta_k x_{kn}, \quad (1)$$

где $X = \|x_{kn}\|_{K\times N}$ – вариант распределения задач по элементам ССВ,

$$x_{kn} = \begin{cases} 1, \text{если } k\text{ - я задача решается на } n\text{ - м элементе,} \\ 0, \text{в противном случае.} \end{cases},$$

δ_{ko} – дополнительная переменная,

$$\delta_{ko} = \begin{cases} 1, \text{если КА в } k\text{ - й задаче выводится на } o\text{ - ю орбиту,} \\ 0, \text{в противном случае.} \end{cases},$$

$\beta_k \in [0,1]$ – весовой коэффициент важности k-й задачи, $\sum_{k=1}^{K}\beta_k = 1$, при системе ограничений (2–6):

$$\sum_{n=1}^{N} x_{kn} \le 1, \forall k = 1,2,...,K \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{K} x_{kn} \times m_k \times \delta_{ko} \le M_{no}, \forall n = 1,2,...,N, \forall o = 1,2,...,O^* \quad (3)$$

$$\max_{k=1,2,...,K}\{P_k^{\min} \times x_{kn} \times \delta_{ko}\} \le P_{no}, \forall n = 1,2,...,N, \forall o = 1,2,...,O^* \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{K} S_k^{\max} \times x_{kn} \times \delta_{ko} \ge S_{no}, \forall n = 1,2,...,N, \forall o = 1,2,...,O^* \quad (5)$$

$$\max_{k=1,2,...,K}\{x_{kn} \times \delta_{ko}\} \le (T_{Пл} - t) \times W_{no}^{\max}, \forall n = 1,2,...,N, \forall o = 1,2,...,O \quad (6)$$

Смысл выше сформулированных ограничений следующий: (2) – каждая задача выведения решается на одном элементе ССВ; (3) – масса выводимого груза не превышает максимальную грузоподъемность средства выведения; (4) – фактическая надежность выведения КА не ниже требуемой; (5) – фактическая стоимость выведения не превышает запланированную; (6) – фактическая интенсивность выведения по каждому элементу ССВ не превышает их потенциальные возможности по темпам запуска КА.

Если в результате исследования возможности оптимального распределения задач выведения КА по элементам системы средств выведения окажется, что все перспективные задачи полностью распределены (могут быть успешно решены на существующей технической структуре ССВ), то делается вывод о том,

2 2020.indd 154 23.06.2020 9:27:28

что требования к системе средств выведения могут быть сохранены на существующем уровне.

В противном случае необходимо приступить к формированию вариантов развития системы средств выведения, обеспечивающих полноту решения задач выведения КА для заданного горизонта планирования. Таких вариантов (требующих консолидации усилий ведущих специалистов ракетно-космической отрасли) в общем случае может быть несколько. Об этом, в частности, отмечено в монографии Е. Балашова [8], где сказано, что единственной функциональной структуре развивающейся системы может соотвествовать несколько вариантов технических структур.

Сформированные варианты должны быть проанализированы на предмет выбора наиболее предпочтительного из них. Поэтому следующими этапами методики являются анализ степени реализуемости вариантов развития системы средств выведения в условиях нестабильного выделения ресурсов [7] и ранжирование вариантов развития системы средств выведения с учетом устойчивости к реализации в условиях нестабильного выделения ресурсов с выбором предпочтительного варианта развития системы средств выведения.

Исходными данными для анализа степени реализуемости вариантов развития ССВ в условиях нестабильного выделения ресурсов являются оценки необходимых затрат на реализацию рассматриваемых вариантов развития ССВ, а также прогнозируемые этапы выделения ресурсов на реализацию проектов развития. Каждый вариант требует вложения финансовых, материальных и трудовых ресурсов. Реализация варианта развития ССВ планируется на заданном числе этапов. На каждом этапе выделяются финансовые, материальные и трудовые ресурсы, а сами работы могут быть проведены только в интервалах времени, когда выделенные ресурсы поступили на объект [7].

Оценки необходимых финансовых, материальных и трудовых ресурсов на реализацию варианта развития ССВ (выражения (7–9)):

$$c_i = \underset{\sim}{c} = \left\{\left\langle c, \mu_{\underset{\sim}{c}}(c)\right\rangle\right\} \quad (7), \; d_i = \underset{\sim}{d} = \left\{\left\langle d, \mu_{\underset{\sim}{d}}(d)\right\rangle\right\} \tag{8}$$

$$b_i = \underset{\sim}{b} = \left\{\left\langle b, \mu_{\underset{\sim}{b}}(b)\right\rangle\right\}, \tag{9}$$

а также значения выделяемых ресурсов (выражения (10–12)):

$$W_k = \underset{\sim}{w_k} = \left\{\left\langle w_k, \mu_{\underset{\sim}{w_k}}(w_k)\right\rangle\right\} \tag{10}$$

$$V_k = \underset{\sim}{v_k} = \left\{\left\langle v_k, \mu_{\underset{\sim}{v_k}}(v_k)\right\rangle\right\} \tag{11}$$

$$B_k = \underset{\sim}{b_k} = \left\{\left\langle b_k, \mu_{\underset{\sim}{b_k}}(b_k)\right\rangle\right\} \tag{12}$$

не могут быть точно известны и задаются нечеткими числами.

Пусть булева переменная x_{ijk} принимает единичное значение, когда i-е средство выведения создается в j-м интервале k-го этапа. Тогда задача реализации варианта развития ССВ в условиях нестабильного финансирования может быть сформулирована как многокритериальная задача нечеткого линейного программирования с двумя целевыми функциями. Первая целевая функция отражает полноту выполнения программ развития (выражение (13). Вторая целевая функция отражает длительность реализации варианта (выражение (14).

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{m_k} x_{ijk} \;\Rightarrow \max \tag{13}$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{n} t_i \sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{m_k} x_{ijk} \;\Rightarrow \min \tag{14}$$

где $f_1(x)$ – показатель полноты реализации варианта развития ССВ в условиях нестабильного финансирования; $f_2(x)$ – показатель длительности реализации варианта развития ССВ в условиях нестабильного финансирования; α_i – коэффициент важности создания i-го элемента ССВ; t_i – длительность создания (модернизации) i-го элемента ССВ.

Множество ограничений представлено выражениями (15–19).

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{m_k} x_{ijk} \le 1, \;\; \forall\, i = 1,\ldots, n \tag{15}$$

$$\sum_{j=1}^{m_k} \sum_{i=1}^{n} \underset{\sim}{d}_i \, x_{ijk} \, \operatorname{sign}(t_j^k - t_i) \le \underset{\sim}{V_k}, \;\; \forall\, k = 1,\ldots, K \tag{16}$$

$$\sum_{j=1}^{m_k} \sum_{i=1}^{n} \underset{\sim}{b_i} \, x_{ijk} \, \operatorname{sign}(t_j^k - t_i) \le \underset{\sim}{B_k}, \;\; \forall\, k = 1,\ldots, K \tag{17}$$

$$\sum_{j=1}^{m_k} \sum_{i=1}^{n} \underset{\sim}{c_i} \, x_{ijk} \, \operatorname{sign}(t_j^k - t_i) \le \underset{\sim}{W_k}, \;\; \forall\, k = 1,\ldots, K \tag{18}$$

$$\sum_{k=k^*}^{K} \sum_{j=j^*+1}^{j^*} x_{i_2 jk} - x_{i_1 j^* k^*} \le 0, \forall j^* = \overline{1, m_k}; \forall k^* = \overline{1, K}. \tag{19}$$

где

$$\operatorname{sign}(t_j^k - t_i) = \begin{cases} 1, \text{ если } t_j^k \ge t_i \\ 0, \text{ если } t_j^k < t_i \end{cases}.$$

Смысл выше сформулированных ограничений следующий: (15) – создание (модернизация) i-го элемента ССВ осуществляется только на одном j-м интервале k-го этапа; (16), (17) и (18) – суммарные материальные, трудовые и финансовые ресурсы, расходуемые на каждом этапе, не должны превосходить выделяемых средств;

2 2020.indd 155 23.06.2020 9:27:29

(19) – начало создания (модернизации) элемента i2 следует только после окончания создания (модернизации) элемента i_1.

Алгоритм решения задачи анализа степени реализуемости вариантов развития ССВ в условиях нестабильного выделения потребных ресурсов состоит «в преобразовании двухкритериальной задачи к последовательности однокритериальных задач методом уступок и дальнейшему решению однокритериальных задач нечеткого линейного булевого программирования методом ветвей и границ» [3, 7].

После того как закончен этап выбора предпочтительного варианта развития ССВ, можно приступить к формированию требований к перспективным средствам выведения КА и формированию требований к системе средств выведения КА в целом. Сущность данных этапов носит в основном нормативно-юридический характер и реализуется в пунктах различных нормативно-правовых документов, регламентирующих развитие ССВ на рассматриваемом плановом периоде времени.

Выводы

Описанная в статье методика формирования требований к перспективной системе средств выведения КА на основе концепции опережающего развития заключается в применении механизма итерационного сопоставления множества изменяющихся целевых задач с возможностями их выполнения в условиях динамичного характера состава и параметров средств выведения и имеющихся ресурсов, что позволяет оперативно корректировать требования к системе средств выведения.

Литература

1. Садчиков, И. И. Обоснование рациональной полетной кратности использования двигателей и планера многоразовых средств выведения полезной нагрузки на космические орбиты/ И.И. Садчиков, С.А. Чулков // Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т. 16, № 6. – С. 164–170.

2. Гранкин, Б. К. Проблемы и пути обоснования требований к универсальным стартовым комплексам и их составным частям / Б.К. Гранкин, В.В. Козлов // Сб. тезисов докладов в/ч 73790. – М., 1995.

3. Определение потребности в модернизации составных частей ракетно-космических комплексов / Е.В. Басотин [и др.] //Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 12 (3). – С. 486–490.

4. Сизяков, Н. П. Анализ состояния и тенденций развития рынка космических услуг / Н.П. Сизяков, Д.В. Скориков // Информация и Космос. – 2010. – № 1. – С. 119–121.

5. Виды защит космических аппаратов от космического мусора / В.В. Бурмистров [и др.] // Труды Военно-космической академии А.Ф.Можайского. – 2015. – № 649. – С. 144–152.

6. Муравьев, А. В. Прогнозирование срока службы информационной системы с учетом морального старения элементной базы технических средств / А.В Муравьев, О.Л. Шестопалова // Транспортное дело России. – 2014. – № 6. – С. 186–189.

7. Анализ влияния нестабильности обеспечения ресурсами на степень реализуемости программ развития системы средств выведения космических аппаратов [Электронный ресурс] / А.Н Миронов [и др.] // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. Научный интернет-журнал. – 2017. – № 4 (38). – Режим доступа: http://iea.gostinfo.ru/files/2017_04/2017_04_09.pdf., свободный. – Загл. с экрана.

8. Балашов, Е. П. Эволюционный синтез систем / Е.П. Балашов. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.

9. Пайсон, Д. Б. Техническая политика создания космического сегмента спутниковых систем связи: Учебное пособие / Д.Б. Пайсон. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – 99 с.

10. Левитан, Е. П. Современные ракеты-носители / Е.П. Левитан, С.А. Герасютин // Земля и Вселенная. – 2008. – № 6. – С. 90–99.

2 2020.indd 156 23.06.2020 9:27:29