

ОБОСНОВАНИЕ СТРАТЕГИИ РАЗВЕРТЫВАНИЯ И ВОСПОЛНЕНИЯ ОРБИТАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

В.И. Горбулин
(Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского)
Р.А. Евдокимов
(ОАО «РККА «Энергия» им. С.П. Королева») **А.С. Фадеев**
(ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры»)

Рассматриваются вопросы комплексной оптимизации стратегии развертывания, наращивания и восполнения орбитальных систем космических аппаратов с учётом возможностей финансовых инвестиций, особенностей логистического обеспечения и экологических последствий пусков ракет-носителей.

Ключевые слова: космическая деятельность, наземная космическая инфраструктура, ракета-носитель, средства выведения, планирование пусков ракет-носителей, экологическая обстановка, космический аппарат, орбитальная система, стратегия развертывания, логистическое обеспечение, экономические ресурсы, оптимизация управления организационно-технической системой.

Введение

В современных условиях космическая деятельность является одним из основных факторов, определяющих уровень развития и влияния России, её статус государства высоких технологий. Космическая деятельность относится к государственным приоритетам, определяющим инновационные пути развития страны. Как отмечено в «Основах политики Российской Федерации в области космической деятельности...», первоочередной задачей использования космических средств является создание информационных полей, обеспечивающих непрерывную связь; радио- и телевидение; навигацию; оперативное получение данных наблюдения из космоса земной поверхности и атмосферы; обеспечение потребителей услугами связи, координатно-временными данными, информацией наблюдения, контроля и управления; повышение эффективности, достижение глобальности и непрерывности стратегического информационного обеспечения.

Выполнение такой масштабной задачи предполагает, в частности, дальнейшее ускоренное увеличение орбитального сегмента. Решение данной проблемы должно иметь комплексный характер и включать в себя наращивание потенциала космической промышленности и пропускной способности отечественных космодромов, в том числе, форсированное создание космодрома «Восточный», улучшение организационно-технических мероприятий процесса развертывания и наращивания орбитальных систем космических аппаратов (КА) на основе более совершенных

теоретических методов, в максимальной степени учитывающих реальные условия современного этапа развития космической отрасли и объёмы инвестирования в неё [1, 2]. Одним из путей повышения эффективности космических систем является комплексное, взаимоувязанное рассмотрение разноплановых задач развития различных сторон процесса проектирования, создания средств выведения, космических аппаратов и их орбитальных систем, улучшения функционирования наземной космической инфраструктуры, совершенствования системы поставок ракетно-космической техники на космодромы, собственно обеспечение пусков ракет-носителей (РН) и выведения КА на заданные орбиты в условиях финансовых, технических, экологических ограничений как единого процесса управления сложной организационно-технической системой с целью обеспечения требуемых показателей её эффективности [3, 4].

Основные понятия и их формализация

Представляется целесообразным характеризовать вектор управления такой системой (в широком смысле) понятием «стратегия развертывания, наращивания и восполнения орбитальной системы», включающим результаты решения взаимосвязанных оптимизационных и расчётных задач, а именно:

– задачи обоснования тактико-техничко-экономических требований к перспективным комплексам наземной космической инфраструктуры, космическим аппаратам и средствам выведения;

– задачи обоснования количественного состава и орбитального построения (баллистической структуры) спутниковой системы определённого целевого назначения;

– задачи выбора состава средств выведения (РН, разгонных блоков, в перспективе – космических буксиров и межорбитальной транспортной системы), потребных для развертывания (наращивания, восполнения) орбитальной системы;

– задачи планирования пусков ракет-носителей с учётом затрат на выполнение экологических мероприятий по компенсации вредного воздействия отделяющихся частей (ОЧ) на экологию в районах падения;

– задачи логистического обеспечения с целью совершенствования системы поставок на космодромы ракетно-космической техники, оборудования и иных грузов;

– задачи оптимизации экономических ресурсов наземной космической инфраструктуры, необходимых для реализации программы развертывания орбитальной системы космических аппаратов, а также для создания территориального кластера перспективного космодрома «Восточный».

Ниже рассмотрены отдельные аспекты рассматриваемой научной проблемы.

Под стратегией развёртывания, наращивания и восполнения орбитальной системы понимается вектор $W = \{S, V, L, Z, T, \Delta_{ПЗ}, I\}$, включающий в свой состав:

– совокупность космических аппаратов определённого целевого назначения с упорядоченной баллистической структурой $S = \{N, X\}$ орбитальной системы;

– вариант развертывания системы – совокупность $V(S) = \bigcup_{l=1}^p V_l(S)$ ракет-носителей p типов (при необходимости оснащённых соответствующим разгонным блоком) по r_l $l = 1, \dots, p$, $\dim V_l = r_l$ каждого типа, способных вывести на заданные орбиты баллистической структуры $S = \{X, N\}$ системы по q_l космических аппаратов, причём должно быть выполнено условие

$$\sum_{l=1}^p r_l q_l \geq N;$$

– вектор $L = \{G_{отпр}, D_{дост}\}$, включающий результаты решения расчётной задачи логистиче-

ского обеспечения для организации поставок на космодромы ракетно-космической техники, оборудования и иных грузов требуемого объёма G со сроками прибытия $D_{дост}$ и отправления грузов $D_{отпр}$;

– последовательность $Z_{\langle N \rangle} = [1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_N]^T$

заполнения ячеек баллистической структуры спутниками и совокупность моментов пусков ракет-носителей

$$T \langle N \rangle = [t_{\text{пуск } 1, 1}, t_{\text{пуск } 2, 2}, \dots, t_{\text{пуск } i, n_i}, \dots, t_{\text{пуск } N, n_N}]$$

(поскольку первый КА является базовым, то обычно полагают $n_1 \equiv 1$),

– $\Delta_{ПЗ}$ – вектор дополнительных требований к полётному заданию для каждой ракеты-носителя в рамках реализации выбранной стратегии развертывания орбитальной системы, обусловленных необходимостью определённых отклонений от штатной траектории выведения с целью минимизации экологического ущерба для районов падения отделяемых частей и (или) для расширения возможностей средств выведения по изменению наклона плоскости орбиты КА;

– вектор I инвестиционных затрат, необходимых для реализации выбранной стратегии развертывания спутниковой системы с учётом расходов на развитие наземной космической инфраструктуры и восстановление требуемой экологической обстановки.

Постановка комплексной задачи развертывания и восполнения орбитальной группировки космических аппаратов

Принятие управленческих решений в сложных ситуациях требует тщательного анализа всех факторов и представляет собой многошаговый процесс, состоящий из последовательности взаимосвязанных этапов. Оптимизация стратегии развертывания орбитальных систем требует рассмотрения широкого спектра исходных данных и математических моделей, описывающих условия и особенности эксплуатации и применения объектов ракетно-космической техники. К их числу можно отнести:

– блок исходных данных назначения и целевых показателей орбитальной системы КА

$$B_{OC} = \{\Omega_{\text{тип } OC}, \Omega_{\text{цел. показ.}}\}; \quad (1)$$

при этом минимизируемая целевая функция Y представляет собой свертку целевых показателей системы $\Omega_{\text{цел. показ.}}$, вид которой определяется особенностями развертываемой орбитальной системы;

– блок исходных данных (ИД) для каждого типа РН, разгонных блоков (РБ), космических аппаратов (массогабаритные характеристики КА, грузоподъемность средств выведения, параметры участков выведения для всех типов ракет-носителей, координаты районов падения ОЧ и т. п.)

$$B_{\text{РН, КА, РБ}} = \{X_{\text{<РН, КА, РБ> техн. ИД}, C_{\text{<РН, КА, РБ> эконом. ИД}, Y_{\text{<РН, КА, РБ> огран}}\}; \quad (2)$$

– блок математических моделей (ММ) полёта РН, РБ, КА, ОЧ в процессе развертывания ОС

$$B_{\text{ММ}} = \{B_{\text{ММ РН}}, B_{\text{ММ РБ}}, B_{\text{ММ КА}}, B_{\text{ММ ОЧ}}\}; \quad (3)$$

– блок исходных данных экономических условий (темпы роста валового внутреннего продукта и производства в отраслях оборонной промышленности, инфляционные и доходные ожидания, налоговые и банковские ставки, параметры рынка труда и т. п.)

$$B_{\text{эконом.}}; \quad (4)$$

– блок исходных данных технико-экономических требований заинтересованных инвесторов (параметры рыночной конкурентоспособности космической продукции и услуг, параметры доходности и окупаемости инвестиционных проектов, показатели риска инновационных проектов, показатели кредитоспособности, платежеспособности и бюджетоемкости клиентской базы и т. п.)

$$B_{\text{ТЭТ}} = \{X_{\text{техн. треб.}}, C_{\text{эконом. треб.}}, B_{\text{бюджет. возможн}}\}; \quad (5)$$

– блок проектно-баллистических и эксплуатационных параметров наземной космической инфраструктуры (НКИ) (количество и предназначение стартовых комплексов, их координаты, длительность предстартовой подготовки РН и КА, длительность восстановления стартовых комплексов после проведения очередного пуска и т. п.)

$$B_{\text{НКИ}}; \quad (6)$$

– блок исходных данных экологических требований (нормативы по физическим, химическим, биологическим показателям состояния окружающей среды, нормативы по арендным и штрафным платежам в отведённых районах падения ОЧ, нормативы затрат на восстановление экологической обстановки и т. п.)

$$B_{\text{эколог.}}; \quad (7)$$

– блок исходных данных системы поставок ракетно-космической техники и иных грузов на космодромы для задачи логистического обеспечения (начальные, промежуточные и конечная станции, статистические данные о периодах прохождения отдельных участков маршрута, основные факторы, влияющие на процесс доставки и т. п.)

$$B_{\text{логист.}}; \quad (8)$$

Представленная совокупность исходных данных и математических моделей лежит в основе принятия управленческого решения. Цель, которая преследуется при выборе альтернативы, должна быть направлена на достижение более общей или глобальной цели управления, которая понимается как обеспечение максимальной или требуемой эффективности функционирования орбитальных группировок. Однако достижение этой общей цели может потребовать принятия многих решений, каждое из которых представляет самостоятельную подпроблему, для решения которой необходимо сформулировать соответствующую подцель. Тогда общая цель управления распадается на несколько промежуточных подцелей. Каждая подпроблема, в свою очередь, также может иметь несколько причин. В связи с этим соответствующие подцели разделяются на ещё более конкретные и частные цели, достижение которых решает «вышестоящую» проблему. В результате образуется своеобразное «дерево целей», а исходная задача оптимизации управления сложной организационно-технической системой естественным образом декомпозируется на ряд частных задач. Ниже представлена постановка исходной общей задачи выбора стратегии развёртывания, наращивания и восполнения орбитальных систем космических аппаратов с позиций комплексной оптимизации управления организационно-технической системой [3, 4].

В условиях (1) – (8) требуется найти оптимальную стратегию $W^* = \{S^*, V^*, L^*, Z^*, T^*, \Delta_{ПЗ}^*, I^*\}$ развертывания, наращивания и восполнения орбитальной системы, обеспечивающую минимум целевой функции:

$$W^* = \{S^*, V^*, L^*, Z^*, T^*, \Delta_{ПЗ}^*, I^*\} = \arg \min_{W \in \Delta_W \text{ доп}} Y(W),$$

где $\Delta_W \text{ доп}$ – множество допустимых стратегий развертывания орбитальной системы КА.

Методика решения задачи

Решение представленной общей задачи выбора стратегии развертывания орбитальных систем КА базируется на рассмотрении нескольких частных подзадач [5 – 10]:

- обоснования баллистической структуры спутниковой системы;

- выбора состава средств выведения, обеспечивающих реализацию требуемого орбитального построения системы;

- планирования запусков КА для развертывания орбитальной системы с учётом затрат на выполнение экологических мероприятий по компенсации вредного воздействия отделяемых частей на экологию в районах падения;

- логистического планирования поставок ракетно-космической техники, оборудования и иных грузов, обеспечивающих гарантированное выполнение требуемых сроков в условиях большой неопределенности из-за удалённости космодромов.

Следует подчеркнуть, что решение исходной задачи синтеза управления организационно-технической системой не сводится к механистическому рассмотрению указанных подзадач, поскольку результаты решения каждой из них тесно взаимосвязаны друг с другом. В связи с этим поиск искомой стратегии развертывания орбитальной системы состоит в многократном, итерационном рассмотрении указанных подзадач. В свою очередь, решение каждой из перечисленных частных задач представляет определенную сложность: эти задачи относятся к разным разделам математики и зачастую требуют разработки новых, уникальных методов решения. Например рассмотренная ниже задача обоснования баллистической структуры и соответствующего ей варианта развертывания системы требует для своего решения использования или разработки ме-

тодов теории полёта, комбинаторной и аналитической геометрии, теории расписаний и других разделов математики, а также экономического анализа. Математическая постановка данной задачи состоит в следующем.

Пусть известна стоимость изготовления первого серийного космического аппарата $C_{КА}^1$ и стоимость изготовления первого серийного образца $C_{РН}^1$ ракеты-носителя l -го типа, $l = 1, \dots, p$, а стоимость последующих КА и РН в зависимости от их номеров k и j определяются зависимостями [10]:

$$C_{КА}^k = C_{КА}^1 k^{-\alpha_1}, \alpha_1 = \text{const}, k = 1, 2, \dots$$

$$C_{РН}^j = C_{РН}^1 j^{-\alpha_2}, \alpha_2 = \text{const}, j = 1, 2, \dots$$

Стоимость подготовки $C_{РН}^{\text{пуск}}$ одной РН l -го типа к запуску и усреднённая стоимость эксплуатации $C_{КА}^1 \text{ экпл}$ одного спутника в течение срока его эксплуатации для всех КА и ракет каждого l -го типа постоянны и не зависят от серийного номера изделия.

Качество функционирования зависит от количества N КА в системе, его орбитального построения S , варианта развертывания $V(N)$ и характеризуется некоторым показателем – целевой функцией $Y(S(N), V(N))$, значение которой должно быть минимальным.

Требуется определить количество спутников N^* в космической системе, её баллистическую структуру $S^* = \{X^*, N^*\}$ и вариант развертывания V^* , чтобы при заданном уровне $C_{\text{зад}}$ суммарных затрат $C_{\text{сист}}(S(N), V(N))$ на создание, развертывание и эксплуатацию системы КА военного назначения уровень качества функционирования системы был бы наибольшим:

$$\{N^*, S^*, V^*\} = \arg \min_{S(N), V(N)} Y(S(N), V(N)) \mid C_{\text{сист}}(S(N), V(N)) \leq C_{\text{зад}},$$

где

$$C_{\text{сист}}(S(N), V(N)) = C_{\text{РНизгот}}(S(N), V(N)) + C_{\text{РНпуск}}(S(N), V(N)) + C_{\text{КАизгот}}(S(N), V(N)) + C_{\text{КАэкпл}}(S(N), V(N));$$

$C_{РН\text{ изготвл}}$ – стоимость изготовления всех ракет-носителей, предполагаемых к использованию при развертывании системы:

$$C_{РН\text{ изготвл}} = \sum_{l=1}^p r_l^{(S(N), V(N))} \sum_{j=1} C_{РНl}^j(S(N), V(N));$$

$$C_{РНl}^j(S(N), V(N)) = C_{РНl}^1(S(N), V(N)) j^{-\alpha_2};$$

$C_{РН\text{ пуск}}$ – стоимость подготовки ракет-носителей к пуску:

$$C_{РН\text{ пуск}}(S(N), V(N)) = \sum_{l=1}^p r_l(S(N), V(N)) C_{РНl}^{\text{пуск}};$$

$C_{РНl}^{\text{пуск}}$ – стоимость подготовки одной ракеты-носителя l -го типа к пуску; r_l – количество РН l -го типа, необходимых для ввода системы в эксплуатацию согласно баллистической структуре S и варианту развертывания V ; $C_{КА\text{ изготвл}}$ – суммарная стоимость изготовления космических аппаратов, определяемая соотношением:

$$C_{КА\text{ изготвл}} = \sum_{k=1}^N C_{КА}^k = \sum_{k=1}^N C_{КА}^1 k^{-\alpha_1};$$

$C_{КА\text{ экспл}}$ – стоимость эксплуатационных расходов на обслуживание космической системы (здесь имеется в виду, что помимо традиционных расходов в эту сумму включаются и возможные затраты на проведение коррекций параметров орбит спутников):

$$C_{КА\text{ экспл}}(S(N), V(N)) \approx N C_{КА\text{ экспл}}^1.$$

Особенность этой задачи состоит в комплексном рассмотрении вопросов оптимизации баллистической структуры спутниковой системы и обоснования потребного состава средств выведения и последовательности её развертывания. Целью решения этой двуединой задачи является обеспечение максимальных показателей качества функционирования системы КА при заданном уровне затрат на

создание, развертывание и эксплуатацию системы.

Заключение

Применение предложенного подхода к обоснованию стратегии развертывания, наращивания и восполнения орбитальных систем космических аппаратов на основе комплексной оптимизации управления организационно-технической системой с учётом возможностей финансовых инвестиций, особенностей логистического обеспечения и экологических последствий пусков ракет-носителей позволяет наиболее полно учесть все возможные ограничения, рассчитывать программы, гибко реагирующие на изменения обстановки, добиться более полного, по сравнению с существующими технико-баллистическими методами, сочетания разноплановых целей, поставленных перед разработчиками перспективных программ совершенствования космических систем.

Литература

1. Арсеньев В. Н., Фадеев А. С. Практические задачи логистического обеспечения строительства и эксплуатации космодрома «Восточный» / В. Н. Арсеньев, А. С. Фадеев. – М. : РЕСТАРТ, 2012. – 120 с.
2. Методы военно-экономических исследований перспектив развития космических средств / под ред. Е. В. Рыжова – М. : Машиностроение, 1998 – 152 с.
3. Моисеев Н. Н. Элементы теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. – М. : Наука, 1975. – 528 с.
4. Резников Б. А. Системный анализ и методы системотехники / Б. А. Резников. – СПб. : Издательство МО СССР, 1990. – 522 с.
5. Баринов К. Н., Бурдаев М. Н., Мамон П. А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов / К. Н. Баринов, М. Н. Бурдаев, П. А. Мамон. – М. : Машиностроение, 1975. – 232 с.
6. Можаяев Г. В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем / Г. В. Можаяев. – М. : Машиностроение, 1989. – 303 с.
7. Лебедев А. А., Нестеренко О. П. Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование / А. А. Лебедев, О. П. Нестеренко. – М. : Машиностроение, 1991. – 224 с.
8. Горбулин В. И. Новый способ оптимизации орбитального построения глобальных спутниковых систем / В. И. Горбулин // Полёт № 12. – 2001. –

С. 20 – 26.

9. Горбулин В. И. Оптимизация развертывания космических систем / В. И. Горбулин. – СПб.: Издательство МО РФ, 2003. – 171 с.

10. Радионов Н. В., Радионова С. П., Фадеев А. С. Модели выбора в задачах инвестиционного проектирования / Н. В. Радионов, С. П. Радионова, А. С. Фадеев. – М.: РЕСТАРТ, 2012. – 192 с.

Поступила в редакцию 26.07.2012

***Владимир Иванович Горбулин**, д-р техн. наук, т. (812) 347-95-22,
e-mail: V_Gorbulin@mail.ru.*

***Роман Александрович Евдокимов**, канд. техн. наук, начальник сектора,
т. (495) 513-72-48, e-mail: post@rsce.ru.*

***Александр Сергеевич Фадеев**, канд. техн. наук, генеральный директор,
т. (495) 631-82-89, e-mail: tsenki@roscosmos.ru.*