

КОМПЛЕКСНЫЕ ПРОГНОЗНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И МОДИФИКАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В. А. Ламзин

Рассматривается задача комплексной оптимизации параметров космической системы дистанционного зондирования Земли и космических аппаратов при модернизации системы в рассматриваемый период. Задача является компромиссной и многокритериальной. Кроме оценки технико-экономических характеристик, учитываются показатели функциональной эффективности, наличие ограничений. Приводится постановка задачи, при этом используется укрупненная структура космической системы, состоящая из космического и наземного сегментов. В качестве объекта космического сегмента выступает базовый космический аппарат и его модификации. Предполагается, что при реализации программы модернизации космической системы дистанционного зондирования Земли, наряду с базовым объектом, вводятся в эксплуатацию модификации космических аппаратов. При формировании исходных данных использовались известные показатели прототипов. Приведена методика, которая включает поэтапное решение двух основных задач – оптимизации программы модернизации и параметров модификации космических аппаратов в составе системы. Вектор варьируемых параметров включает количество модификаций космических аппаратов, сроки ввода их в эксплуатацию, параметры модификации космического аппарата, причем параметры базового аппарата известны. Критерий поиска решения задачи – суммарные приведенные затраты на реализацию программы модернизации космической системы дистанционного зондирования Земли. Результатом решения задачи является рациональная программа модернизации в рассматриваемый период и технико-экономические характеристики модификаций космического аппарата и системы. Решение задачи позволит обоснованно подходить к определению рациональных характеристик техники и технологии космических средств дистанционного зондирования Земли, целенаправленно вести работу по развитию технологической базы производства и представляет не только научный, но и практический интерес. Полученные на модельных примерах оценки технико-экономических характеристик модификаций космических аппаратов могут быть использованы для детального анализа эффективности перспективных космических систем дистанционного зондирования Земли с целью прогнозирования их развития и расширения области применения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космическая система, космический аппарат, модернизация, модификация, программа модернизации, комплексная оптимизация, технико-экономическая эффективность.

Введение

Приемы и методы технико-экономического анализа использовались ранее в основном для определения экономических показателей перспективных разработок как одного из факторов, который учитывался при принятии решений. В дальнейшем проблема поиска рациональных проектных решений стала формулироваться как комплексная технико-экономическая. На современном этапе развития ракетно-космической техники (РКТ) и космических технологий при определении путей повышения их эффективности широко используются методы комплексного технико-экономического анализа. Методы подобного анализа перспективной техники непрерывно совершенствуются, что связано, прежде всего, с новыми направлениями ее технического и технологического развития, с изменением задач технико-экономических исследований.

Кроме того, как показано в [1, 2], разработка таких объектов РКТ, как космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), связана с большими затратами. Это усложняет принятие проектных решений, так как ошибка при проектировании может привести к огромным материальным потерям и другим негативным моментам.

Следует отметить два основных направления по обеспечению эффективности разработки и эксплу-

атации КС ДЗЗ. Первое направление связано с поиском неизменяемых по существу решений (технических и технологических), обладающих в силу заложенных свойств возможностью быть использованными при широком спектре условий применения. При появлении новых целевых задач, повышении требований к качеству информационного обеспечения возникает проблема модернизации КС ДЗЗ – внесение изменений (доработки) в базовую систему. Второе направление предполагает повышение технико-экономической эффективности КС ДЗЗ при новых условиях использования за счет возможности проведения ее доработки (модернизации) в процессе эксплуатации. Как показано в [1 – 5], проведение модернизации КС ДЗЗ и создание модификаций КА дают возможность рационально использовать научно-технический задел, продлить сроки эксплуатации, причем второе направление в настоящее время имеет наибольшую значимость.

В статье при проведении комплексных прогнозных исследований параметров КС ДЗЗ и космического аппарата (КА) рассматривается задача комплексной оптимизации параметров системы и КА при модернизации системы в рассматриваемый период с учетом развития техники. Проектные исследования связаны с решением вопросов оптимизации программы модернизации КС ДЗЗ, включая определение

типов и сроков создания модификаций КА, оценкой основных технико-экономических характеристик КА и системы в целом. Решение такой задачи представляет научный и практический интерес. Особенностью проектных исследований является необходимость учета в рассматриваемый период изменений проектно-конструкторских решений подсистем (например, модификаций КА, целевой аппаратуры и бортовых систем аппарата), а также динамики функциональных связей. В таком случае вопросы модернизации КС ДЗЗ и создания модификаций КА взаимосвязаны и взаимообусловлены.

Постановка задачи

Состав исследуемой КС ДЗЗ представляется в виде комплекса основных подсистем: космического и наземного сегментов. В состав космического (орбитального) сегмента входят базовый и модификации КА. Каждый КА включает модуль целевой аппаратуры (МЦА) и модуль служебных систем (МСП). Модуль МЦА состоит из целевой съёмочной системы, системы сбора и передачи информации, системы терморегулирования и конструкции. Наземный сегмент включает ракетно-космический комплекс из состава которого выведен КА, наземный комплекс управления и наземный комплекс приема, обработки и распространения информации.

При постановке задачи предполагается, что параметры наземного сегмента заданы и имеется прогноз изменения значений целевой нагрузки $\Psi(t)$ КС ДЗЗ при модернизации в рассматриваемый период времени $\Pi_{\text{КС}}^{\text{М}}(\cdot)$.

Используя опыт постановки проектно-конструкторских задач, сформулируем основную задачу комплексной оптимизации (оценки) технико-экономических характеристик КС ДЗЗ и КА при модернизации системы в рассматриваемый период с учетом развития техники: при заданных параметрах наземного сегмента, целевой нагрузке определить характеристики подсистем космического сегмента (модификации КА) и рациональную программу модернизации системы с тем, чтобы обеспечить выполнение целевой задачи с эффективностью не ниже заданного уровня и снизить до минимума суммарные затраты на модернизацию КС ДЗЗ в рассматриваемый период.

Анализ показывает, что рациональным подходом к поиску эффективного решения основной задачи является реализация метода многоуровневой согласованной оптимизации [1]. В основе метода схема двухуровневого управления разработкой, двухуровневая модель проектных исследований и

статистический метод согласованного оптимизационного поиска. Проектные исследования охватывают верхний и нижний уровни управления разработкой. На верхнем уровне управления разработкой КС рассматривается как объект, включающий орбитальную группировку КА. На нижнем уровне – КА рассматривается как объект, включающий МЦА и МСП. Алгоритм решения основной задачи включает последовательное решение следующих задач: оптимизации (оценки) параметров и программы модернизации системы; оптимизации (оценки) параметров космического аппарата; согласованной оптимизации (оценки) параметров системы. Ниже приведены постановки выделенных задач и алгоритмы их решения.

Задача оптимизации (оценки) параметров и программы модернизации системы

Формально математическая постановка задачи оптимизации (оценки) параметров и программы модернизации системы представляется в виде:

$$C_{\Sigma_{\text{КС}}}^{\text{М}}(\Pi_{\text{КА}}^{\text{М}}(\cdot), \Pi_{\text{КА}}^{\text{Б}}(\cdot), PR^{\text{М}}(t), \beta(t_i)) \rightarrow \min_{\Pi_{\text{КА}}^{\text{М}}(\cdot), PR^{\text{М}}(t) \in G_{\text{КС}}^{\text{М}}(\cdot)} ; \quad (1)$$

$$I_{\text{ПРКС}}^{\text{М}}(\Pi_{\text{КС}}^{\text{М}}(\cdot), \Pi_{\text{НС}}(\cdot), \Psi^{\text{М}}(t_i)) \geq I_{\text{ПРКС}}^{\text{МТ}} ;$$

$$W_{\text{КС}}^{\text{М}}(I_{\text{ПРКС}}^{\text{М}}, \dots) \geq W_{\text{КС}}^{\text{МТ}} ; P_{\text{КС}}^{\text{М}}(\cdot) \geq P_{\text{КС}}^{\text{МТ}} ;$$

$$M_{\text{КА}}^{\text{М}}(\cdot) \leq M_{\text{КА}}^{\text{МТ}} ;$$

$$\Psi^{\text{М}}(t_i) = \Psi^{\text{М}}(t_i)^{\text{T}} ; \Pi_{\text{НС}}(\cdot) = \Pi_{\text{НС}}(\cdot)^{\text{T}} ;$$

$$\Pi_{\text{КА}}^{\text{Б}}(\cdot) = \Pi_{\text{КА}}^{\text{Б}}(\cdot)^{\text{T}} ;$$

$$t_i \in \langle T^{\text{М}} \rangle ; \langle T^{\text{М}} \rangle > \langle T \rangle ,$$

где $C_{\Sigma_{\text{КС}}}^{\text{М}}(\cdot)$ – функция, определяющая суммарные затраты на модернизацию КС ДЗЗ; $\Pi_{\text{КС}}^{\text{М}}(\cdot)$ – функция, определяющая состав замены подсистем и параметры заменяемых подсистем; $PR^{\text{М}}(t)$ – функция, определяющая программу модернизации (тип, число и сроки замены КА при восстановлении или развитии (модернизации) системы); $W_{\text{КС}}^{\text{М}}(\cdot)$, $I_{\text{ПРКС}}^{\text{М}}(\cdot)$ и $P_{\text{КС}}^{\text{М}}(\cdot)$ – соответственно функции целевой эффективности, информационной производительности и надежности КС ДЗЗ при модернизации системы; $\beta(t_i)$ – вектор определяющих параметров при модернизации системы к моменту времени t_i ; $M_{\text{КА}}^{\text{М}}(\cdot)$ – масса модификации КА; $\Psi^{\text{М}}(t_i)$ – требования к целевой информации при модернизации системы к моменту времени t_i ; $\Pi_{\text{НС}}(\cdot)$ – функция, определяющая параметры наземного

сегмента; $\Pi_{КА}^B(\cdot)$ – функция, определяющая параметры базовых подсистем; $G_{КС}^M(\cdot)$ – область допустимых решений параметров системы; $\langle T^M \rangle$ – временной интервал модернизации системы; $\langle T \rangle$ – временной интервал существования базовой системы; t_i – момент времени начала модернизации системы; индекс «т» – требуемое значение.

Вектор варьируемых параметров включает параметры подсистем КС ДЗЗ. Параметры базового объекта известны. Критерий поиска решения задачи (1) – суммарные затраты на реализацию программы модернизации КС ДЗЗ. При оптимизации определяется рациональная программа модернизации проекта КС ДЗЗ. На рис. 1 приведена блок-схема алгоритма решения задачи оптимизации (оценки) параметров и программы модернизации системы.

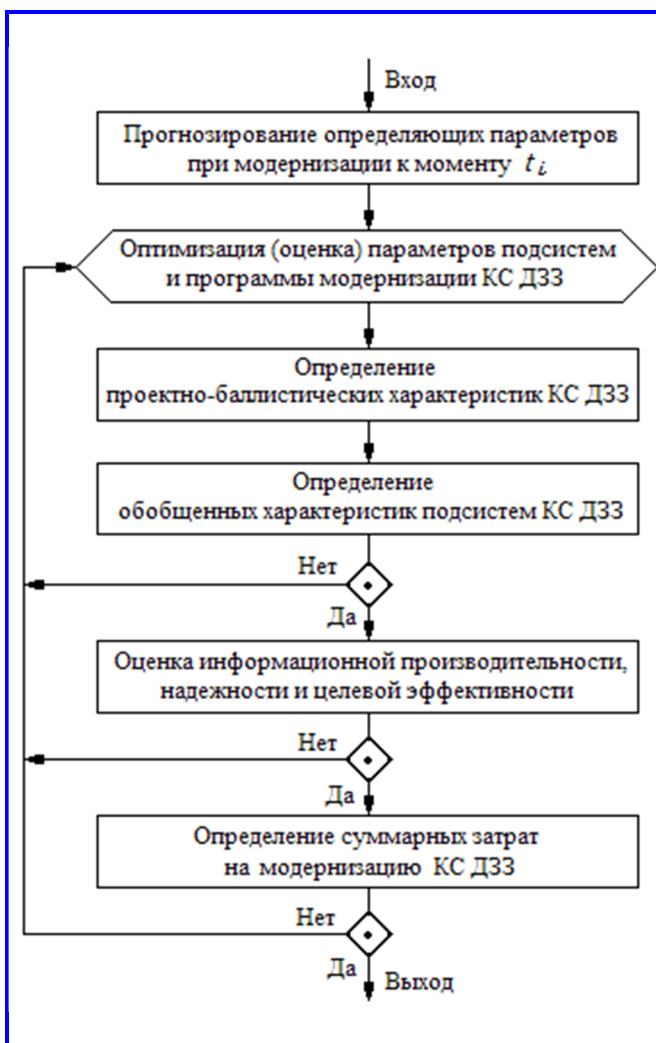


Рис. 1. Блок-схема алгоритма решения задачи оптимизации (оценки) параметров и программы модернизации системы

При поиске рационального решения задачи (1) используется ее параметрическая декомпозиция. Отдельно формируются варианты модификаций КА в составе КС ДЗЗ при модернизации в планируемый период и программа модернизации КС ДЗЗ – определяются сроки и состав модификаций КА.

Структура проектных моделей оценки параметров КС ДЗЗ и подсистем строится в соответствии с разработанным алгоритмом и включает модели прогнозирования определяющих параметров, определения проектно-баллистических характеристик системы, обобщенных характеристик подсистем, оценки информационной производительности, надежности и целевой эффективности, определения суммарных затрат на модернизацию КС ДЗЗ.

Задача оптимизации (оценки) параметров космического аппарата

Постановка задачи: при заданных параметрах наземного сегмента $\Pi_{НС}(\cdot)$, целевой нагрузке $\Psi(t_i)$ и программе модернизации системы $PR(t_i)$ к моменту времени t_i определить технико-экономические характеристики КА $\Pi_{КА}(\cdot)$ такие, чтобы при заданных ограничениях (эффективность, надежность и информационная производительность КА были не меньше, а массогабаритные характеристики аппарата не больше заданных) приведенные суммарные затраты средств на создание модификации КА ДЗЗ $C_{\Sigma КА}^M$ были минимальными.

В этом случае при реализации модульного принципа создания КА проводится детальный анализ каждой подсистемы (модулей МЦА и МСП) КА. Проектные исследования заключаются в поиске рациональных параметров модулей МЦА, МСП и КА в целом.

Формально математическая постановка задачи представляется в виде:

$$C_{\Sigma КА}^M(\Pi_{КА}^M(\cdot), \beta(t_i)) \rightarrow \min_{\Pi_{КА}^M(\cdot) \in G_{КА}^M(\cdot)} ; \quad (2)$$

$$\Pi_{НС}(\cdot) = \Pi_{НС}^T(\cdot); \quad \Psi(t_i) = \Psi^T(t_i);$$

$$PR^M(t_i) = PR^M(t_i)^T;$$

$$H_{КА} = H_{КА}^T; \quad i_{КА} = i_{КА}^T;$$

$$I_{ПР КА}^M(\Pi_{КА}^M(\cdot), \Psi^M(t_i)) \geq I_{ПР КА}^{M^T};$$

$$W_{КА}^M(I_{ПР КА}^M(\cdot), \dots) \geq W_{КА}^{M^T};$$

$$P_{КА}^M(\cdot) \geq P_{КА}^{M^T}; \quad M_{КА}^M(\cdot) \leq M_{КА}^{M^T}; \quad \Gamma_{КА}^M(\cdot) \leq \Gamma_{КА}^{M^T};$$

$$t_i \in \langle T^M \rangle; \quad \langle T^M \rangle > T,$$

где $C_{\Sigma \text{КА}}^M(\cdot)$ – суммарные затраты на создание модификации КА в составе КС ДЗЗ при модернизации (индекс M) к моменту времени t_i ; C_j^M – суммарные затраты на реализацию проекта создания j -й подсистемы (модуля) КА ($j = \bar{1}, \bar{m}, m = 2$); $\Pi_j^M(\cdot)$ – функция, определяющая состав и параметры заменяемых подсистем; $H_{\text{КА}}$ и $i_{\text{КА}}$ – соответственно высота и наклонение орбиты базового КА; $\Pi^M(t_i)$ – требования к целевой информации при модернизации КС ДЗЗ к моменту времени t_i ; $W_{\text{КА}}^M(\cdot)$ – целевая эффективность при модернизации КС ДЗЗ к моменту t_i ; $I_{\text{пр КА}}^M(\cdot)$ и $P_{\text{КА}}^M(\cdot)$ – соответственно производительность и надежность КС ДЗЗ; $M_{\text{КА}}^M(\cdot)$ и $\Gamma_{\text{КА}}^M(\cdot)$ – соответственно масса и габаритные размеры КА ДЗЗ; $\beta(t_i)$ – вектор определяющих параметров при модернизации системы к моменту времени t_i ; $\langle T^M \rangle$ и T – соответственно временной интервал модернизации системы и срок существования базовой системы; индекс «т» – заданные (требуемые) значения параметров или функций.

Функциональные и параметрические ограничения включают параметры орбиты, требуемое значение параметров целевой съемочной системы и надежности, ограничение на массу КА, требование к информационной производительности и области изменения параметров подсистем КА. При постановке задачи ряд функциональных и параметрических связей определяются при решении задачи (1). Надежность $P_{\text{КА}}^M(\cdot)$ КА определяется в виде

$$P_{\text{КА}}^M = \prod_{j=1}^m P_j(\cdot), \text{ где } P_j(\cdot) \text{ – надежность } j\text{-й подсистемы (МЦА и МСП).}$$

Задача (2) является многопараметрической и многокритериальной, для решения которой применяется метод ограничений решения многокритериальных задач. Кроме того, как показывает анализ, задача (2) является динамической и стохастической, так как включает определяющие параметры, значения которых прогнозируются к моменту времени t_i .

На рис. 2 показан алгоритм оптимизации параметров КА ДЗЗ. Блок оптимизации параметров подсистем КА реализует направленный перебор параметров подсистем при поиске их оптимального значения. В блоке оценки характеристик подсистем КА проводится расчет их основных параметров. В процессе поиска рационального решения

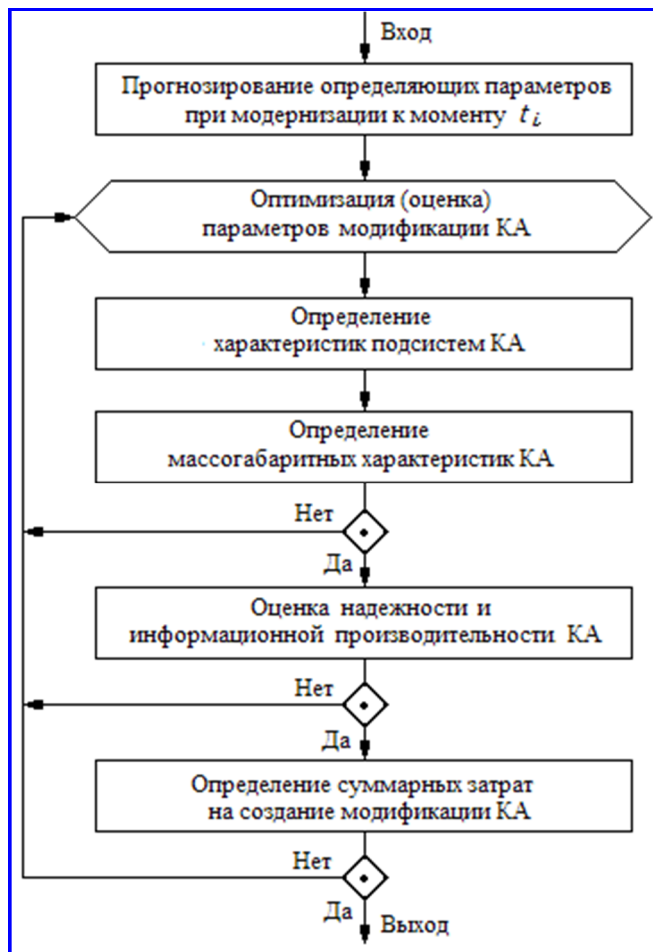


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оптимизации (оценки) параметров космического аппарата

(оптимальных параметров КА) проводится оценка обобщенных характеристик КА (габаритов, информационной производительности и надежности) и приведенных затрат на реализацию проекта создания КА. На каждом этапе итерационного поиска рациональных параметров проводится оценка выполнения соответствующих условий по информационной производительности и уровню надежности. Оптимальное решение удовлетворяет предъявляемым требованиям и обеспечивает минимальные затраты на проект КА ДЗЗ.

Задача согласованной оптимизации (оценки) параметров космической системы

При оптимизации (оценке) параметров КС ДЗЗ в случае использования двухуровневой модели проводится адаптация (уточнение) проектных зависимостей, определяющих характеристики системы на верхнем уровне (индекс «в») управления разработкой по данным проектных исследований подсистем (модификаций КА) на нижнем уровне

(индекс «н») управления разработкой. Постановка задачи двухуровневой согласованной оптимизации (оценки) параметров КС ДЗЗ представляется в виде: определить

$${}^B\Pi_{KA}^M(\cdot) \in {}^B G_{KC}(\cdot) \text{ и } {}^H\Pi_{KA}^M(\cdot) \in {}^H G_{KA}(\cdot)$$

такие, что

$$C_{\Sigma_{KC}}^M(\Pi_{KA}^M(\cdot), \Pi_{KA}^B(t_i), PR^M(t), \beta(t_i)) \rightarrow \min_{\Pi_{KA}^M(\cdot), PR^M(t) \in G_{KC}^M(\cdot)} ;$$

$${}^H C_{\Sigma_{KA}}^M(\Pi_{KA}^M(\cdot), \beta(t_i)) \rightarrow \min_{\Pi_{KA}^M(\cdot) \in G_{KA}^M(\cdot)} ;$$

$${}^B\beta(t_i) = A\left(\left\{{}^B\Pi_{KA}^M(\cdot), {}^H C_{KA}^M(\cdot)\right\}\right) \quad (3)$$

и выполняются условия

$$\left| {}^B C_{KA}^M({}^B\Pi_{KA}^M(\cdot), {}^B\beta(t_i)) - {}^H C_{KA}^M({}^H\Pi_{KA}^M(\cdot), {}^H\beta(t_i)) \right| \leq \Delta C^* ; \quad (4)$$

$$\left| {}^B C_{\Sigma_{KC}}^{M(k)}({}^B\Pi_{KA}^M(\cdot), {}^B\Pi_{KA}^B(t_i), {}^B PR^M(t), {}^B\beta(t_i)) - {}^B C_{\Sigma_{KC}}^{M(k-1)}({}^B\Pi_{KA}^M(\cdot), {}^B\Pi_{KA}^B(t_i), {}^B PR^M(t), {}^B\beta(t_i)) \right| \leq \Delta C^{**} . \quad (5)$$

Выражение (3) определяет направленную адаптацию вектора определяющих параметров $\beta(t_i)$ – коэффициентов проектных моделей, используемых при оценке характеристик модификации КА ($A(\cdot)$ – оператор адаптации); (4) – условие согласования решения задач на верхнем и нижнем уровнях; (5) – условие сходимости при реализации согласованного оптимизационного поиска на верхнем уровне; ΔC^* и ΔC^{**} – наперед заданные малые величины. Поиск решения задач проводится итерационным методом.

При детализации и проведении проектных исследований на всех уровнях управления разработкой формируются соответствующие проектные и технико-экономические модели.

Алгоритм решения рассматриваемых задач включает процедуры последовательного решения экстремальных задач верхнего и нижнего уровней управления разработкой, адаптации модели верхнего уровня – формирование аппроксимационных зависимостей модели М1 по данным статистических испытаний на модели М2 в области, определенной на предыдущем шаге. Блок-схема алгоритма двухуровневого согласованного оптимизационного поиска приведена на рис. 3.

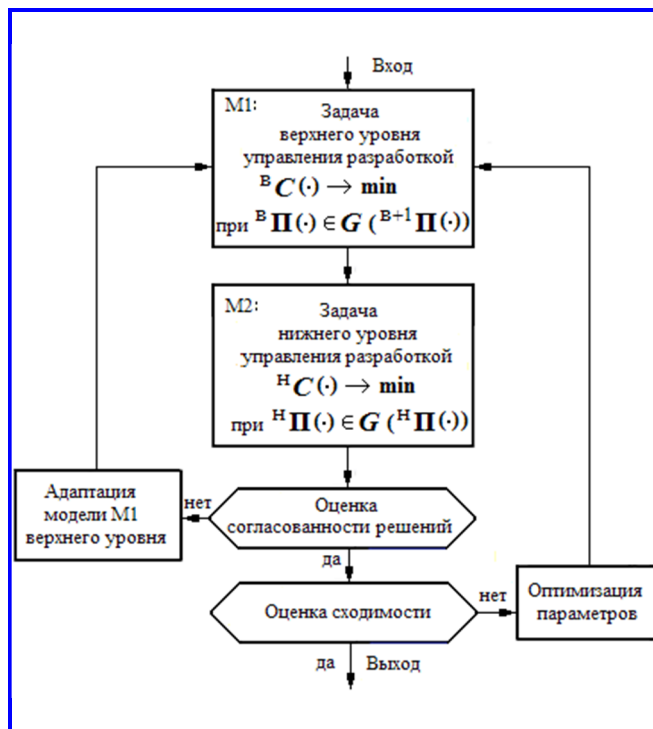


Рис. 3. Блок-схема алгоритма двухуровневого согласованного оптимизационного поиска

Ниже приведены результаты численных исследований при решении задачи комплексной оптимизации (оценки) технико-экономических характеристик КС ДЗЗ и КА при модернизации системы в рассматриваемый период времени, а также оценки влияния характеристик модификаций КА на суммарные приведенные затраты, требуемые на реализацию программы модернизации.

Результаты исследований

Проведение модернизации КС ДЗЗ в рассматриваемый период времени обусловлено необходимостью решать новые задачи. В статье рассматривается модельный пример в предположении, что КС ДЗЗ при модернизации в рассматриваемый период времени способна решать ряд новых задач: создания и обновления топографических карт масштабов до 1:2000, создания цифровых моделей рельефа местности высокой точности, инженерных изысканий объектов инфраструктуры и др.

Предварительный анализ показал, что для решения новых задач требуется вывести на орбиту функционирования дополнительные КА ДЗЗ с оптико-электронной целевой съемочной аппаратурой (ЦСА) – модификации базового аппарата. Предполагается, что характеристики базового КА известны и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики базового космического аппарата

Разрешение (проекция пикселя), м	0,87
Высота солнечно-синхронной орбиты, км	800
Масса, кг	350
Полоса захвата ЦСА, км	14,2
Диаметр апертуры ЦСА, м	0,5
Фокусное расстояние ЦСА, м	4
Размер пикселя фотоприемного устройства, мкм	8
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	8
Скорость передачи информации, Мбит/с	280
Суммарные затраты на КА, млн усл. ед.	50

Для решения новых целевых задач значительно повышены требования к характеристикам эффективности КС ДЗЗ: разрешающей способности ЦСА R и периодичности наблюдения системы T_H в три раза ($R \approx 0,3$ м, $T_H \leq 1$ суток), информационной производительности выше на порядок, количеству спектральных каналов в десятки раз. Целевые задачи решаются комплексно с применением данных от ЦСА базового КА и его модификаций. Срок активного существования принимается равным как для базового КА, так и для модификаций КА, 5 лет.

Предварительный анализ показал, что для решения новых задач на модификациях КА предпочтительнее применение комбинированного варианта ЦСА со сверхвысоким значением разрешающей способности. Комбинированная целевая съемочная аппаратура конструктивно имеет единый объектив и передает изображения подстилающей поверхности Земли в панхроматическом (П) и многозональном (М) диапазонах.

Формально математическая постановка задачи исследования представляется в виде:

$$\begin{aligned}
 C_{\Sigma_{KC}}^M(\cdot) &= C_{\Sigma}^B(\Pi^B(\cdot))\eta(t_B) + \\
 &+ \sum_{i=1}^n \left[C_{\Sigma_{KA_i}}^M(\Pi_{KA_i}^M(\cdot), PR^M(t), \beta_{Mi}(t)) \right] \eta(t_i) + \\
 &+ \sum_{i=1}^n C_{HC_i}(\cdot)\eta(t_i) \rightarrow \min_{\Pi_{KA_i}^M(\cdot), PR^M(t) \in G_{KC}^M(\cdot)} ; \quad (6) \\
 W_{KC}^M(\Pi^B(\cdot), \Pi_{KA_i}^M(\cdot) PR^M(t), \Psi(t)) &\geq W_{KC}^{M^T} ; \\
 P_{KA_i}(\cdot) &\geq P_{KA_i}^T ; M_{KA_i}^M(\cdot) \leq M_{KA_i}^T ; \\
 PR^M(t) &= (n, t, \Pi_{KA_i}^M(\cdot), T_{CAC_i}(P_{KA_i})) ; \\
 T_{CAC_i}(P_{KA_i}(\cdot)) &= T_{CAC_i}^T ;
 \end{aligned}$$

$$\Psi(t) = \Psi(t)^T; \Pi^B(\cdot) = \Pi^{B^T}; T^M = T^T,$$

где $C_{\Sigma_{KC}}^M(\cdot)$ – суммарные приведенные затраты на реализацию программы модернизации КС ДЗЗ в период времени T^M ; $C_{\Sigma}^B(\Pi^B(\cdot))$ – затраты на разработку и создание базовой системы; $C_{\Sigma_{KA_i}}^M$ – суммарные затраты на разработку и создание i -й модификации КА ДЗЗ; $PR^M(t)$ – программа модернизации КС ДЗЗ; $\beta_{Mi}(t)$ – вектор обобщенных параметров i -й модификации КА к моменту времени модернизации системы; t – срок проведения модернизации (определяется программой $PR^M(t)$); n – количество модернизаций в планируемый период; $C_{HC_i}(\cdot)$ – затраты на эксплуатацию i -й модификации КА ДЗЗ; $\eta(t_B)$ и $\eta(t_i)$ – коэффициенты приведения затрат к окончанию момента времени T^M ; $W_{KC}^M(\cdot)$ – функция изменения эффективности КС ДЗЗ при модернизации в рассматриваемый момент времени; $\Psi(t)$ – целевая нагрузка на систему; $M_{KA_i}^M(\cdot)$ – масса i -й модификации КА ДЗЗ; $\Pi^B(\cdot)$ – параметры базовой КС ДЗЗ ($\Pi^B(\cdot) = (\Pi_{KA}^B, \Pi_{HC}^B)$); T^M – период времени существования КС ДЗЗ при реализации программы модернизации; $PR^M(t)$ – программа модернизации системы; $\Pi_{KA_i}^M(\cdot)$ – параметры i -й модификации КА ДЗЗ; $T_{CAC_i}(P_{KA_i})$ – срок активного существования i -й модификации КА ДЗЗ; P_{KA_i} – надежность i -й модификации КА ДЗЗ; T^M – временной интервал модернизации системы; индекс «т» – заданные (требуемые) значения параметров или функций.

При поиске рационального решения задачи (6) используется параметрическая декомпозиция. Реализуется методика расчлененной оптимизации (метод обобщенного покоординатного спуска). Отдельно формируются варианты модификаций КА в составе КС ДЗЗ при модернизации в рассматриваемый период времени. Затем проводится оптимизация программы модернизации $PR^M(t)$ – определяются рациональные сроки проведения модернизации и состав модификаций КА с целью получения минимального значения суммарных приведенных затрат на создание и эксплуатацию системы в рассматриваемый период времени.

Ниже приведены результаты численных исследований при решении задачи комплексной оптимизации параметров КА и КС ДЗЗ с учетом развития (модернизации) системы в рассматриваемый период времени 12 лет. При решении задачи использовались проектные модели и характеристики КС и

Таблица 2

**Основные характеристики базового
космического аппарата и его модификаций**

Характеристика	КА (базовый)	Модификации КА	
		№ 1	№ 2
Разрешение (проекция пикселя), м	0,87	0,325 (1,075)	0,3 (0,95)
Высота солнечно-синхронной орбиты, км	800	800	800
Масса, кг	350	3335	3565
Полоса захвата ЦСА, км	14,2	20	20
Диаметр апертуры ЦСА, м	0,5	1,2	1,5
Фокусное расстояние ЦСА, м	4	20	21,4
Размер пикселя фотоприемного устройства, мкм	8	8 П (24 М)	8 П (24 М)
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	8	11	14
Скорость передачи информации, Мбит/с	280	800	980
Суммарные затраты на КА, млн усл. ед.	50	267	281

КА ДЗЗ, представленные в [2, 3, 5, 6, 7]. Рациональная программа модернизации системы в рассматриваемый период времени включает создание двух модификаций КА: № 1 со сроком разработки 2 года и № 2 со сроком разработки 3 года. Выведение на орбиту функционирования модификации КА № 1 проводится в начале третьего года программы модернизации, а модификации КА № 2 – в начале пятого года программы модернизации. Суммарные приведенные затраты на создание и эксплуатацию КС ДЗЗ (без учета затрат на выведение КА) в течение 12 лет ориентировочно составляют 870 млн усл. ед. Основные характеристики базового КА и его модификаций приведены в табл. 2.

Заключение

Приведена формулировка и обсуждаются особенности задачи комплексной оптимизации (оценки) параметров модификаций КА и рациональной программы модернизации. Рассматриваются модификации КА с оптико-электронной комбинированной целевой съемочной аппаратурой со сверхвысоким значением разрешающей способности. Задача комплексной оптимизации (оценки) параметров модификаций КА и рациональной программы модернизации рассматривается в детерминированной постановке.

При поиске решения задачи используется ее параметрическая декомпозиция. Отдельно формируются варианты модификаций КА в составе КС ДЗЗ

и программа модернизации системы в рассматриваемый период (10 лет). Вектор варьируемых параметров включает параметры модификаций КА и программы модернизации системы. Приведена постановка задачи исследования и представлены результаты решения задачи исследований на модельном примере.

Результаты исследований показали, что рациональная программа модернизации проекта создания КС ДЗЗ в планируемый период с минимальными затратами на ее реализацию включает разработку двух модификаций КА массой около 3500 кг, создание и выведение модификаций КА целесообразнее проводить в первые четыре года десятилетнего периода модернизации системы.

Полученные на модельном примере оценки технико-экономических характеристик могут быть использованы для детального анализа эффективности существующих и перспективных космических систем с целью прогнозирования их развития, расширения области применения, продления сроков использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения проекта по базовой части государственного задания № FSFF-2020-0016.

Литература

1. Матвеев Ю. А. Методы прогнозирования характеристик модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / Ю. А. Матвеев, В. А. Ламзин, В. В. Ламзин. – Москва : Издательство МАИ. – 2019. – 160 с.
2. Матвеев Ю. А. Основы проектирования модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / Ю. А. Матвеев, В. А. Ламзин, В. В. Ламзин. – Москва : Издательство МАИ, 2015. – 176 с.
3. Method of Predictive Studies of the Effectiveness of Spacecraft Modifications with Integrated Subsystem Replacement / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin // Solar System Research. – 2016. – Vol. 50. – No. 7. – P. 604 – 610.
4. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли / Н. Н. Севастьянов, В. Н. Бранец, В. А. Панченко [и др.] // Труды МФТИ. – 2009. – Т. 1. – № 3. – С. 15 – 23.
5. Основные направления развития зарубежных оптико-электронных космических систем дистанционного зондирования Земли (обзор) / К. А. Занин, И. В. Москатиных // Вестник НПО имени С. А. Лавочкина. – 2019. – № 2/44. – С. 28 – 36.
6. Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс-ПМ» / А. И. Бакланов, В. Д. Блинов, И. А. Горбунов [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2016. – Т. 15. – № 2. – С. 30 – 35.

7. Исследование характеристик оптико-электронной космической системы дистанционного зондирования Земли при модернизации в планируемый период / В. В. Ламзин // Вестник МАИ. – 2009. – Т. 16. – № 5. – С. 46 – 55.

Поступила в редакцию 16.04.2021

*Владимир Алексеевич Ламзин, доцент, кандидат технических наук,
т. 8 (916) 846-58-36, e-mail: 8465836@mail.ru.*

(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).

INTEGRATED FORECAST RESEARCH OF SPACE SYSTEM AND SPACECRAFTS MODIFICATIONS PARAMETERS OF THE EARTH REMOTE SENSING

V. A. Lamzin

The problem of complex optimization of the parameters of the Earth remote sensing (ERS) space system (SS) and the spacecraft (SC) during the system modernization in the period under consideration is considered. The task is a compromise and multi-criteria one. In addition to evaluating technical and economic characteristics, indicators of functional efficiency and the presence of limitations are taken into account. The formulation of the problem is given, with the use of an enlarged structure of the space system, consisting of space and ground segments. The base SC and its modifications act as the object of the space segment. It is assumed that during the implementation of the ERS SS modernization program, along with the base object, SC modifications are put into operation. When forming the initial data, the known indicators of prototypes were used. The technique is presented, which includes a step-by-step solution of two main tasks – optimization of the modernization program and parameters of the SC modification as part of the system. The vector of variable parameters includes the number of SC modifications, the terms of their commissioning, parameters of SC modification, and the parameters of the base apparatus are known. The criterion for finding a solution to the problem is the total reduced costs for the implementation of the ERS SS modernization program. The result of solving the problem is a rational modernization program for the period under consideration and the technical and economic characteristics of the SC modifications and system. The solution of the problem will make it possible to reasonably approach the determination of the rational characteristics of equipment and technology of ERS space assets, to purposefully carry out work on the development of the technological base of production and is of not only scientific, but also practical interest. The estimates of the technical and economic characteristics of SC modifications obtained on the basis of model examples can be used for a detailed analysis of the effectiveness of promising ERS space systems in order to predict their development and expand the scope of application.

Key words: Earth remote sensing, space system, spacecraft, modernization, modification, modernization program, comprehensive optimization, technical and economic efficiency.

References

1. Matveev Yu.A., Lamzin V.A, Lamzin V.V. Method for predicting the characteristics of the Earth remote sensing spacecraft modifications / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin. – Moscow: MAI Publ., 2019. – 160 p.
2. Matveev Yu. A., Lamzin V. A, Lamzin V. V. Fundamentals of designing of the Earth remote sensing spacecraft modifications / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin. – Moscow: MAI Publ., 2015. – 176 p.
3. Matveev Yu. A., Lamzin V. A, Lamzin V. V. Method of Predictive Studies of the Effectiveness of Spacecraft Modifications with Integrated Subsystem Replacement / Yu. A. Matveev, V. A. Lamzin, V. V. Lamzin. // Journal Solar System Research. – 2016. – Vol. 50. – No. 7. – P. 604 – 610.
4. Analysis of modern possibilities of creating small spacecraft for Earth remote sensing / N. N. Sevast'yanov, V. N. Branec, V. A. Panchenko, N. V. Kazinskij, T. V. Kondranin, S. S. Negodyaev. // Journal Proceeding of MIPT. – 2009. – Vol. 1. – No. 3. – P. 15 – 23.
5. Principle directions of development of foreign Earth remote sensing electro-optical space systems (review) / K. A. Zanin, I. V. Moskatina/ev. // Journal Vestnik of NPO named after S. A. Lavockin. – 2019. – No. 2(44). – P. 28 – 36.
6. Baklanov A. I., Blinov V. D., Gorbunov I.A. and etc. High-resolution equipment for the advanced spacecraft «Resurs-PM» / A. I. Baklanov, V. D. Blinov, I. A. Gorbunov and etc. // Journal Vestnik of Samara State Aerospace University. – 2016. – Vol. 15. – No. 2. – P. 30 – 35.
7. Lamzin V. V. Investigation of the characteristics of Earth remote sensing electro-optical space systems during modernization in the planned period / V. V. Lamzin. // Journal Vestnik of MAI. – 2009. – Vol. 16. – No 5. – P. 46 – 55.

*Vladimir Alekseevich Lamzin, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences,
tel.: +7 (916) 846-58-36, e-mail: 8465836@mail.ru.
(Moscow Aviation Institute (National Research University)).*