

Научная статья
УДК 629.78
DOI: 10.34759/vst-2021-4-62-77

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Владимир Владимирович Ламзин¹, Владимир Алексеевич Ламзин² ✉

^{1,2}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,
Москва, Россия
²8465836@mail.ru ✉

Аннотация. Проводится комплексная оценка рациональных параметров и программы развития космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в рассматриваемый период с учетом технико-экономических ограничений. Решается задача оценки рациональных параметров программы модернизации космической системы (КС) ДЗЗ. Особенностью задачи является то, что определено начальное состояние — базовый объект (КА ДЗЗ). Предложена методика комплексной оценки рациональных параметров и программы развития КА, в основе которой многоуровневое управление разработкой, модели многоуровневого проектного исследования и статистический метод многоуровневой согласованной оптимизации. Методика включает поэтапное решение комплексной оценки рациональных параметров КА в составе КС ДЗЗ в рассматриваемый период. На первом этапе решается задача оценки параметров программы модернизации КС ДЗЗ, на втором — задача оценки рациональных параметров модификаций КА с учётом проектно-конструкторских решений (ПКР) подсистем аппарата. Разработан алгоритм комплексной оценки рациональных параметров и программы развития КА ДЗЗ, приведены основные соотношения проектных моделей. Особенностью проектного анализа программы развития КА в рассматриваемый период является комплексный характер исследований. При этом одновременно определяются рациональная структура системы и проектные параметры подсистем (модификаций КА), а также программа модернизации системы — число и сроки проведения модернизаций в рассматриваемый период. Разработанный методический аппарат позволяет учесть динамику функциональных связей и получить необходимые количественные оценки при выборе рациональных проектных решений КА и их модификаций при модернизации КС ДЗЗ в рассматриваемый период.

Ключевые слова: комплексная оценка параметров и программы развития КА ДЗЗ, алгоритм оценки рациональных параметров, согласованный многоуровневый поиск рациональных параметров

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

Для цитирования: Ламзин В.В., Ламзин В.А. Методика комплексной оценки рациональных параметров и программы развития космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 62-77. DOI: 10.34759/vst-2021-4-62-77

Original article

INTEGRATED ASSESSMENT TECHNIQUE FOR THE EARTH REMOTE PROBING SPACECRAFT RATIONAL PARAMETERS AND DEVELOPMENT PROGRAM

Vladimir V. Lamzin¹, Vladimir A. Lamzin² ✉

^{1,2}Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,

Moscow, Russia

²8465836@mail.ru ✉

Abstract

The article performs an integrated assessment of the Earth remote sensing (ERS) spacecraft (SC) rational parameters and development program in the period under consideration with account for technical-and-economic limitations. The problem of rational parameters assessment of the ERS space system (SS) modernization program is being solved. The problem specialty consists in the fact that the initial state was determined, namely the base object (ERS SC).

The authors proposed a technique for integrated assessment of a spacecraft rational parameters and development program, based on the multilevel design management multilevel project study models and statistical method of multilevel consistent optimization. This technique includes a stagewise solution of rational parameters integrated assessment of a spacecraft as a part of the ERS SC in the considered period. The first stage solves the problem of parameters assessment of the ERS SC modernization program. The second stage solves the problem of the spacecraft rational parameters assessment with account for design work solutions for its subsystems.

The article presents the developed algorithm for integrated assessment of the spacecraft rational parameters and development program, as well as basic relations of the project models. The design work analysis specialty of the spacecraft development program in the considered period is a complex nature of the research. A system rational structure is being determined herewith simultaneously with the subsystems (spacecraft modifications) project parameters, as well as the system modernization program, namely the date and terms of modernizations performing in the considered period. The dependencies reflecting the basic ERS SC characteristics (weight and cost) changing on the system technical characteristics were formed by both correlation and regression methods based on the posteriori (statistical) information of the ERS SC samples-prototypes characteristics.

The article adduces the results of the various options of the modernization programs studying. The considered (being forecasted) time period is of twenty years. In contrast to the third one when only one modernization is being performed with four spacecraft modifications, the first and the second options comprise performing two modernizations. The difference between the first and the second options consists in the number of the spacecraft modifications. The first option contains four modifications while there are three of them in the second one. The performed quantitative esteems of the total reduced expenditures on the modernization program realization in the course of twenty years reveal that the second option, at which the expenditures are minimum and of 1.154 billion of conventional unit is rational. The cost saving is 12.5–30% compared to the first and third options of the modernization program.

The article demonstrates that the system modernization in the considered period and the search for rational project work solutions is being performed in a complex and consistent manner with the spacecraft parameters assessment as well as parameters of the spacecraft subsystems being replaced. This complex studies allow accounting for the functional relationships (both internal and external) dynamics, and determining rational solution on the term extension of the ERS SC effective application at the restricted costs.

The developed technique allows performing technical-and-economic analysis of the ERS SC modernization program alternative options and obtaining necessary quantitative assessments while project solutions of the spacecraft modifications assessment and selection, as well as assessing the unified space platforms application effectiveness and enhancing the operational life of subsystems and a spacecraft as a

whole. The developed technique may be applied for the ERS SC development programs correction and determining requirements to the prospective spacecraft and its modifications.

Keywords: integrated assessment technique, the Program for Remote Earth Probing Spacecraft Development, rational parameters assessment task, assessment algorithm, design work solutions, consistent search of rational parameters, technical-and-economic limitations.

Funding: the work was performed with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the project on the basic part of the state task No. FSFF-2020-0016.

For citation: Lamzin V.V., Lamzin V.A. Integrated assessment technique for the Earth remote probing spacecraft rational parameters and development program. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 62-77. DOI: 10.34759/vst-2021-4-62-77

Введение

Космические системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) находят широкое применение во многих областях социально-экономической сферы страны и при решении прикладных задач. К таким системам в течение последнего десятилетия предъявляются всё более высокие требования. Опыт разработки КС ДЗЗ показывает, что повышение их эффективности связано с совершенствованием целевой аппаратуры КА, улучшением технических и технологических характеристик подсистем, с организацией эффективной эксплуатации и модернизации техники.

Применению КС ДЗЗ, исследованиям в области мониторинга окружающей среды и вопросам влияния тенденций развития средств ДЗЗ на целевую аппаратуру КА, технической реализации и способам достижения основных характеристик (таких, как разрешение, полоса захвата, периодичность наблюдения и информационная производительность), в том числе и за счёт построения больших группировок однотипных или разнотипных КА, посвящено ряд статей, обзоров и монографий как отечественных, так и зарубежных авторов [1—13].

Вопросам выбора направлений совершенствования научно-методического аппарата, обоснования тактико-технических требований к КА ДЗЗ, формирования рационального состава и параметров аппаратов при наличии технико-экономических ограничений, анализа эффективности внедрения того или иного технического решения, связанного с выбором характеристик вновь создаваемых аппаратов в составе КС, также уделено много внимания в литературе [14—20].

На современном этапе при ограничениях на затраты при создании КС ДЗЗ актуальными ста-

новятся вопросы проведения комплекса работ по восстановлению системы, расширению её технических и технологических возможностей, проектных исследований перспективных КА с учётом развития техники и технологий в рассматриваемый период.

Вопросам проведения комплекса работ по восстановлению системы, расширению технических и технологических возможностей посвящены, например, работы [21—23]. В них рассмотрены основные особенности построения и функционирования систем ДЗЗ на современном этапе. С целью увеличения срока активного существования КА, авторы предлагают перейти от традиционной задачи — обоснования тактико-технических характеристик нового КА (или модификации КА) к решению задачи поэтапной модернизации отдельных подсистем аппарата. Ими разработаны методические основы научного сопровождения процессов создания таких систем. Однако вопросы перспективного проектирования КА ДЗЗ с учетом динамики их развития не нашли должного освещения. В этом случае с целью сокращения стоимости создания КС ДЗЗ необходимо проведение совместной и одновременной оценки рациональных параметров и программы развития перспективных КА ДЗЗ (рациональной модернизации) с учётом развития техники и технологий в рассматриваемый период.

Анализ показывает, что рациональная модернизация КС ДЗЗ, создание перспективных модификаций КА даёт возможность увеличить время эффективной эксплуатации системы и одновременно расширить состав решаемых задач, повысить устойчивость технических решений (уменьшить дополнительные затраты на систему при из-

менении целевой нагрузки), снизить риск реализации проекта и улучшить качество информационного обеспечения потребителей. Для комплексного анализа процесса развития КА ДЗЗ, разработки рациональной программы модернизации и создания модификаций КА на начальном этапе проектно-конструкторских работ необходимы специальные модели и методы исследования. Разработка методики комплексной оценки рациональных параметров и программы развития перспективных КА ДЗЗ приобретает особую актуальность. Реализация данной методики для обоснования рациональных программ модернизации будет способствовать повышению эффективности перспективных разработок КА ДЗЗ при ограниченных затратах.

Цель статьи – разработка методики комплексной оценки рациональных параметров и программы развития КА в составе КС ДЗЗ при модернизации системы в рассматриваемый (планируемый) период с учётом технических и технологических ограничений. Новизну и отличительную особенность разработанной методики определяет решение задачи оптимизации (оценки) программы модернизации системы в рассматриваемый период и многоуровневое управление разработкой модификаций КА. Под комплексной оценкой в статье понимается согласованный поиск рациональных параметров КА и подсистем при многоуровневом управлении разработкой, а также одновременный согласованный поиск рациональных параметров КА и программы модернизации системы в рассматриваемый период.

Постановка задачи и метод решения

При разработке методики комплексной оценки рациональных параметров и программы развития КА в составе КС ДЗЗ при модернизации системы в рассматриваемый (планируемый) период реализуется метод декомпозиции. Вначале решается задача оценки параметров программы модернизации КС ДЗЗ, затем – задача оценки рациональных параметров модификаций КА с учётом проектно-конструкторских решений (ПКР) подсистем аппарата.

При постановке задачи оптимизации (оценки) программы модернизации КС ДЗЗ в рассматриваемый период реализуется укрупненная структура системы, включающая подлежащие дальнейшему анализу космический и наземный сегменты (рис. 1).

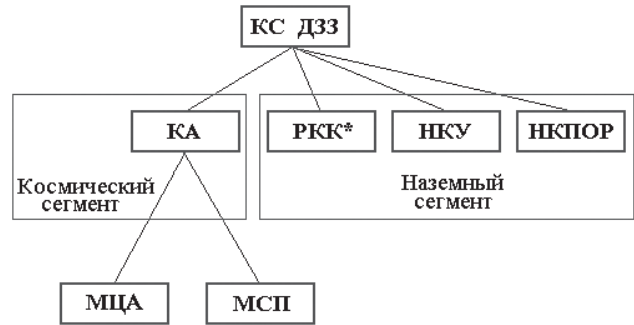


Рис. 1. Укрупненная структура КС ДЗЗ

В состав космического сегмента входит орбитальная группировка объектов. В качестве объекта выступает КА, включающий модули целевой аппаратуры (МЦА) и служебных подсистем (МСП). В состав наземного сегмента входит: ракетно-космический комплекс (РКК*), из состава которого выведен КА; наземный комплекс управления (НКУ); наземный комплекс приема, обработки и распространения информации (НКПОР).

Полагается, что определены параметры базовой системы и известны прогнозные оценки целевой нагрузки и условий функционирования КС ДЗЗ в рассматриваемый (планируемый) период. Тогда задача оптимизации программы модернизации сводится к определению числа, сроков и параметров замены подсистем в КС ДЗЗ (в том числе создания модификаций КА), с тем чтобы обеспечить требуемый уровень эффективности выполнения целевых задач и чтобы приведенные затраты на программу модернизации в планируемый период были минимальными.

Формально математическая постановка задачи оптимизации программы модернизации КС ДЗЗ в рассматриваемый (планируемый) период представляется в виде

$$\begin{aligned}
 C_{\Sigma_{KC}}^M(\cdot) = \sum_{i=1}^n \left[\left(\sum_{j=1}^{N_{KA}} C_{\Sigma_{KA,j}}^M(\cdot) \right)_i, (PR^M(t), \beta_i^M(t_{np})) \right] \times \\
 \times \eta(\tau_i) + C_{\Sigma_{HC}}(\cdot) \cdot \eta(\tau) \rightarrow \min_{PR^M(t) \in G_{KC}^M(\cdot)} ; \quad (1) \\
 W_{KC}^M(\Pi_{KA}^M(\cdot), PR^M(t), \Pi(t)) \geq W_{KC}^{M,зд} ; \\
 T_{p,и_i}(PR^M(t)) \leq T_{p,и_i}^{зд} ; \\
 T_{CAC,j}(P_{KA,j}(\cdot)) \geq T_{CAC,j}^{зд} ;
 \end{aligned}$$

$$PR^M(t) = (n, t_i, (\Pi_{KA}^M(\cdot)_j)_i, (T_{CACj}(P_{KAj}(\cdot)))_i);$$

$$P_{KAj}(\cdot) \geq P_{KAj}^{зд};$$

$$M_{KAj}^M(\cdot) \leq M_{KAj}^{зд};$$

$$\Psi(t) = \Psi(t)^{зд};$$

$$T^M = T^{зд},$$

где $C_{\Sigma KC}^M(\cdot)$ – приведенные суммарные затраты на реализацию программы модернизации КС ДЗЗ в рассматриваемый (планируемый) период;

$\sum_{j=1}^N C_{\Sigma KAj}^M(\cdot)$ – приведенные затраты на разработку и изготовление j -х ($j = \overline{1, N_{KA}}$) модификаций

КА, которые вводятся в строй в моменты t_i ($i = \overline{1, n}$) при модернизации (развитии) КС ДЗЗ;

N – количество модификаций КА при i -й модернизации; $PR^M(t)$ – программа модернизации КС ДЗЗ;

$\beta_i^M(t_{pp})$ – вектор определяющих параметров при модернизации системы к моменту t_i ;

t_i – срок проведения i -й модернизации; n – количество модернизаций в планируемый период;

$C_{\Sigma HC}(\cdot)$ – суммарные приведенные затраты на выведение КА, доработку и эксплуатацию подсистем наземного сегмента КС ДЗЗ в рассматриваемый (планируемый) период при реализации программы ввода в строй модификаций КА;

$\eta(\tau_i)$ – коэффициент приведения затрат на разработку и изготовление модификаций КА к базовым; $\eta(\tau)$ – коэффициент приведения затрат на подсистемы наземного сегмента к базовым;

$W_{KC}^M(\cdot)$ – вектор-функция, определяющая изменение эффективности КС ДЗЗ при реализации программы модернизации в рассматриваемый (планируемый) период;

$T_{p.i.j}(PR^M(t))$ – трудоёмкость разработки и изготовления (длительность этапа создания модификации КА ДЗЗ) при проведении

i -й модернизации системы; $\Psi(t)$ – целевая нагрузка на КС ДЗЗ; $\Pi_{KAj}^M(\cdot)$ – параметры j -й модификации КА;

$M_{KAj}^M(\cdot)$ – масса j -й модификации КА; P_{KAi} – надежность j -й модификации КА;

$T_{CACj}(P_{KAj})$ – срок активного существования j -й модификации КА;

T^M – период времени существования КС ДЗЗ при реализации программы модернизации; индекс «зд» обозначает заданное (требуемое) значение функции или параметра.

Задача (1) сформулирована как детерминированная. В общем случае следует учитывать, что при формировании соответствующих зависимостей используются опытные данные (статистика по прототипам) и задача должна быть записана как стохастическая. Из записи задачи (1) видно, что при решении многокритериальной задачи оптимизации программы модернизации КС ДЗЗ используется метод ограничений. Такой подход дает возможность исследовать влияние динамики внешних связей (ограничений) на проектное решение. Критерий поиска решения задачи (1) – суммарные приведенные затраты на реализацию программы модернизации КС ДЗЗ с учетом затрат на выведение модификаций КА на орбиту функционирования и их эксплуатацию в рассматриваемый (планируемый) период. В общем случае следует учитывать и ликвидные средства.

В статье под определяющими параметрами (характеристиками) $\beta_i^M(t_{pp})$ при модернизации системы к моменту t_i понимаются такие параметры, значения которых зависят от динамики внешних факторов, от темпов научно-технического прогресса.

Вектор варьируемых параметров включает параметры модификации КА. В записи задачи (1) первое неравенство определяет требование к целевой эффективности (разрешающей способности целевой аппаратуры, информационной производительности и периодичности наблюдения подстилающей поверхности КА), второе – ограничение на сроки разработки и изготовления модификаций аппаратов. В статье информационная производительность КА ДЗЗ оценивается площадью изображения подстилающей поверхности, полученной целевой аппаратурой за один

сеанс передачи информации с борта КА на НКПОР. Программа модернизации системы $PR^M(t)$ (в данном случае создание модификаций КА) определяется заданием параметров n , t_i , $P_{КАj}^M(\cdot)$ и $T_{САСj}(P_{КАj})$.

Особенностью задачи оценки рациональных параметров модификаций КА с учётом проектно-конструкторских решений подсистем является то, что параметры j -й модификации КА определяются в результате многоуровневого управления разработкой (рис. 2).

При многоуровневом управлении разработкой рассматриваются задачи I и II, которые решаются последовательно. Метод решения таких задач подробно изложен в работах [21, 24, 31]. Вначале решается задача I (уровни управления разработкой $i-1$ и i), используется двухуровневая модель управления разработкой КА (на верхнем $i-1$ -м уровне рассматривается КА, включающий МЦА и МСП; на нижнем i -м – детализируется структура МЦА) и метод двухуровневой

согласованной оптимизации при статистическом учете функциональных связей. На $i-1$ -м уровне управления разработкой рассматривается КС ДЗЗ, состав которой приведен на рис. 1. На i -м уровне управления разработкой детализируется структура подсистем КА. Модуль МЦА рассматривается, например, как объект, включающий четыре подсистемы: целевую съемочную систему (ЦСС), бортовой радиокомплекс (БРК) передачи целевой информации, систему терморегулирования (СТР) и конструкцию (Кон).

Постановка задачи I: при заданных параметрах наземного сегмента, целевой нагрузки и параметрах орбиты определить параметры модификации КА, при которых целевая эффективность, вероятность безотказной работы (ВБР) в течение срока активного существования (САС) и информационная производительность аппарата были бы не меньше, а массогабаритные характеристики не больше заданных, при этом суммарные затраты на создание модификации КА при модернизации системы к заданному моменту времени t_i были бы минимальными.

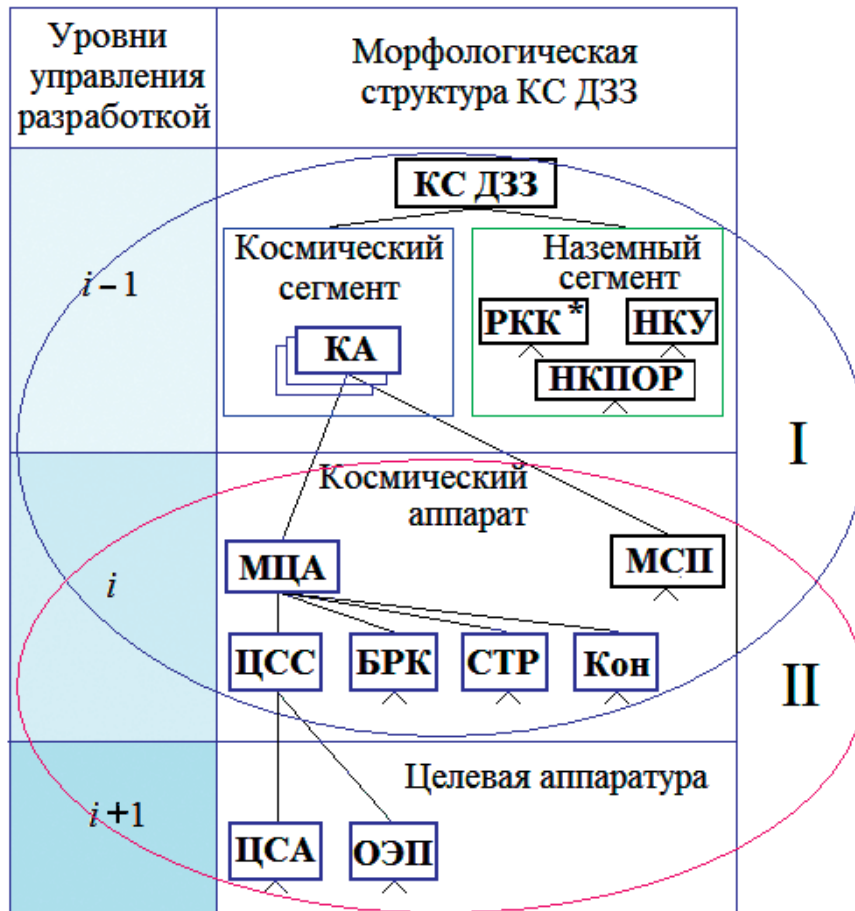


Рис. 2. Схема многоуровневого управления разработкой КА ДЗЗ

Затем решается задача II (уровни управления разработкой i и $i+1$), используется двухуровневая модель управления разработкой КА. На верхнем i -м уровне управления разработкой рассматривается МЦА, на нижнем $i+1$ -м – проводится детализация структуры подсистемы ЦСС модуля МЦА. Подсистема ЦСС рассматривается как объект, состоящий из целевой съёмочной аппаратуры (ЦСА) и оптико-электронного приёмника (ОЭП) с блоком управления, считывания и обработки информации. При решении задачи реализуется метод двухуровневой согласованной оптимизации при статистическом учете функциональных связей.

Для случая, когда при создании модификации КА ДЗЗ проводится замена подсистемы ЦСС МЦА, задача формулируется так: при заданном типе оптико-электронного комплекса, входящего в состав МЦА, и значениях его характеристик определить параметры МЦА такие, при которых затраты на реализацию проекта создания МЦА на i -м уровне управления разработкой были бы минимальными при выполнении ограничений.

Решение задачи оценки рациональных параметров модификаций КА с учётом проектно-конструкторских решений (ПКР) подсистем взаимосвязано с решением задачи оптимизации программы модернизации КС ДЗЗ в рассматриваемый (планируемый) период.

При поиске рационального решения задачи (1) используется параметрическая декомпозиция. Реализуется методика расчлененной оптимизации (метод обобщенного покоординатного спуска). Вначале определяется множество модификаций КА ДЗЗ для реализации в рассматриваемый (планируемый) период. Затем проводится поиск рациональных числа и сроков проведения модернизации, определяются рациональные сроки активного существования, рациональные параметры модификаций КА.

Укрупненная блок-схема алгоритма комплексной оценки рациональных параметров и программы развития КА в составе КС ДЗЗ при модернизации системы в рассматриваемый (планируемый) период приведена на рис. 3.

Блок-схема алгоритма комплексной оценки рациональных параметров и программы развития КА включает блоки прогнозирования определяющих параметров, формирования вариантов модификации КА, оптимизации параметров модификаций КА и программы модернизации системы, оценки информационной производительности, надёжности и целевой эффективности, а

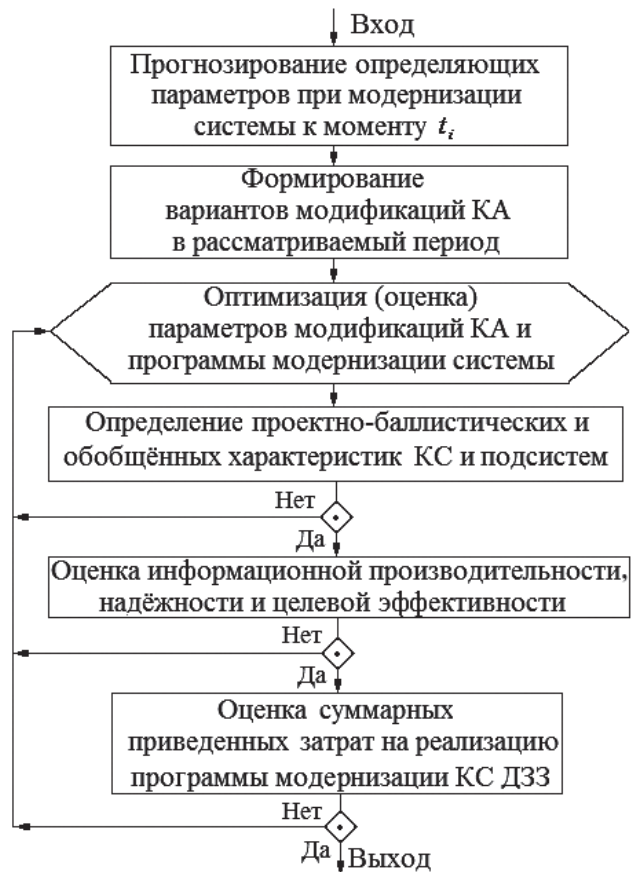


Рис. 3. Укрупненная блок-схема алгоритма комплексной оценки рациональных параметров и программы развития КА

также определения суммарных приведенных затрат на реализацию программы модернизации.

Модели оценки технико-экономических характеристик КС и КА ДЗЗ

При решении рассмотренных выше задач используются проектные модели габаритно-массовых характеристик КА и его подсистем (МЦА и МСП) (см. рис. 2), приведенные в [21, 24, 31]:

$$M_{КА} = M_{МЦА} + M_{МСП};$$

$$M_{МЦА} = k_{МЦА} \cdot M_{ЦСС};$$

$$M_{ЦСС} = \overline{M}_{ЦСС} \cdot (R / H)^{\alpha_{ЦСС}};$$

$$V_{КА} = M_{КА} / \rho_{КА},$$

где $M_{КА}$ – масса КА; $M_{МЦА}$ и $M_{МСП}$ – соответственно масса подсистем КА (модулей МЦА и МСП); $M_{ЦСС}$ – масса ЦСС; H – высота орбиты КА; R – разрешающая способность ЦСС КА;

$k_{\text{МЦА}}$, $\alpha_{\text{ЦСС}}$ и $\bar{M}_{\text{ЦСС}}$ – статистические коэффициенты, в общем случае зависят от момента времени t_i ; $V_{\text{КА}}$ – объем КА; $\rho_{\text{КА}}$ – среднее значение плотности компоновки КА.

В представленных зависимостях масса M измеряется в килограммах, объем $V_{\text{КА}}$ – в кубических метрах, плотность компоновки $\rho_{\text{КА}}$ – в килограммах на кубический метр, разрешающая способность R и высота орбиты КА H – в метрах.

Соотношения, используемые для определения надёжности и информационной производительности:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{КА}} &= P_{\text{МЦА}} \cdot P_{\text{МСП}}; \\
 P_{\text{МЦА}} &= 1 - \bar{P}_{\text{МЦА}} \cdot e^{-\alpha_{\text{МЦА}} \cdot M_{\text{МЦА}}}; \\
 P_{\text{МСП}} &= 1 - \bar{P}_{\text{МСП}} \cdot e^{-\alpha_{\text{МСП}} \cdot M_{\text{МСП}}}; \\
 I_{\text{ПРКС}} &= \sum_{i=1}^{N_{\text{КА}}} I_{\text{ПРКА}}; \\
 I_{\text{ПРКА}} &= \bar{I}_{\text{ПР}} \cdot M_{\text{МЦА}}^{\alpha_{\text{ПР}}}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $P_{\text{КА}}$ – надёжность КА; $P_{\text{МЦА}}$ и $P_{\text{МСП}}$ – соответственно надёжность подсистем КА: модулей МЦА и МСП; $I_{\text{ПРКС}}$ и $I_{\text{ПРКА}}$ – соответственно информационная производительность КС и КА ДЗЗ на i -м уровне управления разработкой (см. рис. 2); $N_{\text{КА}}$ – количество КА в орбитальной группировке КС ДЗЗ; $\bar{P}_{\text{МЦА}}$, $\bar{P}_{\text{МСП}}$, $\bar{I}_{\text{ПР}}$, $\alpha_{\text{МЦА}}$, $\alpha_{\text{МСП}}$, $\alpha_{\text{ПР}}$ – статистические коэффициенты.

В представленных зависимостях масса M измеряется в килограммах, информационная производительность $I_{\text{ПР}}$ – в квадратных километрах на сеанс связи с НКПОР.

В статье информационная производительность КА ДЗЗ, описываемая формулой (2), оценивается площадью изображения земной поверхности, полученной целевой съёмочной системой (ЦСС) за один сеанс передачи информации с борта КА на НКПОР.

Выражение для определения информационной производительности $I_{\text{ПР}}$ на i -м уровне управления разработкой имеет вид

$$I_{\text{ПРКА}} = \sum_{i=1}^n N_i^{\text{ЦСС}} N_{\text{К}i} S_{\text{К}i}^1,$$

где $N_i^{\text{ЦСС}}$ – количество типов ЦСС ($i=1, \dots, n$);

$N_{\text{К}}$ – количество кадров на маршруте; $S_{\text{К}i}^1$ – площадь поверхности Земли 1-го кадра.

Модель затрат на реализацию проекта создания КС ДЗЗ в рассматриваемый период представляется в виде суммы приведенных затрат на космический сегмент и подсистемы наземного сегмента [24].

Результаты исследований

Ниже приведены результаты численных исследований при решении задачи комплексной оценки рациональных параметров и программы развития КА ДЗЗ.

В качестве примера выбран вариант солнечно-синхронной орбиты высотой $H = 510$ км. Требования по массе $M_{\text{КА}}$ и вероятности безотказной работы $P_{\text{КА}}$ (в течение срока активного существования $T_{\text{САС}} = 7$ лет для каждой модификации КА): $M_{\text{КА}} \leq 3000$ кг, $P_{\text{КА}} \geq 0,9$.

Опыт показывает, что время разработки и изготовления КА зависит от ряда факторов: от новизны разрабатываемой целевой аппаратуры и изделия в целом, объема проводимых испытаний и др. При проведении исследований принимается, что суммарное время разработки и изготовления всех разрабатываемых модификаций КА одинаково и составляет 2,5 года. Требуемые (прогнозируемые) значения разрешающей способности ЦСА R в зависимости от времени реализации программы модернизации приведены на рис. 4.

При поиске рациональных параметров модификаций КА и программы их развития рассматриваются три альтернативных варианта реализации программы модернизации системы: первый вариант предполагает проведение двух модернизаций на базе четырёх модификаций КА № 1 и 2 (первая модернизация) и КА № 3 и 4 (вторая модернизация); второй вариант – проведение двух модернизаций на базе трёх модификаций КА № 1 и 3 (первая модернизация) и КА № 4 (вторая модернизация); третий вариант – проведение одной модернизации на базе четырёх модификаций КА № 1, 2, 3 и 4 (рис. 5).

Цель исследования: на модельном примере, применяя разработанную методику, определить рациональные параметры модификаций КА и программу их развития такие, чтобы затраты на

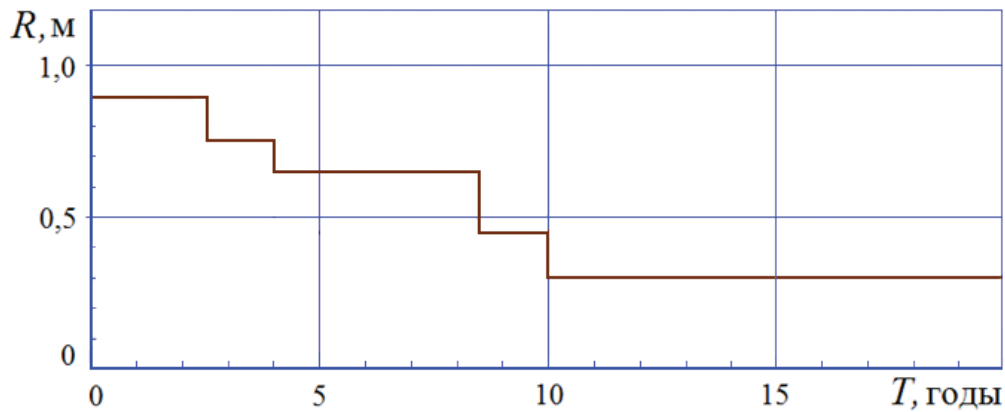


Рис. 4. Зависимость разрешающей способности от времени

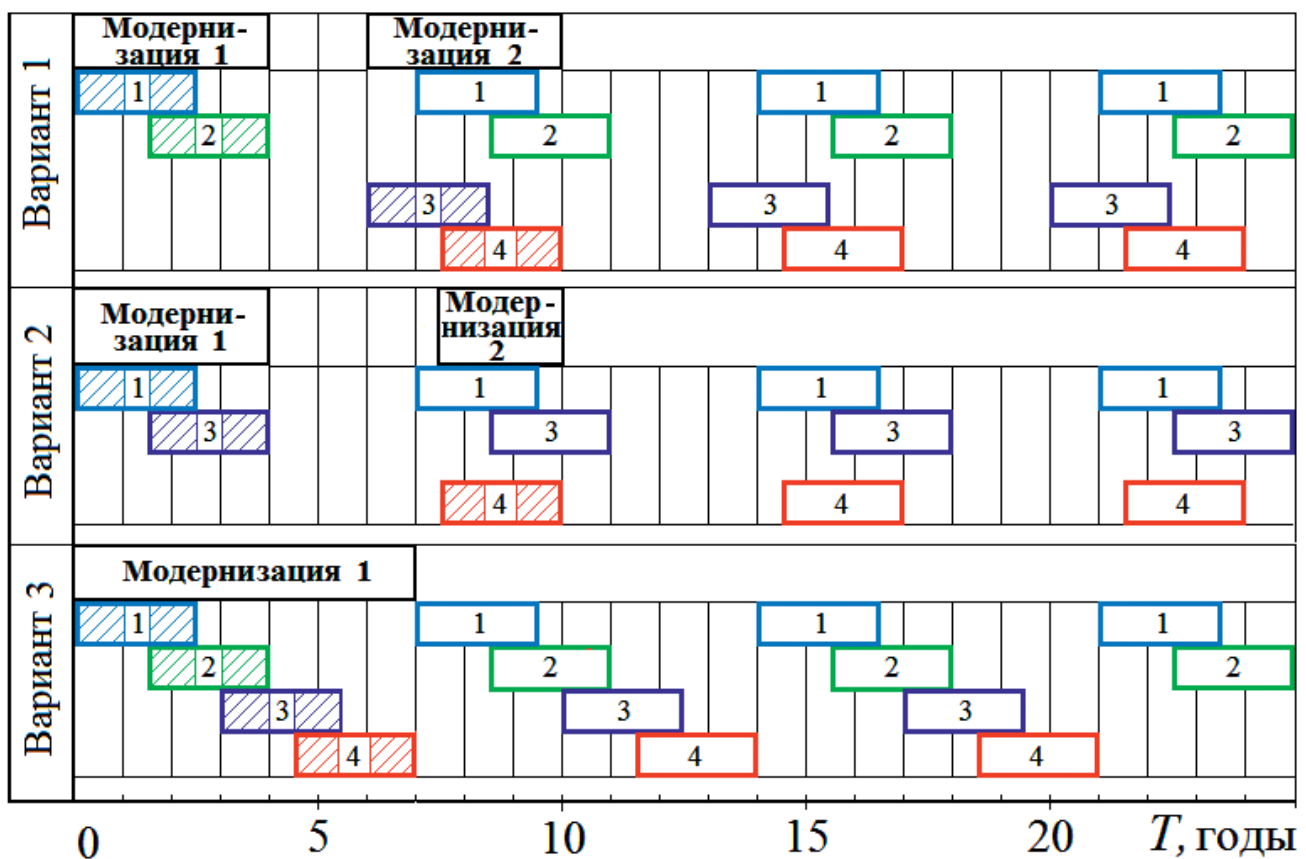


Рис. 5. Варианты реализации программы развития КА Д33

реализацию программы их развития в рассматриваемый период были минимальными.

При проведении исследований используются технико-экономические характеристики прототипов КА Д33 (табл. 1), представленные в работах [1, 5, 6, 24–35].

С использованием статистических данных по прототипам изделий (табл. 1) получены аппроксимирующие зависимости массы $M_{КА}$ (в килограммах) и затрат $C_{КА}$ (в млн у. е.) для КА с ком-

бинированной ЦСА на $i-1$ -м уровне управления разработкой:

$$M_{КА} = 1,211 \cdot 10^{-4} \cdot (R/H)^{-1,1527};$$

$$C_{КА} = 62,22 \cdot 10^{-4} \cdot (M_{КА})^{0,7474},$$

где R/H — отношение разрешения ЦСА к высоте орбиты КА (б/р).

Таблица 1

Основные технико-экономические характеристики прототипов КА ДЗЗ

Наименование КА	Разрешение R , м	Высота орбиты H , км	Ширина полосы захвата ΔL , км	Масса $M_{ЦСА}$, кг	Масса КА $M_{КА}$, кг	Стоимость КА $C_{КА}$, млн у. е.
NigeriaSat-2	2,5	721	20	42	300	56
EROS-B1	0,82	508	7	57	290	110
EROS-A1	1,8	520	12,5	52,5	250	100
OrbView-3	1	470	8	105	360	125
SkySat-2	0,9	578	8	40	120	20
Kompsat-2	0,9	685	15	200	800	280
QuickBird-1	0,6	482	16,5	500	1028	330
EROS-C	0,7	550	16	57	370	100
Ikonos-2	1,0	681	11,3	171	772	60
Pleiades-HR1	0,7	690	20	205	1015	425
«Аист-2Д»	1,48	490	39,6	281	531	8,2
«Канопус В»	2,1	510	23	144,8	447	30
RazakSat	2,5	680	20	42	180	41
Formosat-2	2	898	24	–	750	75
Formosat-5	2	720	24	–	475	190
ASNARO 1	0,5	504	10	200	450	95
CartoSat-3	0,25	510	9,6	–	1625	–
Cartosat-2E	0,65	505	9,6	200	712	–
DubaiSat 2	1	600	12,2	200	310	49,3
EgyptSat-2	0,5	500	8,7	–	1100	40
KompSat-3A	0,55	528	12	210	1000	240
DMC-3	0,75	500	17	186	447	–
QuickBird-2	0,6	450	16,5	380	951	245
GeoEye-1	0,4	684	15,2	470	1955	350
WorldView-2	0,5	770	16,4	470	2700	–
WorldView-3	0,4	617	13,1	470	2700	–
WorldView-4	0,3	618	13,1	470	2600	155
CSO-1	0,4	800	16	–	3565	–
WorldView Legion	0,29	450	–	–	750	100

Зависимости затрат и массы КА с комбинированной ЦСА от величины R/H на $i-1$ -м уровне управления разработкой приведены на рис. 6.

Для вариантов реализации программы модернизации проведены оценки суммарных приведенных затрат на КС ДЗЗ (T равно 20 лет). Оцен-

ка суммарных приведенных затрат на КС ДЗЗ представлена на рис. 7.

Результатом проведенных исследований является определение рациональных параметров КА и программы их развития, при которых суммарные приведенные затраты на КС ДЗЗ в рассмат-

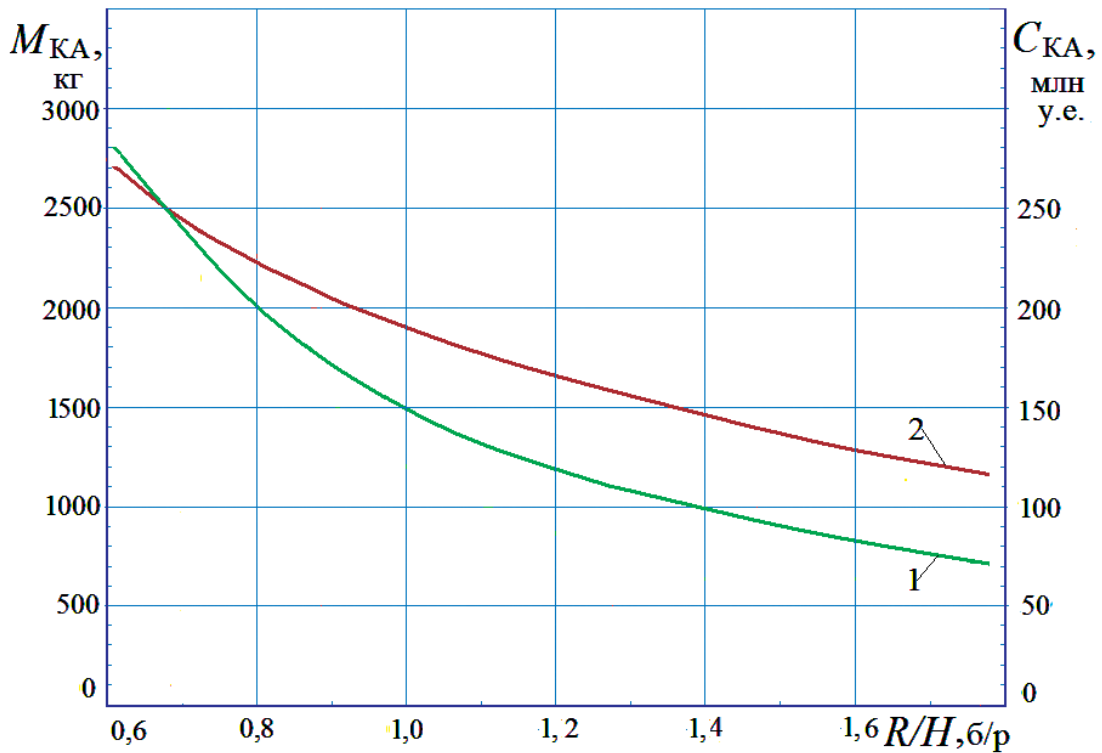


Рис. 6. Зависимости затрат и массы КА с комбинированной ЦСА от R/H на $i-1$ -м уровне управления разработкой: 1 – C_{KA} ; 2 – M_{KA}

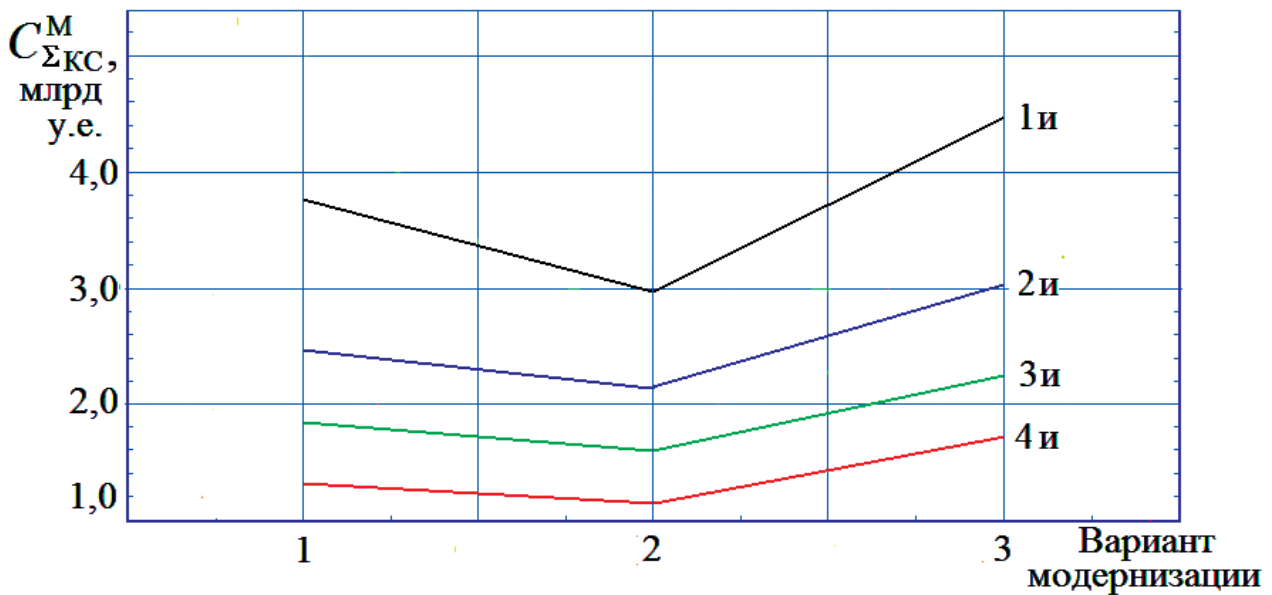


Рис. 7. Оценка суммарных приведенных затрат от варианта модернизации КС Д33 в период $T=20$ лет при реализации итерационного процесса комплексной оценки рациональных параметров КА Д33 (1и, 2и, 3и, 4и – номера итераций)

риваемый период минимальны. Основные характеристики модификаций КА на основе комбинированной ЦСА приведены в табл. 2 и 3. Комбинированная целевая съёмочная аппаратура обес-

печивает одновременную съёмку подстилающей поверхности в панхроматическом (П) и мультиспектральном (М) диапазоне (видимом и ближним инфракрасном) длин волн.

Таблица 2

Основные характеристики модификаций КА

Наименование параметра	Базовый КА	Модификации КА			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Масса КА, кг	290	239	305	631	1369
Масса МЦА, кг	57	104	135	261	608
Масса МСП, кг	233	135	170	280	761
ВБР КА ($T_{\text{САС}} = 7$ лет)	0,9023	0,9010	0,9056	0,9015	0,9006
– МСП	0,9461	0,9472	0,9432	0,9483	0,9433
– МЦА	0,9537	0,9512	0,9601	0,9506	0,9547
Стоимость КА, млн у. е.	50,0	37,3	44,7	77,0	137,4

Таблица 3

Основные характеристики комбинированной ЦСА

Наименование параметра	Базовый КА	Модификации КА			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Наилучшее значение разрешения (проекция пикселя), м	0,9	0,75	0,65	0,45	0,3
Оптическая схема	Ричи-Кретьена	Корша	Корша	Корша	Корша
Полоса захвата, км	7	8	8	8	8
Диаметр объектива, м	0,4	0,46	0,55	0,76	1,14
Фокусное расстояние, м	4,8	5,5	6,6	9,1	13,7
Количество каналов	П+3МС	П+4МС	П+4МС	П+4МС	П+4МС
Масса ЦСА, кг	34,5	76	99	205	445

Выводы

Разработана методика комплексной оценки рациональных параметров и программы развития КА ДЗЗ, в основе которой многоуровневое управление разработкой, модели многоуровневого проектного исследования и статистический метод многоуровневой согласованной оптимизации. Методика предназначена для одновременного определения рациональной структуры системы, параметров КА (модификации КА) с учётом проектно-конструкторских решений подсистем аппарата и параметров программы модернизации системы – числа и сроков проведения модернизаций в рассматриваемый период.

Разработан алгоритм комплексной оценки рациональных параметров и программы развития

КА ДЗЗ, приведены основные соотношения проектных моделей. На основе апостериорной (статистической) информации характеристик образцов-прототипов КА ДЗЗ корреляционным и регрессионным методами сформированы зависимости основных характеристик (массы и стоимости) КА ДЗЗ от технических характеристик системы.

Приведены результаты исследований различных вариантов программ модернизации. Рассматриваемый (прогнозируемый) период времени T составляет 20 лет. Первый и второй варианты, в отличие от третьего, когда проводится только одна модернизация с модификациями КА № 1–4, включают проведение двух модернизаций (см. рис. 6).

Различие первого и второго вариантов заключается в количестве модификаций КА. В первом варианте четыре модификации аппарата (№ 1–4), во втором – три модификации (№ 1, 3 и 4). Количественные оценки суммарных приведенных затрат на реализацию программы модернизации в течение 20 лет показывают (см. рис. 7), что рациональным вариантом является второй, при котором затраты минимальны и составляют 1,154 млрд у.е. По сравнению с первым и третьим вариантом программы модернизации экономия затрат составляет 12,5–30 %.

Показано, что модернизация системы в рассматриваемый период и поиск рациональных проектных решений проводятся комплексно и согласованно с оценкой параметров модификаций КА и параметров заменяемых подсистем аппарата. Комплексные исследования позволяют учесть динамику функциональных связей (внешних и внутренних), принять рациональное решение по продлению срока эффективного применения КС ДЗЗ при ограниченных затратах.

Разработанная методика позволяет провести технико-экономический анализ альтернативных вариантов программы модернизации КС ДЗЗ и получить необходимые количественные оценки при выборе рациональных проектных решений модификаций КА, оценить эффективность использования унифицированных космических платформ и увеличения ресурса работы подсистем и КА в целом. Разработанная методика может быть применена при корректировке программ развития КС ДЗЗ и определении требований к перспективным КА и их модификациям.

Список источников

1. *Бакланов А.И.* Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 2(22). С. 80–91.
2. *Асташкин А.А., Карелин А.В., Кузьмин Ю.А.* и др. Обзор орбитальных группировок океанографических космических аппаратов // Вопросы электро-механики. Труды ВНИИЭМ. 2018. Т. 165. № 4. С. 9–19.
3. *Гришин А.В., Дедус Ф.Ф., Истомина М.И.* и др. Использование перспективной группировки аппаратов для оперативного мониторинга состояния окружающей среды // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 6 (85). С. 5–10.
4. *Асташкин А.А., Карелин А.В., Комиссарова И.Н.* и др. Обзор орбитальных группировок космических аппаратов оперативного метеонаблюдения // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 6 (85). С. 5–10.
5. *Бакланов А.И.* Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. № 3. С. 17–28. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.17.28
6. *Бакланов А.И.* Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения (часть II) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. № 4. С. 14–27. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.14.27
7. *Архинов С.А.* Исследование требований к перспективной оптико-электронной аппаратуре для мало-размерных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Информация и Космос. 2016. № 3. С. 153–160.
8. *Zhang J., Yan J., Ma Y., Xu D., Li P., Jie W.* Infrastructures and services for remote sensing data production management across multiple satellite data centers // Cluster Computing. 2016. Vol. 19, pp. 1243–1260. DOI: 0.1007/s10586-016-0577-6
9. *Chi M., Plaza A., Benediktsson J.A., Sun Z., Shen J., Zhu Y.* Big data for remote sensing: challenges and opportunities // Proceedings of the IEEE. 2016. Vol. 104. No. 11, pp. 2207–2219. DOI: 10.1109/jproc.2016.2598228
10. *Chen L., Ma Y., Liu P., Wei J., Jie W., He J.* A review of parallel computing for large-scale remote sensing image mosaicking // Cluster Computing. 2015. Vol. 18. No. 2, pp. 517–529. DOI: 10.1007/s10586-015-0422-3
11. *Arnaud M., Boissin B., Perret L., Boussarie E., Gleyzes A.* The Pléiades High Resolution Program // 57th International Astronautical Congress IAC/IAF/IAA (2–6 October 2006; Valencia, Spain). DOI: 10.2514/6.IAC-06-B1.1.04
12. *Gleyzes A., Perret L.* Pleiades high resolution optical Earth Observation system status and future missions preparation in the frame of CXCI CNES program // 64th International Astronautical Congress (23–27 September 2013; Beijing, China). IAC-13-B1.2.2. IAC-13,B1,2,2,x16915.brief.pdf
13. *Ming L.* Remote sensing satellite planning in Chinese National Space infrastructure for next eight years // 68th International Astronautical Congress (25–29 September 2017; Adelaide, Australia). IAC-13-B1.2.1.
14. *Абдурахимов А.А., Баландин В.Н., Левандович А.В.* Направления совершенствования научно-методического аппарата обоснования тактико-технических требований к группировкам малых космических аппаратов // Информация и Космос. 2016. № 3. С. 153–160.
15. *Пирогова А.М., Приклонский В.И., Федотов А.П.* и др. Методика оценки технологических рисков при создании перспективных космических средств

- дистанционного зондирования Земли // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 6(85). С. 101–105.
16. *Стратилатова Н.Н., Куренков В.И., Кучеров А.С.* и др. Методика сравнительной оценки эффективности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с различными оптико-электронными телескопическими комплексами // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2016. Т. 15. № 2. С. 80–89. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-80-89
 17. *Пирогова А.М., Приклонский В.И., Черненко Е.Н.* и др. Методические принципы проведения исследований приоритетного развития критических технологий для создания космических средств дистанционного зондирования Земли // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 5(78). С. 37–42.
 18. *Борисов А.В., Емельянов А.А., Силин Б.Г.* Модель оценки производительности перспективной космической системы дистанционного зондирования Земли // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 6(85). С. 92–100.
 19. *Ковалевский Н.П., Томшина Т.В.* Проблема оценки качества информации, полученной с помощью оптико-электронной бортовой аппаратуры дистанционного зондирования Земли // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 6(85). С. 20–25.
 20. *Бажанов Б.Л., Крылов О.А.* Некоторые аспекты повышения производительности автоматических космических аппаратов наблюдения поверхности Земли // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 6(85). С. 77–80.
 21. *Матвеев Ю.А., Ламзин В.В.* Оптимизация параметров космической системы дистанционного зондирования Земли с учетом особенностей проектно-конструкторских решений космических аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 6. С. 55–66.
 22. *Шевченко С.Н.* Метод обоснования программ модернизации космических аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2020. № 1(47). С. 24–28.
 23. *Золотой С.А.* Методические основы научного сопровождения процессов создания космических систем дистанционного зондирования Земли // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 1(35). С. 83–86.
 24. *Матвеев Ю.А., Ламзин В.А., Ламзин В.В.* Основы проектирования модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. – М.: Изд-во МАИ, 2015. – 176 с.
 25. *Занин К.А., Москатиньев И.В.* Основные направления развития зарубежных оптико-электронных космических систем дистанционного зондирования Земли (обзор) // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2019. № 2(44). С. 28–36. DOI: 10.26162/LS.2019.44.2.003
 26. *Brender M.* GeoEye-1 The Next-Generation Imagery // GIS DEVELOPMENT. 2007. Vol. 11. No. 7, pp. 58–59.
 27. *Херринг Ч.* Спутник WorldView-2 – новая веха в развитии технологий дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2010. № 2. С. 28–32.
 28. *Cook M.K., Peterson B.A., Dial G., Gibson L., Gerlach F.W., Hutchins K.S., Kudola R., Bowen H.S.* IKONOS technical performance assessment // Proceedings SPIE 2001. Vol. 4381. DOI: 10.1117/12.436997
 29. *Ламзин В.А., Ламзин В.В.* Метод прогнозирования характеристик перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с оптико-электронной съемочной аппаратурой // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28, № 3. С. 95–12. DOI: 10.34759/vst-2021-2-95-112
 30. *Бакланов А.И., Блинов В.Д., Горбунов И.А.* и др. Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс-ПМ» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15. № 2. С. 30–35. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-30-35
 31. *Ламзин В.В.* Исследование характеристик оптико-электронной космической системы дистанционного зондирования Земли при модернизации в планируемый период // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 5. С. 46–55.
 32. *Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Панченко В.А.* и др. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли // Труды МФТИ, 2009. Т. 1. № 3. С. 15–23.
 33. *Горелов В.А., Лукашевич Е.Л., Стрельцов В.А.* Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. 2002. №№ 4, 5. 2003. №№ 1, 2.
 34. *Фортескью П., Суайнерд Г., Д. Старк Д.* (ред.) Разработка систем космических аппаратов: Пер. с англ. – М.: Альпина Паблишер, 2015. – 765 с.
 35. *Costes V., Cassar G., Escarrat L., Conseil S.* Optical design of a compact telescope for the next generation Earth observation system // International Conference on Space Optics – ICSO 2012 (20 November 2012; Ajaccio-Corsica, France). DOI: 10.1117/12/2309055

References

1. Baklanov A.I. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2010, no. 2(22), pp. 80–91.
2. Astashkin A.A., Karelin A.V., Kuz'min Yu.A. et al. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM*, 2018, vol. 165, no. 4, pp. 9–19.
3. Grishin A.V., Dedus F.F., Istomina M.I. et al. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2015, no. 6 (85), pp. 5–10.
4. Astashkin A.A., Karelin A.V., Komissarova I.N. et al. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2015, no. 6 (85), pp. 5–10.
5. Baklanov A.I. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2018, vol. 5, no. 3, pp. 17–28. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.17.28
6. Baklanov A.I. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2018, vol. 5, no. 4, pp. 14–27. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.4.14.27
7. Arkhipov S.A. *Informatsiya i Kosmos*, 2016, no. 3, pp. 153–160.
8. Zhang J., Yan J., Ma Y., Xu D., Li P., Jie W. Infrastructures and services for remote sensing data production management across multiple satellite data centers. *Cluster Computing*, 2016, vol. 19, pp. 1243–1260. DOI: 0.1007/s10586-016-0577-6
9. Chi M., Plaza A., Benediktsson J.A., Sun Z., Shen J., Zhu Y. Big data for remote sensing: challenges and opportunities. *Proceedings of the IEEE*, 2016, vol. 104, no. 11, pp. 2207–2219. DOI: 10.1109/jproc. 2016. 2598228
10. Chen L., Ma Y., Liu P., Wei J., Jie W., He J. A review of parallel computing for large-scale remote sensing image mosaicking. *Cluster Computing*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 517–529. DOI: 10.1007/s10586-015-0422-3
11. Arnaud M., Boissin B., Perret L., Boussarie E., Gleyzes A. The Pleiades High Resolution Program. *57th International Astronautical Congress IAC/IAF/IAA (2-6 October 2006; Valencia, Spain)*. DOI: 10.2514/6.IAC-06-B1.1.04
12. Gleyzes A., Perret L. Pleiades high resolution optical Earth Observation system status and future missions preparation in the frame of CXCI CNES program. *64th International Astronautical Congress (23–27 September 2013; Beijing, China)*. IAC-13,B1, 2,2,x16915.brief.pdf
13. Ming L. Remote sensing satellite planning in Chinese National Space infrastructure for next eight years. *68th International Astronautical Congress (25–29 September 2017; Adelaide, Australia)*. IAC-13-B1.2.1.
14. Abdurakhimov A.A., Balandin V.N., Levandovich A.V. *Informatsiya i Kosmos*, 2016, no. 3, pp. 153–160.
15. Pirogova A.M., Priklonskii V.I., Fedotov A.P. et al. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2015, no. 6(85), pp. 101–105.
16. Stratilatova N.N., Kurenkov V.I., Kucherov A.S. et al. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 80–89. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-80-89
17. Pirogova A.M., Priklonskii V.I., Chernenko E.N. et al. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2014, no. 5(78), pp. 37–42.
18. Borisov A.V., Emel'yanov A.A., Silin B.G. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2015, no. 6(85), pp. 92–100.
19. Kovalevskii N.P., Tomshina T.V. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2015, no. 6(85), pp. 20–25.
20. Bazhanov B.L., Krylov O.A. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2015, no. 6(85), pp. 77–80.
21. Matveev Y.A., Lamzin V.V. Optimization of parameters of earth remote sensing space system taking into account the features of spacecraft designer decisions. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 6, pp. 55–66.
22. Shevchenko S.N. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2020, no. 1(47), pp. 24–28.
23. Zolotoi S.A. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2017, no. 1(35), pp. 83–86.
24. Matveev Yu.A., Lamzin V.A., Lamzin V.V. *Osnovy proektirovaniya modifikatsii kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Design Basis of Remote Earth Probing Spacecraft Modifications)*, Moscow, MAI, 2015, 176 p.
25. Zanin K.A., Moskatin'ev I.V. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2019, no. 2(44), pp. 28–36. DOI: 10.26162/LS.2019.44.2.003
26. Brender M. GeoEye-1 The Next-Generation Imagery. *GIS DEVELOPMENT*, 2007, vol. 11, no. 7, pp. 58–59.
27. Herring Ch. At the Tipping Point. How DigitaleGlobe's Latest Satellite Launch is Breaking Down Barriers. *Imaging Notes*, 2010, vol. 25, no. 1, www.imagingnotes.com
28. Cook M.K., Peterson B.A., Dial G., Gibson L., Gerlach F.W., Hutchins K.S., Kudola R., Bowen H.S. IKONOS technical performance assessment. *Proceedings SPIE*, 2001, vol. 4381. DOI: 10.1117/12.436997
29. Lamzin V.A., Lamzin V.V. Method for characteristics predicting of prospective earth probing spacecraft with optoelectronic imaging hardware. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 3, pp. 95–112. DOI: 10.34759/vst-2021-2-95-112
30. Baklanov A.I., Blinov V.D., Gorbunov I.A. et al. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S.P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 30–35. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-30-35
31. Lamzin V.V. A performance investigation for optical-electronic Earth remote sensing system during planned upgrade. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 5, pp. 46–55.

32. Sevast'yanov N.N., Branets V.N., Panchenko V.A. et al. *Trudy MFTI*, 2009, vol. 1, no. 3, pp. 15–23.
33. Gorelov V.A., Lukashevich E.L., Strel'tsov V.A. *Informatsionnyi byulleten' GIS-Assotsiatsii*, 2002, no. 4, 5, 2003, no. 1, 2.
34. Fortescue P., Swinerd G., Stark J. *Spacecraft Systems Engineering*. 4th Ed. Wiley, 2011, 728 p.
35. Costes V., Cassar G., Escarrat L., Conseil S. Optical design of a compact telescope for the next generation Earth observation system. *International Conference on Space Optics – ICSO 2012 (20 November 2017; Ajaccio-Corsica, France)*. DOI: 10.1117/12/2309055

Статья поступила в редакцию 02.11.2021; одобрена после рецензирования 05.11.2021; принята к публикации 05.11.2021.

The article was submitted on 02.11.2021; approved after reviewing on 05.11.2021; accepted for publication on 05.11.2021.