

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ В ПЛАНИРУЕМЫЙ ПЕРИОД

Владимир Владимирович ЛАМЗИН родился в 1981 г. в городе Москве. Научный сотрудник МАИ. Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области проектирования КА дистанционного зондирования. Автор 18 научных работ. E-mail: matveev_ya@mail.ru

Vladimir V. LAMZIN, Ph.D., was born in 1981, in Moscow. He is Scientist at the MAI. His research interests are in remote sensing spacecraft design. He has published 18 technical papers. E-mail: matveev_ya@mail.ru

Исследуется влияние параметров космической системы дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) и программы реализации проекта на технико-экономические характеристики. Полученные на модельном примере результаты исследований КС ДЗЗ могут служить основой для детального анализа существующих и перспективных КС ДЗЗ.

The influence of parameters and realization project program for techno-economic characteristic of Earth remote sensing (ERS) space system are researched. An example is given to demonstrate effective updating process for the some ERS space systems.

Ключевые слова: оптико-электронная космическая система, космический аппарат, дистанционное зондирование, разрешение, планируемый период.

Key words: optical-electronic space system, spacecraft, remote sensing, resolution, planned period.

При появлении новых целевых задач, повышении требований к качеству информационного обеспечения возникает проблема модернизации космической системы дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) — внесение изменений (доработки) в базовую систему с целью повышения её технико-экономической эффективности при новых условиях использования. При модернизации созданной ранее базовой КС ДЗЗ повышение эффективности системы связано в основном с созданием модификаций КА [1]. На характеристики КС ДЗЗ влияют структура и параметры подсистем КС ДЗЗ, а также особенности реализации проекта (число, последовательность и сроки выведения КА, время активного существования).

В статье рассматривается задача комплексной оптимизации параметров КС ДЗЗ при модернизации и программы реализации проекта системы в планируемый период, исследуется влияние параметров КА и программы реализации проекта на основные выходные показатели: суммарные затраты на проект и информационную производительность.

В качестве объекта модернизации была выбрана КС ДЗЗ на базе КА с оптико-электронной целевой съемочной системой. При формировании исходных данных использовались известные показатели прототипа КС ДЗЗ [2].

Предполагается, что базовая КС ДЗЗ состоит из одного КА с оптико-электронной целевой съемоч-

ной системой (ЦСС) видимого и ближнего теплового диапазонов на борту и решает ряд целевых задач: тематического картографирования, сельского и лесного хозяйства. Задачи и требуемые рабочие диапазоны электромагнитных волн приведены на рис. 1.

- уменьшение вчетверо периодичности зондирования объектов (районов) в спектральных диапазонах: 0,54—0,59, 0,63—0,68 и 0,79—0,90 мкм;
- увеличение впятеро информационной производительности системы;

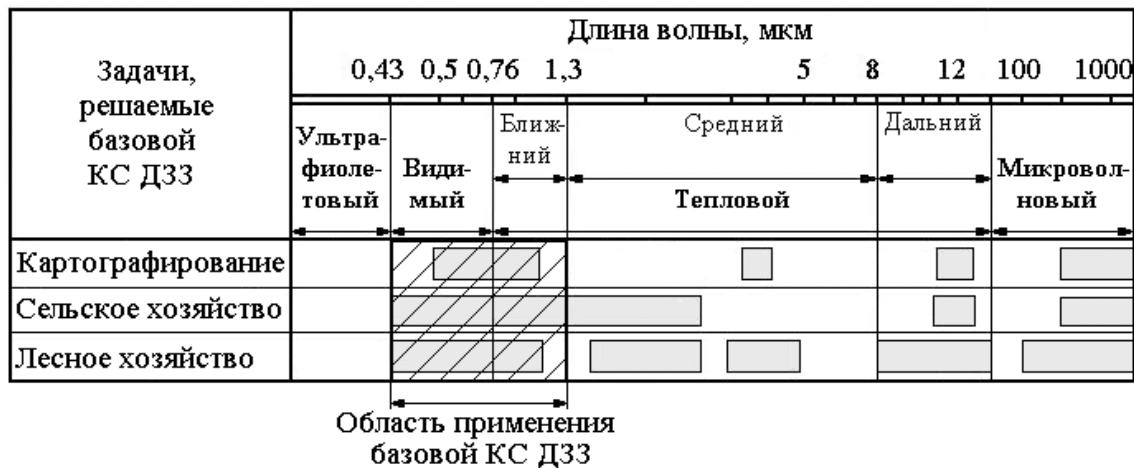


Рис. 1. Задачи и требуемые рабочие диапазоны электромагнитных волн

1. Формирование исходных данных на проект модернизации базовой КС ДЗЗ

Рассматривается модельная задача в предположении, что дополнительными целевыми задачами КС ДЗЗ при модернизации являются:

- контроль чрезвычайных ситуаций, экологический мониторинг, геология, землеустройство и гидрология;

- проведение спектрально-зональной съёмки в панхроматическом (П) и мультиспектральном (М) диапазонах для увеличения количества решаемых задач;
- проведение гиперспектральной съёмки для решения задач геологии, сельского и водного хозяйства.

Область применения КС ДЗЗ при модернизации приведена на рис. 2.

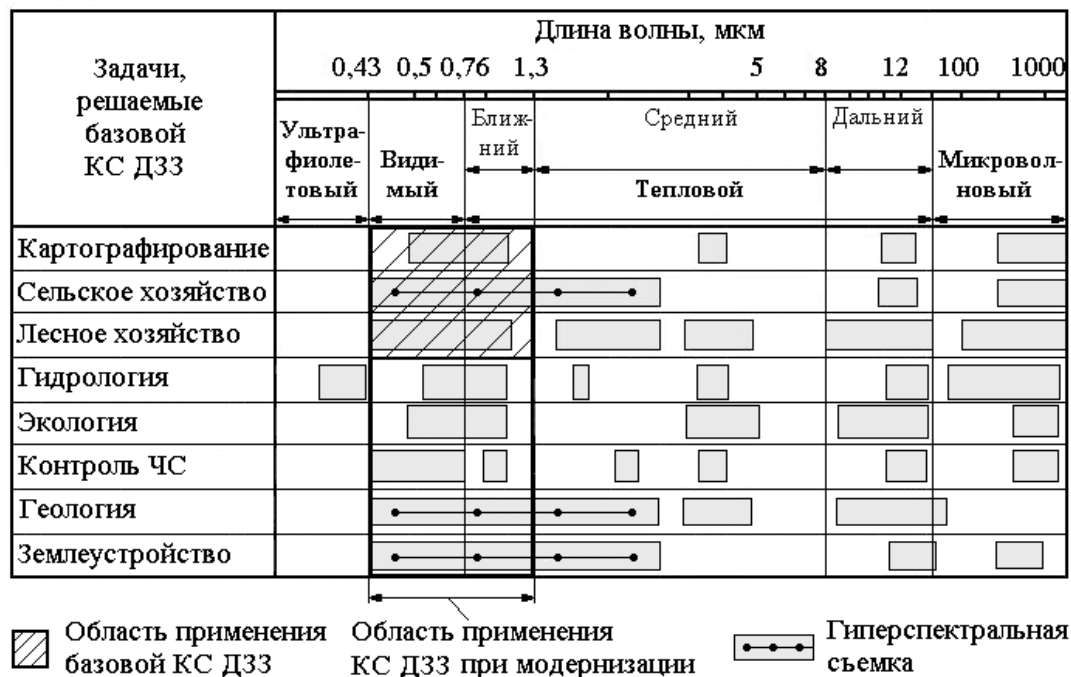


Рис. 2. Задачи и требуемые рабочие диапазоны электромагнитных волн

Проведенный по существующим и перспективным прототипам [3–5] предварительный анализ показал, что для решения поставленных задач КС ДЗЗ при модернизации целевая аппаратура КА должна включать съемочные системы: панхроматическую (ПСС), гиперспектральную (ГСС), стереозональную (СЗС), комбинированную (КСС) и широкозахватную мультиспектральную (ШМС). Основные характеристики съемочных систем КА при модернизации КС ДЗЗ приведены в табл. 1.

расположенных в одной плоскости солнечно-синхронной орбиты (ССО) и фазированные под углом 45° (рис. 3).

По аналогии с прототипом [3] целевая аппаратура каждого КА включает два типа целевой съемочной системы (ЦСС). Варианты ЦСС для КА приведены в табл. 2. Выбор вариантов ЦСС определяется по аналогии с прототипом и требуемыми значениями периодичности наблюдения, простран-

Таблица 1

Состав и основные характеристики съемочных систем КА

Наименование съемочной системы	Количество спектральных зон $N_{\text{кан}}$	Спектральный диапазон $\Delta\lambda$, мкм	Разрешение R (проекция элемента в надир), м	Полоса захвата ΔL , км
ПСС	1	0,51-0,85	2	22
КСС	5	0,51-0,85(П)	0,79 (П)	18,5
		0,45-0,52	3,1 (М)	
СЗС	5	0,54-0,59	2 (П)	22
		0,63-0,68	5 (П)	44
		0,79-0,90	4 (М)	22
ГСС	≥ 72	0,4-1,75	30	30
ШМС	3	0,54-0,59	20	160
		0,63-0,68		
		0,79-0,90		

Для выполнения требования по уменьшению вчетверо периодичности зондирования объектов (районов) в заданных спектральных диапазонах космический сегмент КС ДЗЗ включает четыре КА,

своего разрешения и ограничением на выводимую массу КА.

Требования к КА при модернизации КС ДЗЗ по условиям функционирования и обобщенным характеристикам (тип и параметры орбиты: высота $H_{КА}$ и наклонение $i_{КА}$, масса КА $M_{КА}$) аналогичны требованиям к КА базовой системы:

- орбита КА — солнечно-синхронная (ССО);
- параметры ССО: высота $H_{КА} = 542$ км, наклонение $i_{КА} = 97,54^\circ$;
- срок активного существования КА $T_{САС} = 5$ лет;
- масса КА $M_{КА} \leq 990$ кг;

Таблица 2

Варианты ЦСС для КА

Космический аппарат	Тип съемочной системы	
	I	II
№ 1	ПСС	ШМС
№ 2	ГСС	ШМС
№ 3	СЗС	ШМС
№ 4	КСС	ШМС

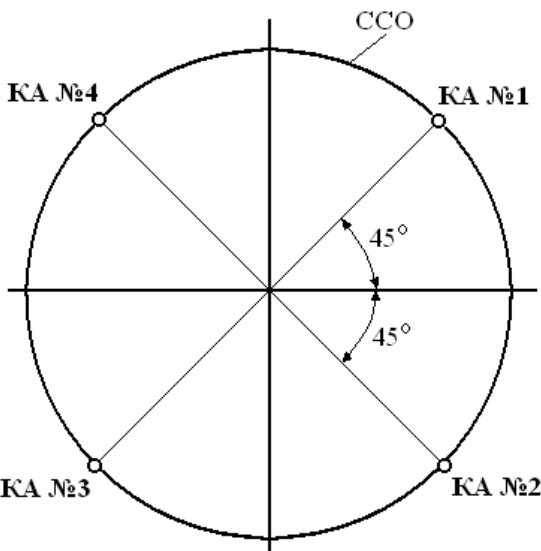


Рис. 3. Расположение КА на орбите

- требования по надежности КА: вероятность безотказной работы КА в течение $T_{CAC} P_{KA} \leq 0,9$;
- информационная производительность $I_{DP} \geq 25$ тыс. км²/сеанс связи с НКПОР;
- выводение КА — попутное или с использованием РН легкого класса.

Состав КС ДЗЗ при модернизации аналогичен составу базовой системы и представляется в виде комплекса основных подсистем (космического и наземного сегментов), подлежащих дальнейшему анализу (рис. 4).

В состав космического (орбитального) сегмента входят космические аппараты, состоящие из двух модулей. Первый модуль — целевая аппаратура (МЦА), второй — унифицированная служебная платформа (УСП). Такое решение позволяет повысить эффективность КС ДЗЗ при ограниченных затратах в основном за счет снижения затрат на разработку. Наземный сегмент включает ракетно-космический комплекс (РКК*) из состава которого выведен КА, наземный комплекс управления (НКУ) и наземный комплекс приема, обработки и распространения информации (НКПОР).

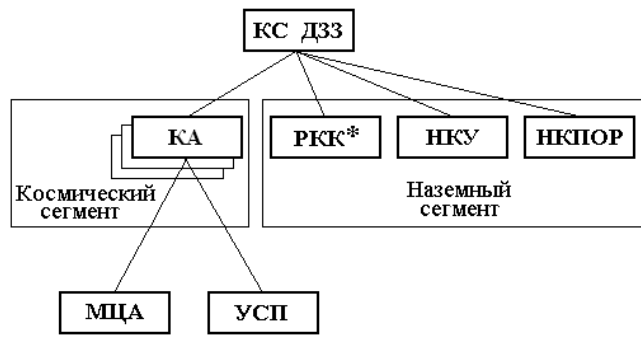


Рис. 4. Состав КС ДЗЗ при модернизации

Граф процесса реализации проекта создания КС ДЗЗ, когда в составе космического сегмента один КА, приведен на рис. 5.

Этапы работ включают разработку и создание (изготовление) подсистем КА (МЦА и УСП) и КА в целом, доработку подсистем наземного сегмента (технического комплекса (ТК) КА из состава РКК*, НКУ и НКПОР), ввод в эксплуатацию (выведение на орбиту функционирования) и эксплуатацию КА в планируемый период.

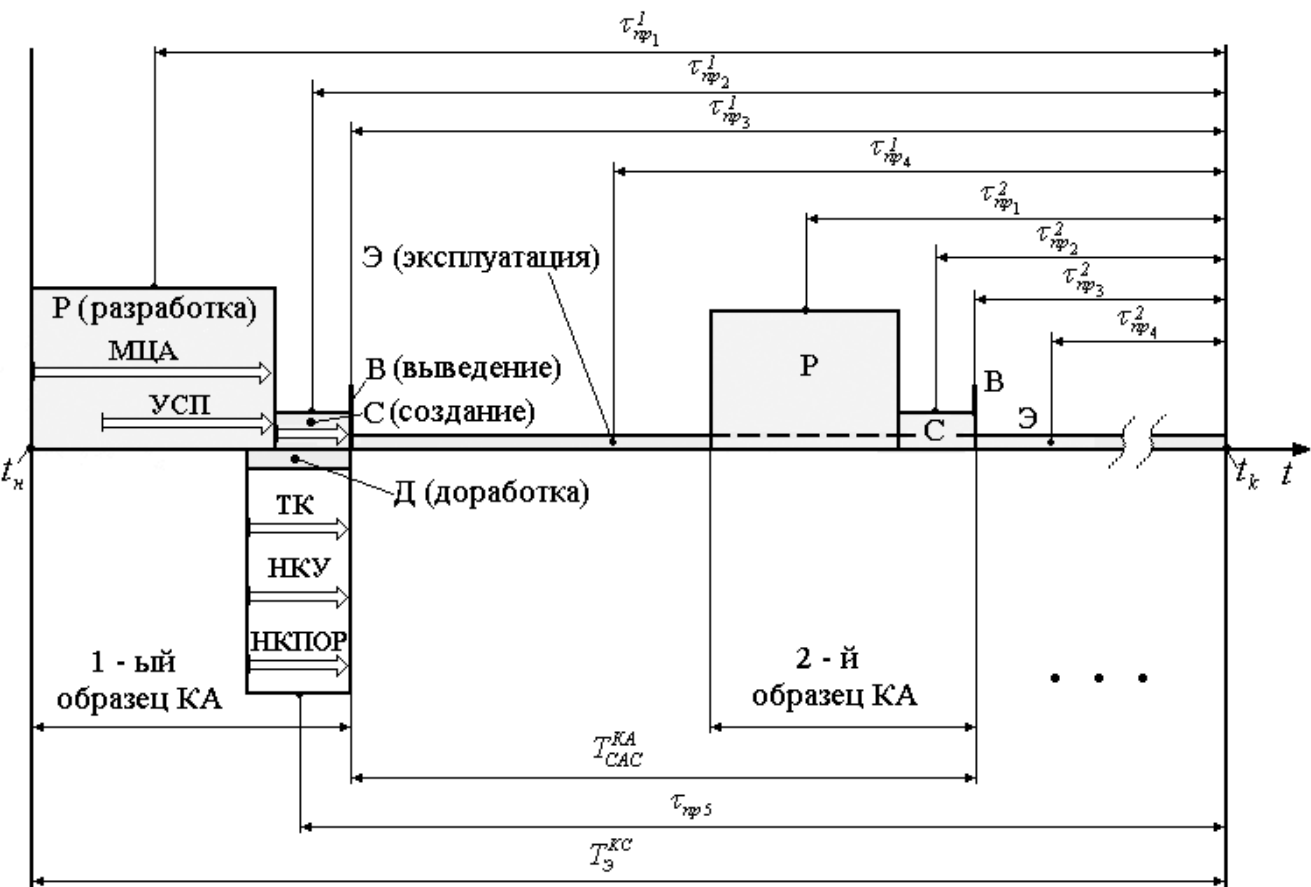


Рис. 5. Граф процесса реализации проекта создания КС ДЗЗ:

t_n, t_k — время начала и окончания реализации проекта; $\tau_{прj}^i$ — время приведения затрат j -го этапа работ для k -го образца КА ($k = \overline{1, N_{KA}}$; $j = \overline{1, 5}$); T_{CAC}^{KA} — срок активного существования КА; T_3^{KC} — срок реализации проекта

2. Постановка задачи исследования

При модернизации КС ДЗЗ проводится замена подсистем с целью повышения эффективности всей системы. Проектные исследования модернизации системы связаны с определением рационального состава заменяемых подсистем и их параметров с тем, чтобы обеспечить требуемый уровень эффективности выполнения функциональных задач системой с минимальными затратами на её модернизацию. В случае, когда параметры наземного сегмента заданы, проводится замена базового варианта КА на его модификации и комплексный проектный анализ характеристик системы и модификаций КА, программы реализации проекта в планируемый период.

При постановке задачи рассматривается двухуровневая проектная модель КС ДЗЗ [6]. При оценке характеристик системы на верхнем $i-1$ -м уровне управления разработкой КА рассматривается как объект, включающий два модуля — МЦА и УСП. На нижнем i -м уровне управления разработкой проводится детальный проектный анализ модуля МЦА с учетом особенностей его целевой съемочной системы.

Задача комплексной оптимизации параметров КС ДЗЗ при модернизации и процесса реализации проекта в планируемый период решается на $i-1$ -м уровне управления разработкой и представляется в следующем виде: при заданных параметрах наземного сегмента $\Pi_{HC}(t)$, целевой нагрузке $\Pi(t)$ оп-ределить характеристики заменяемых подсистем космического сегмента $\Pi_{KC}(t)$ (модификаций КА) и программу реализации проекта $PR(t)$, такие, чтобы приведенные суммарные затраты на создание

КС ДЗЗ при модернизации $C_{\Sigma KC}$ были минимальными:

$$C_{\Sigma KC}^M(i-1, \Pi_{KC}^M(t), PR(t), \beta(t_{np})) \rightarrow \min$$

при $i-1, \Pi_{KC}^M, PR(t) \in G_{KC}^M(t_{np});$

$$I_{PP}^{M(i-1)}(i-1, \Pi_{KC}^M(t), \Pi^M(t)) \geq I_{PP}^{M(i-1)sd};$$

$$\mathcal{E}_{KC}^M(I_{PP}^{M(i-1)}(i-1, \Pi_{KC}^M(\cdot), \dots)) \geq \mathcal{E}_{KC}^{Msd}; \quad P_{KC}^{M(i-1)}(\cdot) \geq P_{KC}^{M(i-1)sd};$$

$$M_{KA}^{M(i-1)}(\cdot) \leq M_{KA}^{M(i-1)sd}; \quad \Pi_{HC}^{(i-1)}(t) = \Pi_{HC}^{(i-1)sd}(t);$$

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

где $C_{\Sigma KC}^M(\cdot)$ — суммарные затраты на модернизацию (индекс M) КС ДЗЗ в планируемый период; $i-1, \Pi_{KC}^M(t)$ — функция, определяющая состав заменяемых подсистем и параметры заменяемых подсистем на $i-1$ -м уровне управления разработкой; $\beta(t_{np})$ — коэффициенты стоимостных зависимостей; t_{np} — время прогнозирования; $\Pi^M(t)$ — требования к целевой информации при модернизации системы; $\mathcal{E}_{KC}^M(\cdot)$ — целевая эффективность при модернизации КС ДЗЗ; $I_{PP}^{M(i-1)}(i-1, \Pi_{KC}^M(\cdot), P_{KC}^{M(i-1)}(\cdot))$ — соответственно функции, определяющие информационную производительность и надежность КС ДЗЗ при модернизации на $i-1$ -м уровне управления разработкой; $M_{KA}^{M(i-1)}(\cdot), \Gamma_{KA}^{M(i-1)}(\cdot)$ — соответственно

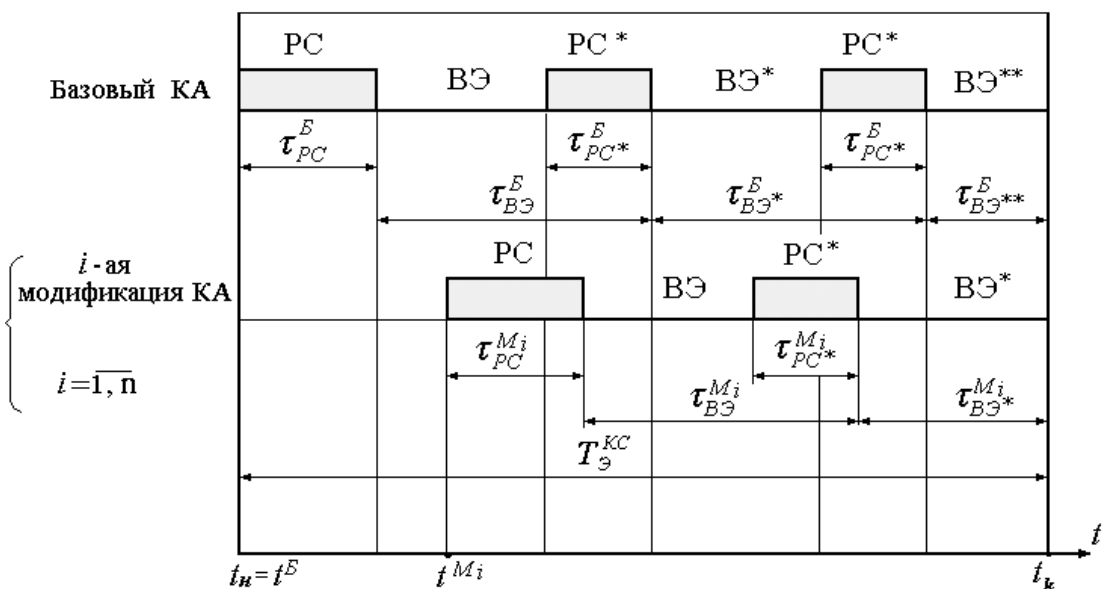


Рис. 6. Граф процесса реализации проекта исследуемой КС ДЗЗ при модернизации в планируемый период

масса и габаритные размеры КА на i -1-м уровне управления разработкой при модернизации системы;

$\Pi_{КС}^{B(i-1)}(t)$ — функция, определяющая параметры базовых подсистем; T^M и T — соответственно временной интервал модернизации системы и существования (планируемый период разработки и создания) базовой системы; индекс «эд» — заданные (требуемые) значения параметров или функций.

При формировании соответствующих проектных моделей рассматриваемой задачи проводится «деформация» проектных моделей основной задачи проектирования [6] с учетом особенностей заменяемых подсистем. На рис. 6 приведен граф (программа) процесса реализации проекта исследуемой КС ДЗЗ при модернизации в планируемый период. Этапы работ для первых образцов КА вклю-

чают: РС — разработку и создание, ВЭ — выведение и эксплуатацию. Этапы работ для последующих образцов КА обозначены индексом (*). Длительность этапов τ для базового КА обозначены индексом Б, для i -й модификации КА ($i = \overline{1, n}$, где n — количество модификаций КА) — индексом M_i .

При оптимизации выбирается рациональная программа реализации проекта КС ДЗЗ, которая определяет сроки разработки, создания (изготовления) и эксплуатации объектов системы, число и сроки замены подсистем при модернизации системы.

3. Алгоритм решения задачи

Алгоритм комплексной оптимизации параметров КС ДЗЗ при модернизации и реализации проекта в планируемый период приведен на рис. 7. При

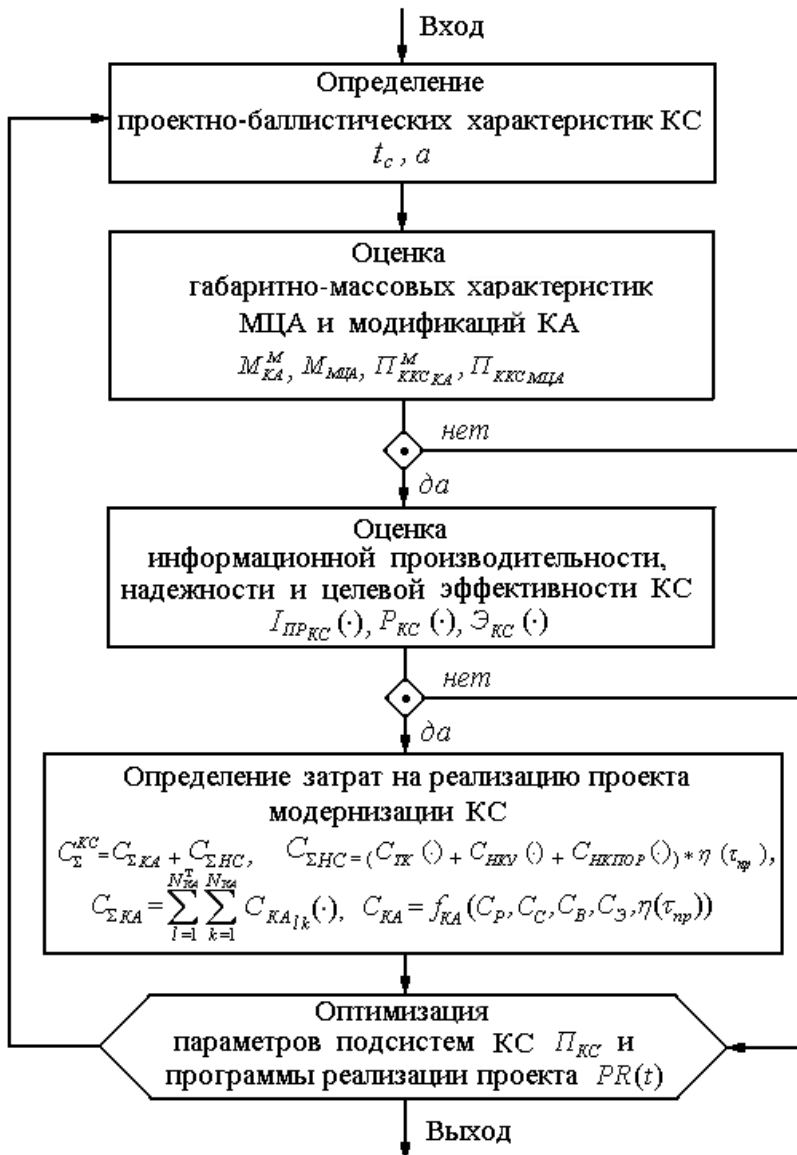


Рис. 7. Алгоритм комплексной оптимизации параметров КС ДЗЗ при модернизации и программы реализации проекта в планируемый период

решении задачи используется метод согласованного оптимизационного поиска, включающий направленную адаптацию проектных зависимостей верхнего уровня управления разработкой.

В блоке определения проектно-баллистических характеристик КС проводится расчет параметров космического сегмента $P_{КС}$; периодичности наблюдения t_C и полосы обзора a . В блоке оценки габаритно-массовых характеристик МЦА и модификаций КА проводится расчет обобщенных характеристик подсистемы КА (МЦА) и КА, — массы $M_{МЦА}$ и $M_{КА}^M$; параметров, определяющих конструктивно-компоновочную схему модуля МЦА и КА, — $P_{ККС_{МЦА}}$ и $P_{ККС_{КА}}^M$. В блоке оценки информационной производительности, надежности и целевой эффективности проводится соответственно расчет функций $I_{ПР_{КС}}(\cdot)$, $P_{КС}(\cdot)$ и $\mathcal{E}_{КС}(\cdot)$. В блоке определения затрат на реализацию проекта модернизации КС проводится расчет суммарных приведенных затрат на КА (разработка, создание, выведение и эксплуатация в течение срока активного существования КА в составе КС) $C_{\Sigma_{КА}}$, доработку подсистем наземного сегмента $C_{\Sigma_{НС}}$ и на проект КС ДЗЗ в целом $C_{\Sigma}^{КС}$. Блок оптимизации параметров подсистем КС и программы реализации проекта осуществляет процедуру случайного поиска — реализует направленный перебор параметров подсистем КС ДЗЗ

и программы реализации проекта $PR(t)$ при поиске их оптимального значения.

4. Результаты исследований технико-экономических характеристик оптико-электронной КС ДЗЗ при комплексной оптимизации параметров системы и процесса реализации проекта системы при модернизации в планируемый период

Для КС ДЗЗ в составе базового КА и трех его модификаций проведена комплексная оптимизация технико-экономических характеристик системы и программы реализации проекта в планируемый период с учетом влияния ограничений и условий реализации проекта. Исследование проводилось при варьировании следующих параметров:

- срока активного существования КА $T_{САС}$;
- срока реализации проекта $T_{\mathcal{E}}^{КС}$;
- способа вывода КА на орбиту (попутное выведение или единичный пуск РН);
- коэффициента отношения затрат на разработку $C_P^1(\cdot)$ и изготовление $C_C^1(\cdot)$ первого базового образца изделия k_P ($k_P = C_P^1(\cdot)/C_C^1(\cdot)$).

В результате исследований получена рациональная программа реализации проекта (граф процесса реализации проекта) КС ДЗЗ при модернизации (рис. 8).

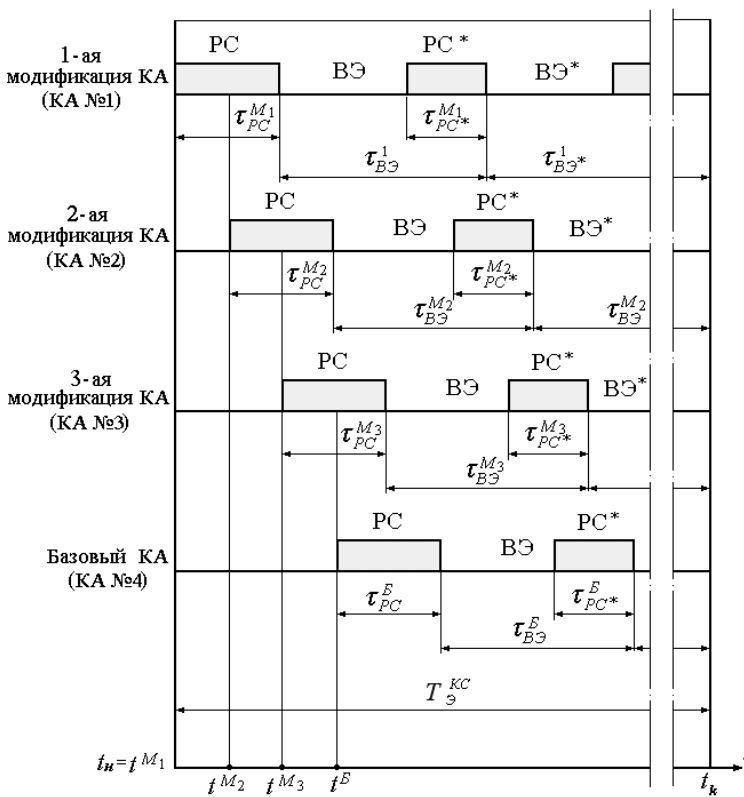


Рис. 8. Рациональная программа реализации проекта (граф процесса реализации проекта) КС ДЗЗ при модернизации

На рис. 9 и 10 приведены результаты исследований технико-экономических характеристик (приведенных затрат по этапам работ, суммарных при-

веденных затрат и информационной производительности) при попутном выведении КА и значениях $k_p = 6$, $T_{CAC} = 5$ лет. Результаты расчета суммарных приведенных затрат C_{Σ}^{KC} и требуемого

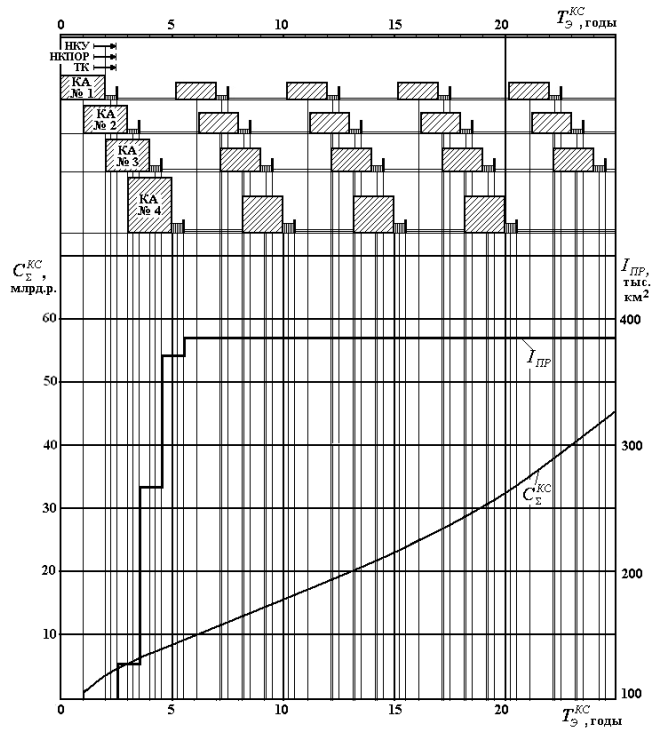
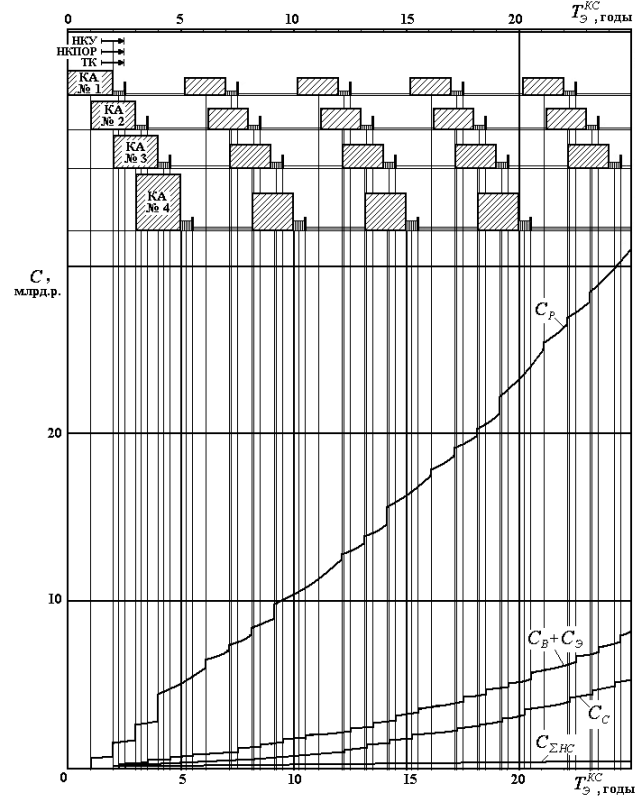


Рис. 9. Зависимость приведенных затрат по этапам работ (разработка — C_p , создание — C_c , выведение — C_b , эксплуатация — C_9 , доработка подсистем наземного сегмента — $C_{\Sigma НК}$) от срока реализации проекта T_9^{KC}

Рис. 10. Зависимость суммарных приведенных затрат C_{Σ}^{KC} и информационной производительности I_{IP} от срока реализации проекта T_9^{KC}

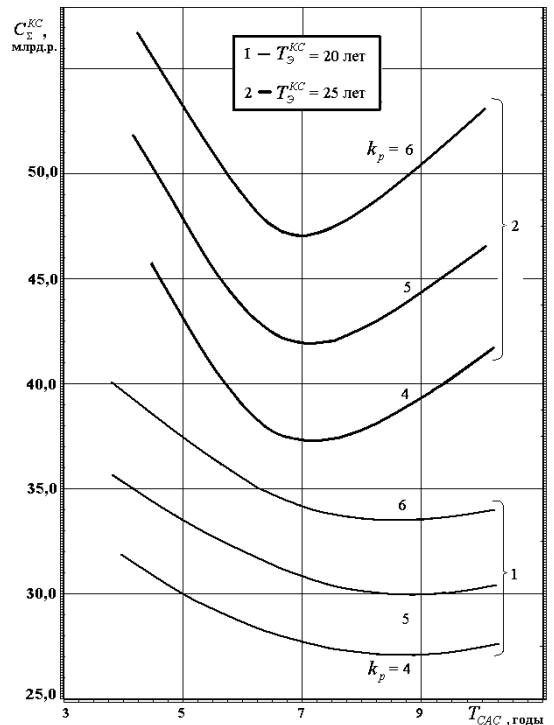
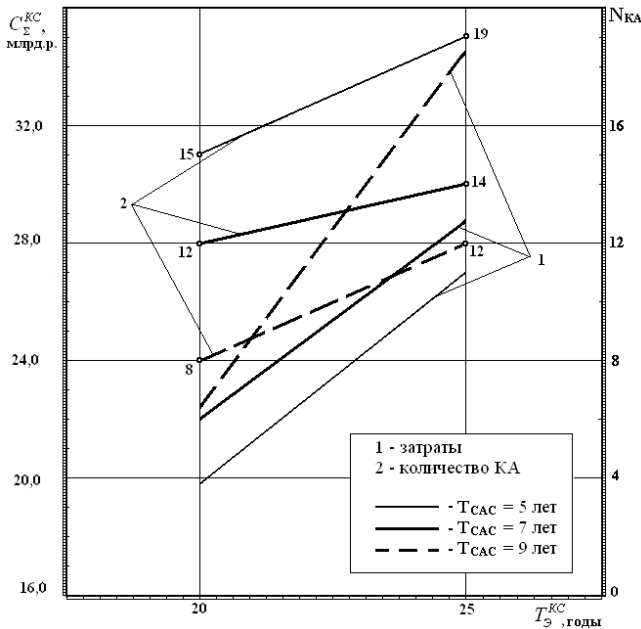


Рис. 11. Изменение суммарных приведенных затрат C_{Σ}^{KC} и требуемого числа КА N_{KA} в зависимости от срока реализации проекта T_9^{KC} при различных T_{CAC}

Рис. 12. Изменение суммарных приведенных затрат C_{Σ}^{KC} на реализацию проекта КС ДЗЗ (выведение КА — попутное)

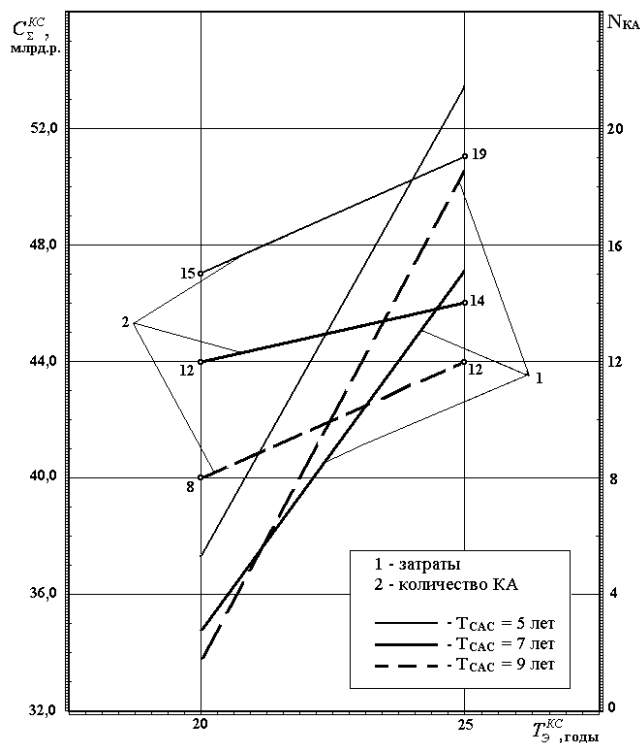


Рис. 13. Зависимость суммарных приведенных затрат C_{Σ}^{KC} и требуемого числа КА $N_{КА}$ от срока реализации проекта T_9^{KC} при различных T_{CAC}

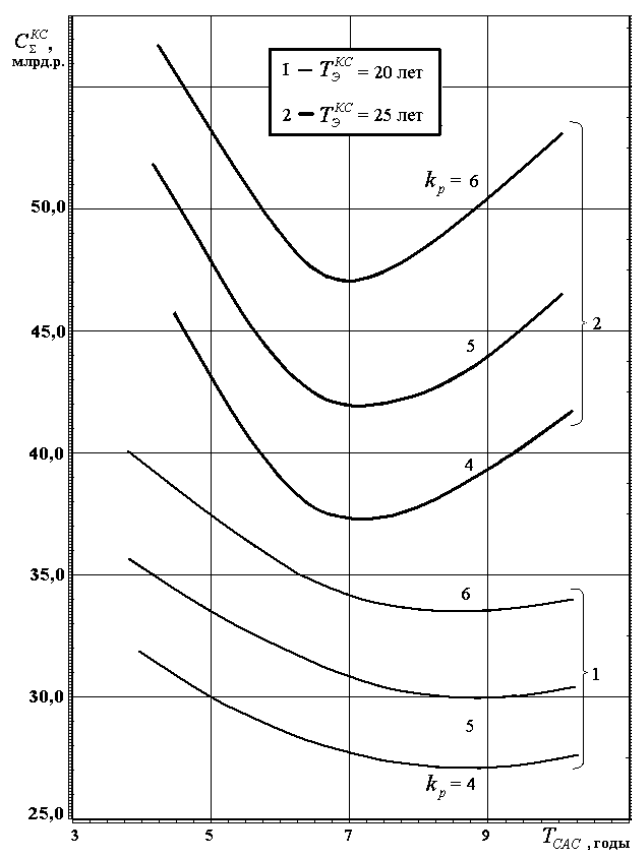


Рис. 14. Изменение суммарных приведенных затрат C_{Σ}^{KC} на реализацию проекта КС Д33 (выведение КА — единичной РН)

числа КА $N_{КА}$ в зависимости от срока реализации проекта T_9^{KC} при различных T_{CAC} приведены на рис. 11 (выведение КА — попутное).

Результаты расчета суммарных приведенных затрат на реализацию проекта КС Д33 (при сроке эксплуатации, равном 20 и 25 лет) для различных значений и при попутном выведении КА приведены на рис. 12.

Проведено исследование технико-экономических характеристик при выведении КА единичной РН (затраты на выведение C_{θ} каждого КА одинаковые).

Результаты расчета суммарных приведенных затрат C_{Σ}^{KC} и требуемого числа КА $N_{КА}$ в зависимости от срока реализации проекта T_9^{KC} при различных T_{CAC} приведены на рис. 13. Результаты расчета суммарных приведенных затрат C_{Σ}^{KC} на реализацию проекта КС Д33 (при сроке эксплуатации T_9^{KC} , равном 20 и 25 лет) для различных значений T_{CAC} и k_p при попутном выведении КА приведены на рис. 14.

Результаты расчёта суммарных приведенных затрат C_{Σ}^{KC} и информационной производительности I_{IP} в зависимости от количества КА в системе $N_{КА}^{KC}$ при $T_9^{KC} = 20$ лет приведены на рис. 15.

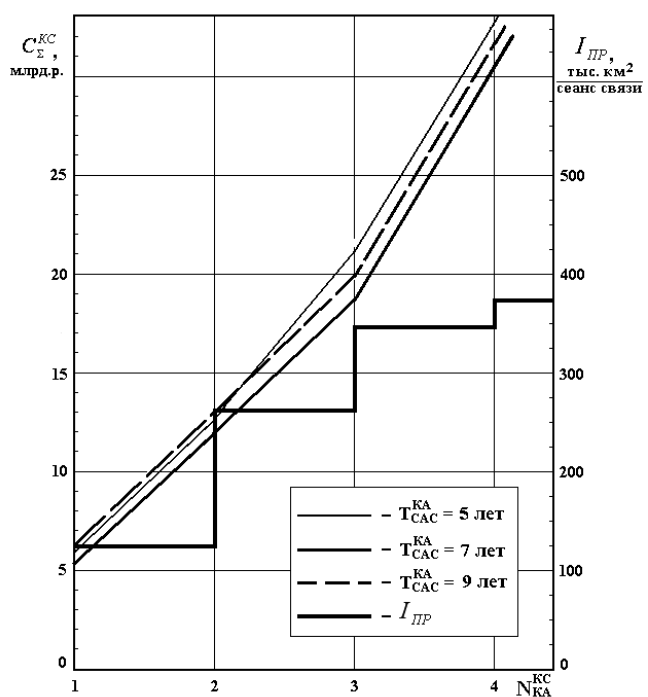


Рис. 15. Изменение суммарных приведенных затрат C_{Σ}^{KC} и информационной производительности I_{IP} от количества КА в системе $N_{КА}^{KC}$ ($T_9^{KC} = 20$ лет)

Выводы

Проведенная на модельном примере комплексная оценка параметров и программы реализации КС ДЗЗ в планируемый период показала, что при сроках активного существования КА (5 лет) и эксплуатации КС (20 лет) снижение суммарных приведенных затрат в зависимости от способа выведения КА (попутное или выведение единичной РН легкого класса) и коэффициента отношения затрат k_p на разработку и производство первого образца КА достигается уменьшением коэффициента k_p и реализацией попутного запуска КА (при уменьшении k_p в полтора раза затраты снижаются примерно на 17%); продление срока эксплуатации системы до 25 лет приводит к увеличению количества создаваемых КА примерно на 21%, а на величину относительного снижения затрат при разных способах запуска КА практически не влияет.

Срок активного существования (САС) КА в зависимости от способа его выведения и коэффициента отношения затрат k_p влияет на снижение количества создаваемых КА и суммарных приведенных затрат КС: для различных $k_p = 4, 5$ и 6 рациональное значение САС составляет при попутном выведении КА 7—9 лет; при выведении КА единичной РН легкого класса — 7 лет. Продление срока эксплуатации космической системы приводит к увеличению суммарных затрат.

Полученные на модельном примере результаты исследований КС ДЗЗ могут служить основой для детального анализа существующих и перспективных КС ДЗЗ с целью прогнозирования их развития, расширения области применения, продления сроков использования.

Работа выполнена в рамках реализации мероприятия 1.1 ФЦП «Научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. Госконтракт 02.740.11.0471 от 30.09.2009 г.

Библиографический список

1. Ламзин В.В., Ламзин В.А. Вопросы развития и повышения эффективности космических систем дистанционного зондирования Земли. К.Э. Циолковский и современность // Труды XLII Научных чтений, посвященных разработке творческого наследия К.Э. Циолковского, Калуга, 2007. С. 176—177.
2. Глазкова И., Михеев О., Панфилов А., Положищев Н., Хатулев В. и др. Малый космический аппарат ДЗЗ «Монитор-Э» и дальнейшее развитие аппаратов этого типа // Труды 4-й Международной конференции-выставки «Малые спутники, новые технологии, миниатюризация, области эффективного применения в XXI веке». Королев, 2004. С. 245—253.
3. Глазкова И., Нестеренко А. Система ДЗЗ на основе малых КА // Аэрокосмический курьер. 2005. №1. С. 24—25.
4. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Космические системы дистанционного зондирования Земли: состояние и перспективы развития // Полет. 2007. № 5. С. 31—37.
5. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. — М.: Издательство А и Б, 1997.
6. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Модернизация космических систем дистанционного зондирования Земли при наличии ограничений // Полет. 2007. № 10. С. 11—16.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 20.11.2009