

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

---

Юрий Александрович МАТВЕЕВ родился в 1942 г. в городе Чите. Декан МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области проектирования и управления разработками РКТ. Автор более 100 научных работ. E-mail: matveev\_ya@mail.ru

Yury A. MATVEYEV, D.Sci., was born in 1942, in Chita. He is Dean of a School at the MAI. His research interests are in design and project management for spacecraft and rockets. He has published over 100 technical papers. E-mail: matveev\_ya@mail.ru

---

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

---

*Представлена методика для сравнительного технико-экономического анализа альтернативных проектных решений космических систем дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ). Методика позволяет определить влияние внешних и внутренних факторов на суммарные затраты при реализации проекта КС ДЗЗ.*

*The method is considered for comparative techno-economic alternative analysis of project solution Earth remote sensing (ERS) space systems. The method is allowed to define influence of external and internal parameters of summary cost ERS space systems.*

**Ключевые слова:** космическая система, космический аппарат, дистанционное зондирование, выбор параметров, эффективность.

**Key words:** space system, spacecraft, remote sensing, parameters choosing, effectiveness.

Высокая стоимость реализации перспективных космических систем дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) обуславливает повышенные требования к их технико-экономическим характеристикам и проведению комплекса работ по расширению их возможностей. Это требует дальнейшего совершенствования методических основ проектирования КС ДЗЗ. Анализ показывает, что при разработке перспективных КС ДЗЗ используется ком-

плекс проектных моделей, реализуется многоуровневое управление разработкой [1—4].

В статье при разработке методики оптимизации параметров КС ДЗЗ с учетом особенностей проектно-конструкторских решений (ПКР) космического аппарата (КА) реализуется двухуровневая проектная модель системы. Структура КС ДЗЗ приведена на рис. 1 и включает космический и наземный сегменты. Наземный сегмент включает ракетно-кос-

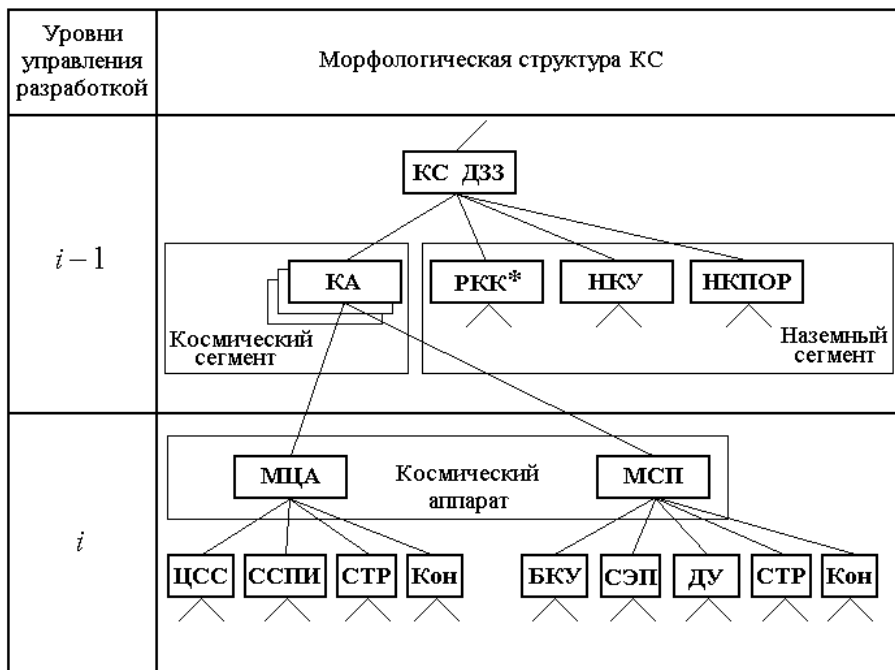


Рис. 1. Структура КС ДЗЗ

мический комплекс (РКК\*), наземный комплекс управления (НКУ) и наземный комплекс приема, обработки и распространения информации (НКПОР). При оценке характеристик системы на верхнем  $i-1$ -м уровне управления разработкой КА рассматривается как объект, включающий два модуля: служебных подсистем (МСП) и целевой аппаратуры (МЦА). На нижнем  $i$ -м уровне управления разработкой проводится детальный проектный анализ модулей МЦА и МСП с учетом особенностей их подсистем: целевой съемочной системы (ЦСС), системы сбора и передачи информации (ССПИ), бортового комплекса управления (БКУ), системы энергопитания (СЭП), двигательной установки (ДУ), системы терморегулирования (СТР) и конструкции (Кон).

Двухуровневая модель позволяет проводить:

- анализ вариантов создания КС ДЗЗ с учетом особенностей ПКР для КА и его подсистем (МЦА и МСП), а также обеспечить необходимую точность исследований системы;

- согласованную оптимизацию технико-экономических характеристик целого (КС ДЗЗ) и частей (КА, МЦА и МСП) с учетом динамики связей.

При этом используется метод и алгоритм согласованного оптимизационного поиска, включающий направленную адаптацию проектных зависимостей верхнего уровня.

В основу методики оптимизации положены базовые представления об относительности проектных моделей, о многоуровневом управлении разработкой и многоуровневой проектной модели, а

также реализация принципа рандомизации при формировании статистических проектных моделей.

#### Алгоритм проведения исследований и структура проектной модели

Схема оптимизации (оценки) параметров КА в составе КС ДЗЗ с учетом особенностей ПКР для КА (подсистем КА) при двухуровневой модели управления разработкой приведена на рис. 2.

Алгоритм проведения исследований включает последовательное решение трех главных задач:

задача 1 — оптимизация (оценка) параметров и программы реализации КС ДЗЗ в планируемый период;

задача 2 — оптимизация (оценка) параметров КА ДЗЗ (подсистем КА) при заданных функциональных и параметрических связях;

задача 3 — направленная адаптация проектной модели и управление согласованием решений с учетом особенностей ПКР для КА (подсистем КА).

Ниже рассмотрим постановки выделенных задач и алгоритмы их решения.

#### Задача оптимизации (оценки) параметров и программы реализации КС ДЗЗ в планируемый период ( $i-1$ -й уровень управления разработкой)

Облик КС ДЗЗ зависит от характера решаемых функциональных задач, целевой нагрузки  $\Pi(t)$  на систему в планируемый период, которая зависит от типа наблюдаемых объектов (районов) и состава решаемых задач. Если определены задачи ДЗЗ, то должны быть заданы координаты, площадь, усло-

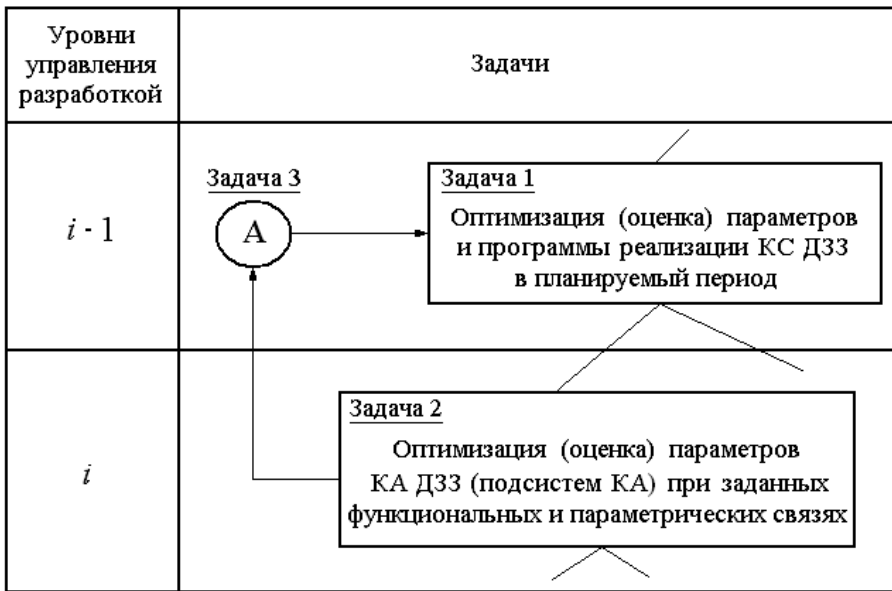


Рис. 2. Схема оптимизации (оценки) параметров КА в составе КС ДЗЗ с учетом особенностей ПКР для КА (подсистем КА) при двухуровневой модели управления разработкой

вия наблюдения объектов (районов), периодичность их зондирования и требуемое значение разрешения, получаемого при съемке целевой аппаратурой КА изображения заданных объектов (районов).

При определении облика КС ДЗЗ выбираются параметры космического (орбитального)  $\Pi_{КС}$  и наземного сегментов  $\Pi_{НС}$ , программа реализации проекта  $PR(t)$ .

Параметры  $\Pi_{КС}$  включают: количество КА в КС ДЗЗ —  $N_{КА}$ ; параметры орбиты —  $\bar{x}(H_k, i_k)$ ,  $k=1, N_{КА}$ ; обзорность снимаемого изображения, которая характеризуется полосой обзора  $a$ ; параметры КА —  $\Pi_{КА}$ . Параметры  $\Pi_{КА}$  при реализации модульного принципа создания КА включают:

- массу МЦА и служебных подсистем МСП —  $M_{МЦА}, M_{МСП}$ ;
- параметры, определяющие конструктивно-компоновочную схему модулей МЦА и МСП, —  $\Pi_{ККС_{МЦА}}, \Pi_{ККС_{МСП}}$ ;
- надежность подсистем КА ДЗЗ: модулей МЦА и МСП —  $P_{МЦА}, P_{МСП}$ .

В общем случае вектор  $\Pi_{НС}$  включает параметры ракетно-космического комплекса (РКК\*), наземного комплекса приема, обработки и распределения информации (НКПОР) и наземного комплекса управления (НКУ).

В случае, когда заданы параметры РКК\*, вектор  $\Pi_{НС}$  включает параметры НКПОР —  $\Pi_{НКПОР}$ ; параметры НКУ —  $\Pi_{НКУ}$ . Тогда задача оптимизации (оценки) параметров КС ДЗЗ ( $i-1$ -й уровень управления разработкой) формулируется в следующем виде:

при заданной целевой нагрузке  $\Pi(t)$  определить параметры КС ДЗЗ:

$$\begin{aligned}
 & i^{-1}\Pi_{КС}(N, \bar{x}(H, i), R, \Pi_{ККС_{МЦА}}, \Pi_{ККС_{МСП}}, \\
 & M_{МЦА}(\cdot), M_{МСП}(\cdot), P_{МЦА}(\cdot), P_{МСП}(\cdot)); \\
 & i^{-1}\Pi_{НС}(\Pi_{НКУ}, \Pi_{НКПОР})
 \end{aligned}$$

и программу реализации проекта  $PR(t)$ , такую, что

$$C_{КС_{\Sigma}}(i^{-1}\Pi_{КС}, i^{-1}\Pi_{НС}, PR(t), \beta(t_{np})) \rightarrow \min \quad (1)$$

при

$$i^{-1}\Pi_{КС}, i^{-1}\Pi_{НС}, PR(t) \in G_{КС}^{i-1}(t_{np}); \Pi_{РКК*} = \Pi_{РКК*}^{зд};$$

$$I_{ПР_{КС}}^{i-1}(i^{-1}\Pi_{ОС}, i^{-1}\Pi_{НКПОР}, \Pi(t)) \geq I_{ПР_{КС}}^{(i-1)зд};$$

$$\mathcal{E}_{КС}(I_{ПР_{КС}}^{i-1}(\cdot), \dots) \geq \mathcal{E}_{КС}^{зд}; P_{КС}^{i-1}(\cdot) \geq P_{КС}^{(i-1)зд};$$

$$M_{КА}^{i-1} = \sum_{l=1}^2 M_l^{КА(i-1)}(\cdot) \leq M_{КА}^{(i-1)зд}; t \in \langle T \rangle,$$

где  $C_{КС_{\Sigma}}(\cdot)$  — суммарные затраты на реализацию проекта в планируемый период — это затраты на разработку, создание (изготовление) подсистем, выведение КА и эксплуатацию подсистем КС ДЗЗ в планируемый период;  $\mathcal{E}_{КС}(\cdot)$  — целевая эффективность КС ДЗЗ, которая определяется рядом показателей ( $T_{наб} \leq T_{наб}^{зд}$  — периодичность наблюдения,

$N_{кан} \geq N_{кан}^{з\partial}$  — количество спектральных каналов,  $S_{ОБ} \geq S_{ОБ}^{з\partial}$  — обзорность,  $R_{кан_i} \leq R_{кан_i}^{з\partial}$  — разрешение (спектрального канала);  $I_{ПКК}^{i-1}(\cdot)$  — информационная производительность на  $i-1$ -м уровне управления разработкой;  $P_{КС}^{i-1}(\cdot)$  — функция, определяющая надежность КС ДЗЗ на  $i-1$ -м уровне управления разработкой;  $M_{КА}^{i-1}(\cdot)$  — масса КА ДЗЗ на  $i-1$ -м уровне управления разработкой;  $M_l^{КА(i-1)}(\cdot)$  — масса  $l$ -й подсистемы КА ДЗЗ на  $i-1$ -м уровне управления разработкой;  $\langle T \rangle$  — планируемый период;  $G_{КС}^{i-1}(t_{np})$  — область допустимых решений, определяемая функциональными связями (внешними и внутренними) на  $i-1$ -м уровне управления разработкой;  $\beta(t_{np})$  — определяющие параметры, коэффициенты стоимостных зависимостей, которые определяются на основе опытных данных;  $t_{np}$  — время прогнозирования;  $PR(t)$  — функция, определяющая программу реализации проекта — количество типов, сроки разработки, создания (изготовления) и

эксплуатации КА ДЗЗ, число и сроки их эксплуатации.

В качестве примера на рис. 3 приведен график процесса реализации проекта создания КС ДЗЗ и функция изменения затрат  $(\partial C / \partial t)^1$  для КА первого типа по этапам работ: разработки и создания (РС), выведения и эксплуатации (ВЭ). Показаны этапы работ и их продолжительность на заданном временном интервале — сроке реализации проекта  $T_{\Theta}^{КС}$ , причем, для первого образца КА каждого типа обозначение этапов РС и ВЭ, для других КА каждого типа — РС\* и ВЭ\*.

Полученные решения определяют параметрические и функциональные связи при проведении проектных исследований на нижнем ( $i$ -м) уровне управления разработкой. Особенностью задачи проектирования КС ДЗЗ является ее многопараметрический и многокритериальный характер. В общем случае из-за наличия случайных факторов  $(\beta(t_{np}), C(t))$  задача должна быть записана как стохастическая. Проблему представляет формирование соответствующей проектной модели — соотношений, определяющих целевую эффективность, информационную производительность, надежность и

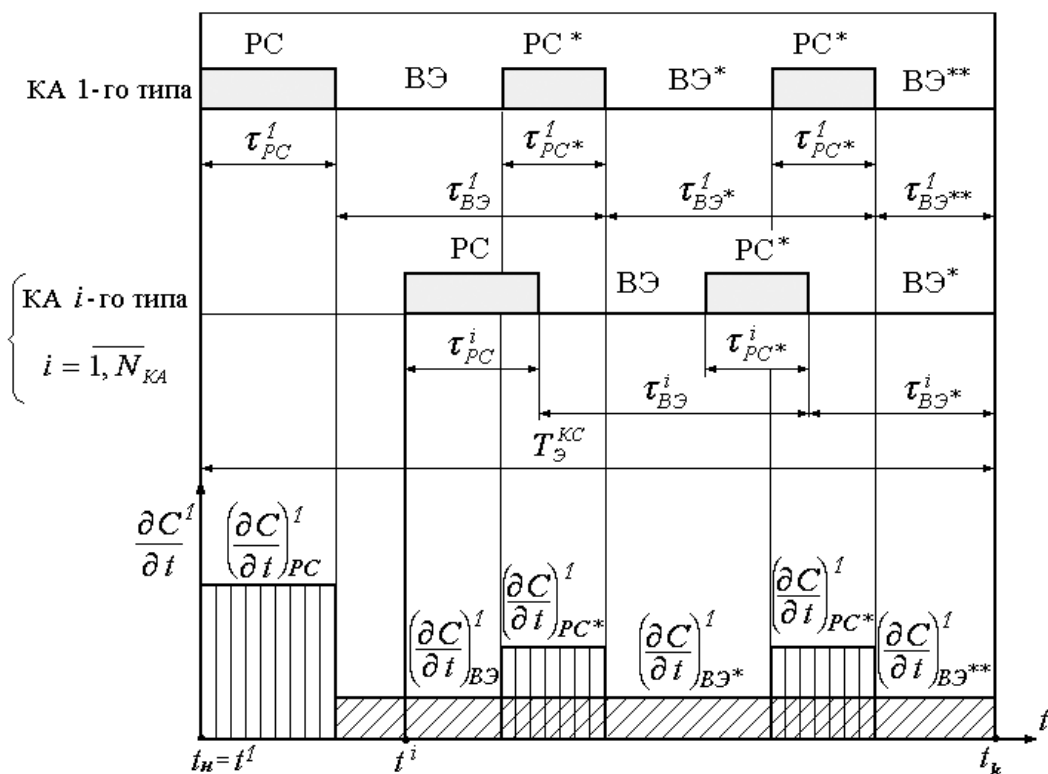


Рис. 3. График процесса реализации проекта создания КС ДЗЗ и функция изменения затрат  $(\partial C / \partial t)^1$  для КА первого типа:

$t_n, t_k$  — время начала и окончания реализации проекта;  $\tau_{PC}$  — продолжительность разработки и создания (изготовления);  $\tau_{ВЭ}$  — продолжительность выведения и эксплуатации;  $N_{КА}$  — количество типов КА

затраты на реализацию проекта в планируемый период, а также разработка алгоритма поиска рациональных решений.

На рис. 4 приведен алгоритм решения задачи оптимизации (оценки) параметров и программы реализации КС ДЗЗ в планируемый период.

В блоке определения проектно-баллистических характеристик КС проводится расчет параметров космического сегмента  $\Pi_{КС}$ : количества КА в КС ДЗЗ  $N_{КА}$ ; параметров орбиты каждого КА  $\bar{x}(H_k, i_k)$ ,  $k = \overline{1, N_{КА}}$ ; полосы обзора  $a$ .

В блоке определения параметров наземного сегмента и обобщенных характеристик КА проводится расчет параметров подсистем наземного сегмента  $\Pi_{НКУ}$ ,  $\Pi_{НКПОР}$ ; обобщенных характеристик подсистем КА (МЦА и МСП) и КА в целом — массы  $M_{МЦА}$ ,  $M_{МСП}$  и  $M_{КА}$ ; параметров  $\Pi_{ККС_{МЦА}}$ ,  $\Pi_{ККС_{МСП}}$  и  $\Pi_{ККС_{КА}}$ ; надежности  $P_{МЦА}$ ,  $P_{МСП}$  и  $P_{КА}$ .

В блоке определения затрат на реализацию проекта КС проводится расчет суммарных приведенных затрат. Блок оптимизации параметров подсистем КС и программы реализации проекта осуществляет процедуру случайного поиска — реализует направленный перебор параметров подсистем КС и программы реализации проекта  $PR(t)$  при поиске их оптимального значения.

В процессе поиска рационального решения (оптимальных параметров подсистем КС) проводится оценка обобщенных характеристик КС ДЗЗ: целевой эффективности  $\mathcal{E}_{КС}^{i-1}(\cdot)$ , информационной производительности  $I_{ПР_{КС}}^{i-1}(\cdot)$  и надежности  $P_{КС}^{i-1}(\cdot)$ . На каждом шаге итерационного поиска рациональных параметров проводится оценка выполнения соответствующих условий по уровню целевой эффективности ( $\mathcal{E}_{КС}^{i-1}(\cdot) \geq \mathcal{E}_{КС}^{(i-1)3д}$ ), информационной производительности ( $I_{ПР_{КС}}^{i-1}(\cdot) \geq I_{ПР_{КС}}^{(i-1)3д}$ ) и

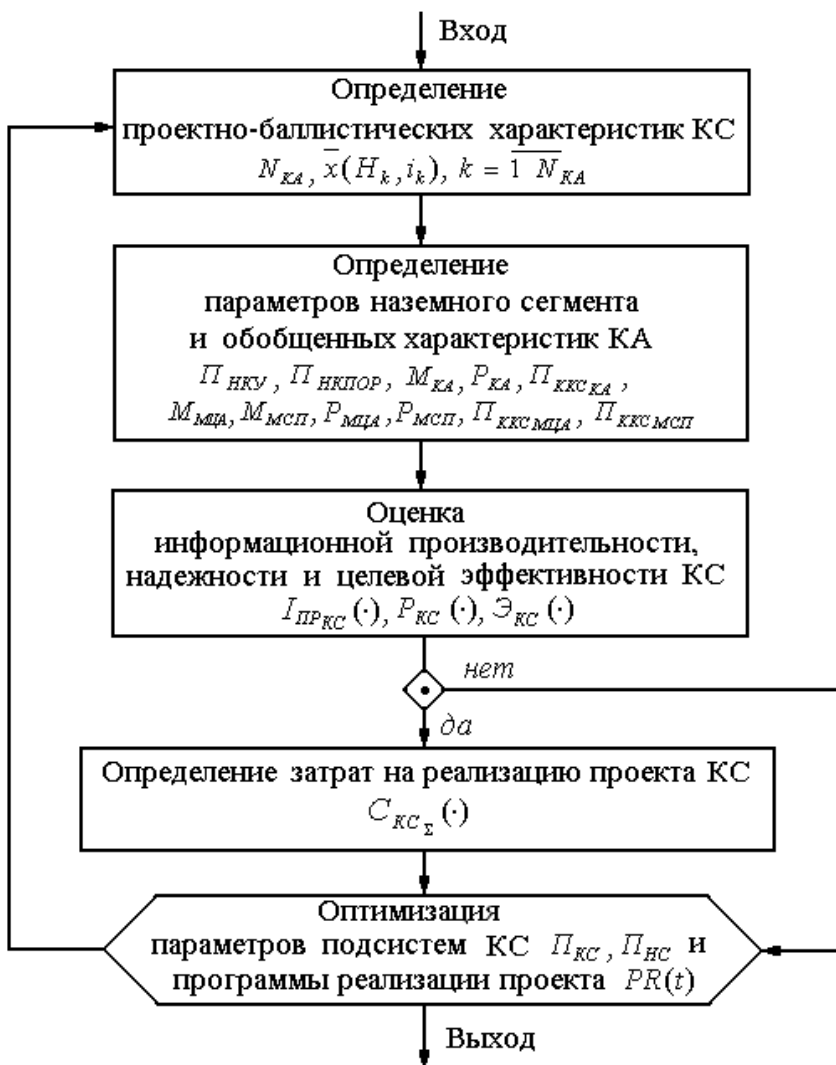


Рис. 4. Алгоритм решения задачи оптимизации (оценки) параметров и программы реализации проекта КС ДЗЗ в планируемый период

надежности ( $P_{KC}^{i-1}(\cdot) \geq P_{KC}^{(i-1)3\partial}$ ). При выполнении данных условий определяются суммарные затраты на реализацию проекта  $C_{\Sigma_{KC}}(\cdot)$ . Оптимальное решение должно удовлетворять предъявляемым требованиям и ограничениям, а также обеспечивать минимальные суммарные затраты на реализацию проекта КС ДЗЗ.

Структура проектных моделей оценки характеристик КС ДЗЗ строится в соответствии с разработанным алгоритмом и приведена на рис. 5.



Рис. 5. Структура проектных моделей оценки характеристик КС ДЗЗ

**Задача оптимизации (оценки) параметров КА ДЗЗ (подсистем КА) при заданных функциональных и параметрических связях ( $i$  — уровень управления разработкой)**

Задача оптимизации (оценки) параметров КА ДЗЗ при заданных функциональных и параметрических связях рассматривается на  $i$ -м уровне управления разработкой. В этом случае при реализации модульного принципа создания КА проводится детальный анализ основных подсистем КА (модулей МЦА и МСП). Структура модулей МЦА и МСП приведена выше на рис. 1. На  $i$ -м уровне управления разработкой также определяются массовые, геометрические, энергетические и другие характеристики подсистем МЦА, МСП и КА в

целом. Проектные исследования заключаются в поиске рациональных параметров подсистем рассматриваемых модулей КА — МЦА и МСП.

Векторы параметров модулей МЦА  ${}^i P_{МЦА}$  и МСП  ${}^i P_{МСП}$  на  $i$ -м уровне представляются в виде

$${}^i P_{МЦА} ({}^i P_{ЦСС}, {}^i P_{ССПИ}, {}^i P_{СТР}^{МЦА}, {}^i P_{Кон}^{МЦА});$$

$${}^i P_{МСП} ({}^i P_{БКУ}, {}^i P_{СЭП}, {}^i P_{ДУ}, {}^i P_{СТР}^{МСП}, {}^i P_{Кон}^{МСП}),$$

где  ${}^i P_{ЦСС}$ ,  ${}^i P_{ССПИ}$ ,  ${}^i P_{СТР}^{МЦА}$  и  ${}^i P_{Кон}^{МЦА}$  — соответственно параметры ЦСС, ССПИ, СТР и конструкции модуля МЦА;

${}^i P_{БКУ}$ ,  ${}^i P_{СЭП}$ ,  ${}^i P_{ДУ}$ ,  ${}^i P_{СТР}^{МСП}$  и  ${}^i P_{Кон}^{МСП}$  — соответственно параметры БКУ, СЭП, ДУ, СТР и конструкции модуля МСП.

Вектор параметров КА  ${}^i P_{КА}$  включает векторы параметров модулей:

$${}^i P_{КА} ({}^i P_{МЦА}, {}^i P_{МСП}).$$

Тогда на  $i$ -м уровне управления разработкой масса МЦА и МСП — функции, зависящие от векторов  ${}^i P_{МЦА}$  и  ${}^i P_{МСП}$ , а также коэффициентов зависимости для массы  $\alpha_{МЦА}(t_{np})$ ,  $\alpha_{МСП}(t_{np})$ , определяемых на основе опытных данных:

$${}^i M_{МЦА} ({}^i P_{МЦА}, \alpha_{МЦА}(t_{np}))$$

и  ${}^i M_{МСП} ({}^i P_{МСП}, \alpha_{МСП}(t_{np})).$

При определении массы МЦА и МСП выделены параметры подсистем, которые определяют функциональные характеристики КА, а также уровень надежности и затраты при создании КА. Масса КА  ${}^i M_{КА}$  на  $i$ -м уровне управления разработкой может быть представлена как функция масс выделенных подсистем или параметров КА:  ${}^i M_{КА} ({}^i M_{МЦА}(\cdot), {}^i M_{МСП}(\cdot))$  или  ${}^i M_{КА} ({}^i P_{КА})$ .

Тогда задача оптимизации (оценки) параметров КА ДЗЗ (подсистем КА) может быть записана следующим образом: определить на  $i$ -м уровне управления разработкой параметры подсистем МЦА и МСП, составляющих параметры  ${}^i P_{КА}$ , с тем, чтобы затраты на создание КА ДЗЗ  $C_{КА}$  были минимальными:

$$C_{КА} ({}^i M_{КА} ({}^i P_{КА}), \beta(t_{np})) \rightarrow \min \quad (2)$$

при  $i\Pi_{KA} \in G_{KA}^i(t_{np})$  и выполнялись функциональные и параметрические ограничения

$$H_{KA} = H_{KA}^{(i-1)3\partial}; i_{KA} = i_{KA}^{(i-1)3\partial}; \Pi_{ЦСС} \geq \Pi_{ЦСС}^{(i-1)3\partial};$$

$$I_{ПРКА}(\cdot) \geq I_{ПРКА}^{(i-1)3\partial}; M_{KA}(\cdot) \leq M_{KA}^{(i-1)3\partial};$$

$$P_{KA} = \prod_{j=1}^m P_j(\cdot) \geq P_{KA}^{(i-1)3\partial}; \Gamma_{KA}(\cdot) \leq \Gamma_{KA}^{(i-1)3\partial},$$

где  $H_{KA}, i_{KA}$  — соответственно высота и наклонение орбиты КА;  $\Pi_{KA}, \Pi_{ЦСС}$  — соответственно параметры КА и целевой съемочной системы МЦА;  $I_{ПРКА}(\cdot)$  — информационная производительность КА;  $M_{KA}(\cdot), \Gamma_{KA}(\cdot)$  — соответственно масса и габаритные размеры КА;  $G_{KA}^i(t_{np})$  — область допустимых решений КА, определяемая функциональными связями (внешними и внутренними) на  $i$ -м уровне управления разработкой;  $P_{KA}(\cdot)$  — надежность КА, которая определяется в виде

$$P_{KA} = \prod_{j=1}^m P_j(\cdot), P_j(\cdot) — \text{надежность } j\text{-й подсистемы}$$

КА ( $j = \overline{1, m}, m = 2$ ).

Функциональные и параметрические ограничения включают: параметры орбиты, требуемое значение параметров ЦСС и надежности, ограничение на массу КА, требование к информационной производительности и области изменения параметров подсистем КА. При постановке задачи ряд функциональных и параметрических связей определяется при решении задачи проектирования КС ДЗЗ на  $i$ -1-м уровне управления разработкой.

Как видно, задача оптимизации параметров КА ДЗЗ является многопараметрической и многокритериальной. В записи (2) задачи оптимизации (оценки) параметров КА ДЗЗ (подсистем КА) используется метод ограничений решения многокритериальных задач. Кроме того, как показывает анализ, задача оптимизации параметров КА ДЗЗ является динамической и стохастической, так как используемые соотношения содержат факторы (определяющие параметры), значения которых прогнозируются к моменту реализации проекта.

Унификация подсистем КА (межпроектная, внутривпроектная) в общем случае способствует снижению затрат на создание КА и может обеспечить повышение его качества. Требование унификации в приведенной задаче оптимизации параметров КА ДЗЗ определяют условия:  $\Pi_{МЦА} \in G_{МЦА}(t_{np})$ ;

$\Pi_{МСП} \in G_{МСП}(t_{np})$ . Соответствующее задание области выбора параметров (типа, структуры) подсистем МЦА и МСП позволит обеспечить необходимый уровень унификации при решении данной задачи.

На рис. 6 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 (оптимальных параметров КА) проводится оценка обобщенных характеристик КА (габаритов, информационной производительности и надежности) и затрат на реализацию проекта создания КА. На каждом шаге 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.

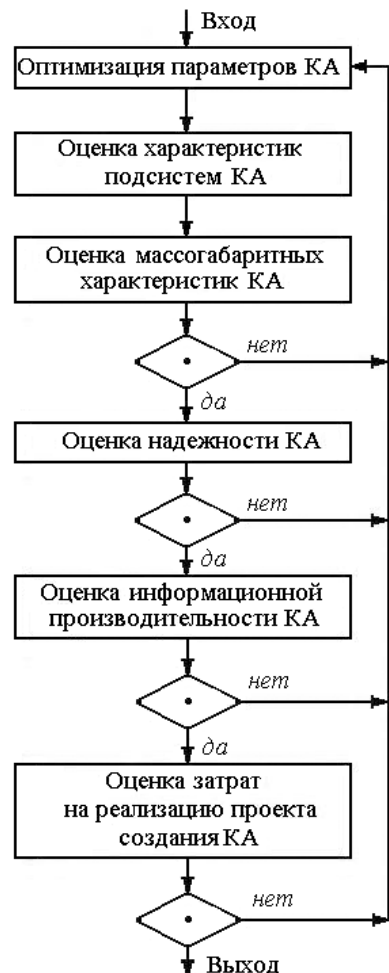


Рис. 6. Алгоритм оптимизации параметров КА ДЗЗ

**Задача направленной адаптации проектной модели и управление согласованием решений с учетом особенностей проектно-конструкторских решений для КА (подсистем КА)**

При оптимизации (оценке) параметров КС ДЗЗ с учетом особенностей проектно-конструкторских решений для КА в случае использования двухуровневой модели проводится адаптация (уточнение) проектных зависимостей, определяющих характеристики КА на  $i-1$ -м уровне управления разработкой по данным проектных исследований КА (подсистем КА — модулей МЦА и МСП) на  $i$ -м уровне. Схема двухуровневой согласованной оптимизации параметров КС ДЗЗ и параметров КА (подсистем КА) приведена на рис. 7.

За счет направленной адаптации и уточнения функциональных связей обеспечивается согласование проектных решений для КА в составе КС ДЗЗ на  $i-1$ -м уровне управления разработкой и проектных решений, принимаемых для КА (подсистем КА) на  $i$ -м уровне.

Пусть на  $i-1$ -м и  $i$ -м уровнях управления разработкой функции затрат на создание КА  $C_{КА}^{i-1}$  и  $C_{КА}^i$  определяются в виде

$$C_{КА}^{i-1}(^{i-1}П_{КА}, \beta^{i-1}(t_{np})); \quad (3)$$

$$C_{КА}^i(^iП_{КА}, \beta^i(t_{np})) \quad (4)$$

при

$$^{i-1}П_{КА} \in G_{КА}^{i-1}(^{i-2}П_{КА}, t_{np}) \text{ и } ^iП_{КА} \in G_{КА}^i(^{i-1}П_{КА}, t_{np}),$$

где  $^{i-2}П_{КА}$ ,  $^{i-1}П_{КА}$ ,  $^iП_{КА}$  — соответственно векторы параметров КА на  $i-2$ -м,  $i-1$ -м и  $i$ -м уровнях;  $\beta^{i-1}(t_{np})$ ,  $\beta^i(t_{np})$  — соответственно коэффициенты

стоимостных зависимостей на  $i-1$ -м и  $i$ -м уровнях;  $G_{КА}^{i-1}(\cdot)$ ,  $G_{КА}^i(\cdot)$  — соответственно область допустимых решений на  $i-1$ -м и  $i$ -м уровнях.

При двухуровневом управлении разработкой оценка согласованности решений функций затрат (3) и (4) представляется в виде:

$$|C_{КА}^{i-1}(^{i-1}П_{КА}, \beta^{i-1}(t_{np})) - C_{КА}^i(^iП_{КА}, \beta^i(t_{np}))| \leq \Delta C^*, \quad (5)$$

где  $\Delta C^*$  — определяет условие согласования решений (3) и (4) на  $i-1$ -м и  $i$ -м уровне управления разработкой.

Приведем формальную постановку задачи направленной адаптации проектной модели КА в составе КС ДЗЗ:

по данным имитационных испытаний на модели нижнего  $i$ -го уровня требуется найти коэффициенты  $\beta^{i-1}$  (а, точнее, оценки математического ожидания  $M\hat{\beta}^{i-1} = \hat{\beta}^{i-1}$  и дисперсии  $\sigma^2\hat{\beta}^{i-1}$ ) и параметры  $^iП_{КА}^{onm} \in G(^{i-1}П, \beta^{i-1}(t))$ , при которых обеспечивается согласованность решения в смысле (5).

Рассмотрим особенности алгоритма решения задачи.

При решении задачи направленной адаптации проводятся следующие операции:

1. Находятся эмпирические данные  $\{^{i-1}П(\kappa), C_1^{ionm}(\kappa)\}$ , где  $\kappa = \overline{1, K}$ ,  $K$  — объем выборки;  $^{i-1}П^1 \in u_\delta^{i-1}\overline{П}^1$ ,  $u_\delta^{i-1}\overline{П}^1$ ,  $\delta$  — окрестность точки  $^{i-1}\overline{П}^1$ , из которой, согласно принятому плану, выбираются точки для проведения испытаний. Оп-

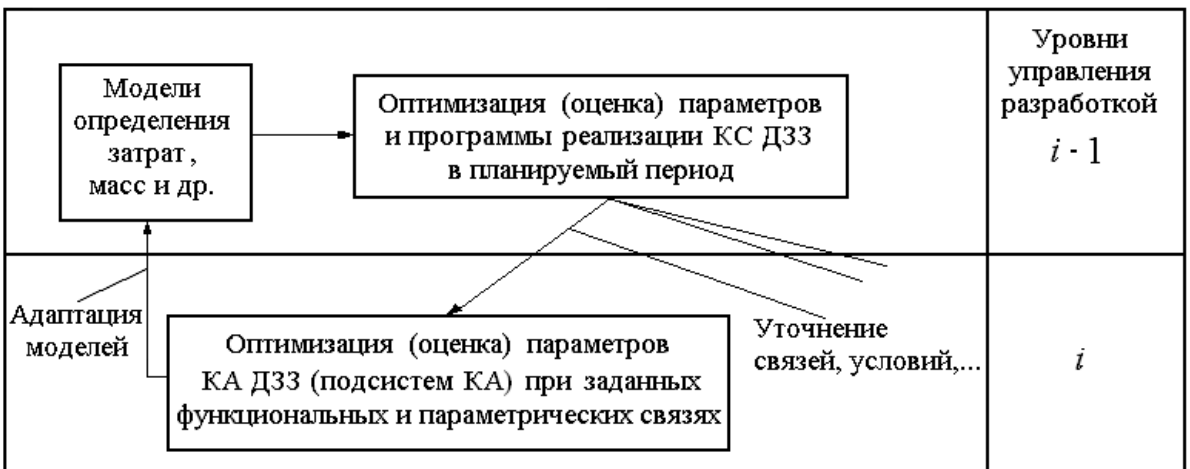


Рис. 7. Схема двухуровневой согласованной оптимизации параметров КС ДЗЗ и параметров КА (подсистем КА)



деление  $u_\delta^{i-1} \overline{P}^1$  зависит от принятой метрики.

При принятии метрики  $R_0^n$  имеем

$$u_\delta^{i-1} \overline{P}^1 = \left\{ i-1 P^1 : \max \left| i-1 \overline{P}^1 - i-1 P^1 \right| \leq \delta \right\}.$$

При определении значения  $C_1^{i-1} \text{ onm}(\kappa)$   $\kappa$  раз решается экстремальная задача нижнего уровня управления разработкой.

2. По данным выборки  $\{i-1 P^1(\kappa), C_1^{i-1} \text{ onm}(\kappa)\}$  формируются аппроксимирующие зависимости — при заданных функциональных связях проводится определение коэффициентов моделей  $\beta^{i-1}$  (находятся оценки  $M\hat{\beta}^{i-1} = \hat{\beta}^{i-1}$  и  $\sigma^2 \hat{\beta}^{i-1}$ ).

3. Проводится статистическая оценка значения целевой функции верхнего ( $i-1$ )-го уровня при заданных параметрах управления  $i-1 P^1$ ,  $i-1 \overline{P}^1$  и уточнения модели (уточненных коэффициентах  $\beta^{i-1}$ ).

4. Проводится оценка выполнения условия (5). При невыполнении данного условия необходимы мероприятия по управлению согласованием решений.

Далее цикл согласования решений повторяется. Для оценки согласования решений в точке

$i-1 P^1 = i-1 \overline{P}^1$  (где  $i-1 \overline{P}^1$  — центр плана испытаний) определяется  $M\{\Delta \hat{C}_1\}$  в виде

$$M\{\Delta \hat{C}_1\} = M \left| C_1^{i-1} \left( i-1 \overline{P}^1, \beta^{i-1} \right) - C_1^{i-1} \text{ onm} \left( i P^1 \text{ onm}, \beta^i \right) \right|.$$

В предложении, что функция  $C_1^i(\cdot)$  линейна относительно  $\beta^i$ , последнее выражение имеет вид

$$M\{\Delta \hat{C}_1\} = \left| \hat{C}_1^{i-1} \left( i-1 \overline{P}^1, \beta^{i-1} \right) - \hat{C}_1^{i-1} \text{ onm} \left( i P^1 \text{ onm}, \beta^i \right) \right|.$$

Проведем оценку этой разницы. Если предпосылки регрессионного анализа были справедливы при формировании аппроксимирующей зависимости  $\hat{C}_1^{i-1}(i-1 \overline{P}^1, \beta^{i-1})$ , то случайный разброс значений  $C_1^{i-1}(\cdot)$  относительно  $\hat{C}_1^{i-1}(\cdot)$  в любой точке пересечения имеет нормальный закон  $N(\hat{C}_1^{i-1}(i-1 \overline{P}^1, \beta^{i-1}), \sigma^2 \varepsilon)$  и может быть представлен в виде

$$\sigma^2 \varepsilon = \frac{\sum_{\kappa=1}^{m_a} \left( C_1^{i-1} \text{ onm} \left( i P^1 \text{ onm}(\kappa), \beta^i \right) - \hat{C}_1^{i-1} \left( i-1 P^1(\kappa), \beta^{i-1} \right) \right)^2}{m_a - L - 1},$$

где  $L$  — число факторов модели  $C_1^i(\cdot)$ .

Тогда с доверительной вероятностью 0,997 можно записать

$$\left| \hat{C}_1^{i-1} \left( i-1 \overline{P}^1, \hat{\beta}^{i-1} \right) - C_1^{i-1} \text{ onm} \left( i P^1 \text{ onm}, \beta^i \right) \right| \leq 3\sigma \varepsilon.$$

Известно, что дисперсия  $\sigma^2 \varepsilon$  зависит от ошибки аппроксимации и точности данных, т. е. от объема статистической выборки (числа испытаний)  $m_a$  и плана испытаний  $P$ , величины области  $u_\delta^{i-1} \overline{P}^1$ , которой принадлежат точки испытаний.

Если  $C_1^i(\cdot)$  — нелинейная функция по  $\beta^i$  и используется статистическое моделирование при определении  $M\hat{C}_1^{i-1}(i-1 P^1, \beta)$ , то на величину  $\sigma \varepsilon$  влияет также число испытаний  $m_a$ .

При заданной модели  $C_1^i(\cdot)$ , постоянном плане  $P$  и числе испытаний  $m_a$  ошибка  $\sigma \varepsilon$  прямо зависит от размеров области  $u_\delta^{i-1} \overline{P}^1$  (при данном плане испытаний  $m_a$  подбирается так, чтобы обеспечить минимум ошибки, поэтому справедливо предположение о постоянстве  $P$  и  $m_a$ ). В пределе

$u_\delta^{i-1} \overline{P}^1 \rightarrow 0$ , при этом имеет место вырожденная аппроксимация и ошибка  $\sigma^2 \varepsilon$  определяется точностью статистики и точностью испытаний на нижнем уровне. В данном случае для детерминированной модели  $\sigma \beta^i = 0$  при  $i-1 P^1 = i-1 \overline{P}^1$  разброса значений  $C_1^i(i P^1 \text{ onm}, \beta^i)$  нет, поэтому  $\sigma \varepsilon = 0$ .

Таким образом, управление согласованием решений  $C_1^{i-1}(\cdot)$ ,  $i-1 \overline{P}^1$  и  $C_1^{i-1} \text{ onm}, i P^1 \text{ onm}$  осуществляется из изменением области  $u_\delta^{i-1} \overline{P}^1$  (смещением и изменением размера), которой принадлежит план испытаний.

Утверждение 1. При уменьшении  $u_\delta^{i-1} \overline{P}^1$  ( $u_\delta \rightarrow 0$ ) обеспечивается согласование решений в смысле (5).

Действительно, из рассмотренного выше следует, что  $M\{\Delta C_1(j)\} < 3\sigma \varepsilon_j$ , где  $j$  — номер шага в итерационном процессе согласования решений. Причём, при обеспечении  $u_\delta^{i-1} \overline{P}^1 \rightarrow 0$ ,  $j \rightarrow \infty$  и

$\sigma \epsilon_j \rightarrow 0$ . То есть можно найти такое  $N$ , при котором при условии  $j \geq N$  выполняется неравенство  $3\sigma \epsilon_j \leq \Delta C_1^{3\sigma}$ . В этом случае очевидно, что  $M\{\Delta C_{1j}\} < \Delta C_1^{3\sigma}$ . Что и требовалось показать.

**Вопросы сходимости при двухуровневой согласованной оптимизации (теорема сходимости)**

Рассмотрим подробнее вопросы сходимости при реализации статистического метода согласованной двухуровневой оптимизации параметров КС ДЗЗ и характеристик КА.

При двухуровневом управлении разработкой для случая, когда параметры наземного сегмента заданы, оценка сходимости затрат на КС ДЗЗ  $C_{КС}$  (без учёта затрат на доработку подсистем НС) при согласованном оптимизационном поиске определяется в виде

$$\left| C_{КС}^k(C_{КА}^{i-1}(i-1\Pi_{КА}, \beta^{i-1}(t_{np}))) - C_{КС}^{k-1}(C_{КА}^{i-1}(i-1\Pi_{КА}, \beta^{i-1}(t_{np}))) \right| \leq \Delta C^{**}, \quad (6)$$

где  $C_{КС}^k(\cdot)$  и  $C_{КС}^{k-1}(\cdot)$  — соответственно затраты на создание КС ДЗЗ при  $k$  и  $k - 1$  итерациях поиска решения;  $\Delta C^{**}$  определяет условие сходимости при реализации согласованного оптимизационного поиска.

Сформулируем условия, при выполнении которых рассматривается сходимость процедуры согласованного оптимизационного поиска. Будем полагать:

1.  $C^{i-1}(C_1^{i-1}(\cdot), i-1\Pi^*, \beta^{i-1}), C_1^{i-1}(i-1\Pi^1, \beta^{i-1}),$

$C_1^i(i\Pi, \beta^i)$  — выпуклые вниз относительно параметров  $i-1\Pi^*, i-1\Pi^1, i\Pi$  функции при любых допустимых  $\beta^i, \beta^{i-1}$ .

2. Области определения  $G^{i-1}(i-2\Pi)$  и  $G^i(i-1\Pi)$  — выпуклые, ограниченные и замкнутые множества, непустые.

3. План испытаний и число испытаний не меняются на каждом шаге итерационного поиска решения задачи статистической двухуровневой оптимизации.

4. Число «монтекарловских» испытаний при решении стохастической задачи верхнего уровня не меняется от итерации к итерации  $m_j = m \forall j$ .

5. Функция  $C_1^{i-1}(i-1\Pi, \beta^{i-1})$  линейна относительно параметров и приведена к виду

$$\hat{C}_1^{i-1}(i-1\Pi, \beta^{i-1}) = \langle \beta^{i-1}, f(i-1\Pi - i-1\bar{\Pi}) \rangle,$$

где  $\beta^{i-1}$  — вектор параметров модели размерности  $K$ ;  $f(\cdot)$  — вектор функции такой же размерности, что и  $\beta^{i-1}$ , причём,  $f_1(i-1\Pi - i-1\bar{\Pi}) = 1$  и  $\forall K$   $f_K(\cdot) = 0$  при  $i-1\Pi = i-1\bar{\Pi}$ ;  $i-1\Pi$  — вектор параметров управления;  $i-1\bar{\Pi}$  — фиксированный (средний) вектор параметров управления модели, определяющий центр плана испытаний при формировании аппроксимирующей модели.

6. Функция  $C^{i-1}(\cdot)$  аддитивна относительно  $C_1^{i-1}(\cdot)$ .

В отношении сделанных допущений отметим следующее.

Условия 1 и 2 обусловлены необходимостью решения экстремальных задач на нижнем и верхнем уровнях управления разработкой. При решении стохастической экстремальной задачи верхнего уровня используется прямой квазиградиентный метод. Выполнение условий 1 и 2 гарантирует существование и единственность решения частных задач верхнего и нижнего уровня и, следовательно, существование и единственность решения при согласовании двухуровневой оптимизации.

Условия 3 и 4, по существу, определяют точность нахождения  $\hat{C}_1^{i-1}(\cdot)$ , т. е. величину  $\sigma^2 \hat{C}_1^{i-1}(\cdot)$ .

Известно, что  $\sigma^2 \hat{C}_1^{i-1}(\cdot) = f(m, \sigma^2 \hat{\beta}^{i-1})$ ,  $\sigma^2 \beta^{i-1} = \Phi$  (функция числа  $m_a$  и плана  $P$  испытаний, величины области  $u_a^{i-2}\Pi$ , точности данных  $\sigma^2 \hat{C}_1^i(\cdot)$ ). Таким образом, при сделанных допущениях 3 и 4 имеем:  $\sigma^2 \hat{C}_1^{i-1}(\cdot) = f^*(u_a^{i-2}\Pi)$ . Это используется ниже при доказательстве сходимости.

Опыт показывает, что условие 5 не сильно сужает общность подхода и в тоже время позволяет обойтись без статистического моделирования при решении задачи верхнего уровня и оценки точности. По существу, если выполняется условие 5, то в условии 4 нет необходимости. Однако в общем случае, если функция  $C_1^{i-1}(i-1\Pi, \beta^{i-1})$  нелинейна относительно коэффициентов, то решение задачи верхнего уровня проводится с использованием статистического моделирования.

Докажем ещё одно утверждение.

Выше (см. утверждение 1 в алгоритме решения задачи направленной адаптации) показано, что при  ${}^{i-1}P_j \in u_{\delta_j} {}^{i-1}P_j$  и  $u_{\delta_j} {}^{i-1}P \rightarrow 0, j \rightarrow \infty$ . При этом обеспечивается согласование решений задач верхнего и нижнего уровней управления (в режиме оценки управления верхнего уровня), т. е.

$$M\{\Delta \hat{C}_j^1\} < \Delta C_1^{\text{зд}}, j \rightarrow \infty.$$

Утверждение 2. При сделанных выше предположениях относительно вида функции  $C_1^{i-1}(\cdot)$  покажем, что  $\sigma\{\Delta \hat{C}_1\} = \sigma\{\hat{C}_1^{i-1}({}^{i-1}\bar{P}, \beta^{i-1})\}$  уменьшается и стремится к нулю при  $u_{\delta_j} {}^{i-1}P \rightarrow 0$ .

Действительно, при оценке дисперсии  $\sigma^2 \hat{C}_1^{i-1}(\cdot)$

в точке  ${}^{i-1}P = {}^{i-1}\bar{P}$  имеем

$$\sigma^2 \hat{C}_1^{i-1}({}^{i-1}\bar{P}, \beta^{i-1}) = \sigma^2 \beta_1 = \frac{\sigma^2 \varepsilon}{m_a}.$$

Так как  $\sigma^2 \varepsilon \rightarrow 0$  при  $u_{\delta_j} {}^{i-1}\bar{P} \rightarrow 0, j \rightarrow \infty$  (см.

выше), то  $\sigma^2 \hat{C}_1^{i-1}({}^{i-1}\bar{P}, \beta^{i-1}) \rightarrow 0$ .

**Теорема сходимости** формулируется следующим образом: пусть при сделанных выше допущениях в процессе согласованной оптимизации выполняются условия:

- а)  ${}^i P_j^{1onm} \in u_{\delta_j} {}^{i-1} P_{j-1}^{1onm}$ ;
- б)  $\delta_{j-1} > \delta_j$ ;  $\delta_j \rightarrow 0$ ,

где  $\delta_j$  — параметр, определяющий размер области, в которой согласно плану проводятся испытания;

- в)  $u_{\delta_j} {}^{i-1} P_{j-1}^{1onm} \in G^{i-1}({}^{i-2}P) \forall j$ .

Тогда процесс оптимизации в используемом алгоритме сходится и полученное оптимальное решение является согласованным в смысле (б).

Сходимость в среднем означает:

- 1)  $M\{\Delta \hat{C}_j\} \rightarrow 0$  при  $j \rightarrow \infty$ ;

$$M\{\Delta \hat{C}_j\} = M \times$$

$$\times \left| M\hat{C}^{i-1onm}({}^{i-1}P_{onm_j}, \beta_{j-1}^{i-1}) - M\hat{C}^{i-1onm}({}^i P_{j-1}^{i-1onm}, \beta_{j-1}^{i-1}) \right|;$$

- 2)  $\Delta P_j =$

$$= \max_l \left| ({}^{i-1}P_j^1, {}^{i-1}P_j^{*1})^{onm} - ({}^{i-1}P_{j-1}^1, {}^j P_{j-1}^{*1})^{onm} \right| \rightarrow 0$$

при  $j \rightarrow \infty$ , где  $l$  — номер компонента вектора  ${}^{i-1}P = ({}^{i-1}P^1, {}^{i-1}P^*)$ .

При определённом условии теоремы сходимости нетрудно показать, что  $\Delta P_j \rightarrow 0, j \rightarrow \infty$ . Действительно, если выполняется условие  ${}^{i-1}P_j^{1onm} \in U_{\delta_{j-1}} {}^{i-1}P_j^{1onm}$  и  $\delta_{j-1} \rightarrow 0$ , то очевидно, что  $\left| {}^{i-1}P_j^{1onm} - {}^{i-1}P_j^{1onm} \right| \rightarrow 0$ . Следовательно,  $\Delta P_j \rightarrow 0$ .

В таком случае при больших значениях  $j$  можно положить  ${}^{i-1}P_{j-1}^{1onm} \cong {}^{i-1}P_j^{1onm} \cong {}^{i-1}P^{1onm}$ .

Таким образом, центры испытаний на последующих шагах поиска совпадают, также по условию одинаковы планы испытаний, число испытаний и справедливы равенства

$$\hat{\beta}_{j-1}^{i-1} \cong \hat{\beta}_j^{i-1} \cong \hat{\beta}^{i-1}; \quad \sigma \hat{\beta}_{j-1}^{i-1} \cong \sigma \hat{\beta}_j^{i-1} \cong \sigma \hat{\beta}^{i-1}.$$

Тогда величина разности  $\left| \hat{C}_{1j}^{i-1onm} - C_{1j-1}^{i-1onm} \right|$  обусловлена случайным характером оценок.

При больших значениях  $j$  можно положить, что

$$\hat{C}_{1j}^{i-1onm}, \hat{C}_{1j-1}^{i-1onm} \in N\left(\hat{C}_1^{i-1}({}^{i-1}\bar{P}, \hat{\beta}^{i-1}), \sigma\{\hat{C}_1^{i-1}({}^{i-1}\bar{P}, \hat{\beta}^{i-1})\}\right),$$

и оценить разность, определяющую сходимость, в виде

$$M\Delta C = \Delta \hat{C} = \left| C_{1j}^{i-1onm} - C_{1j-1}^{i-1onm} \right| \leq 6\sigma \left\{ \hat{C}_1^{i-1}({}^{i-1}P, \hat{\beta}^{i-1}) \right\}.$$

По утверждению 2, при  $j \rightarrow \infty$  и  $u_{\delta_j} {}^{i-1}\bar{P} \rightarrow 0$  имеем  $\sigma \hat{C}_1^{i-1}({}^{i-1}P, \hat{\beta}^{i-1}) \rightarrow 0$ . Следовательно,

$M\{\Delta \hat{C}_j\} \rightarrow 0$ , т. е. процесс двухуровневой согласованной оптимизации сходится. Таким образом, получаемое решение будет согласованным. Теорема доказана.

Отметим особенность теоремы. Так как в процессе поиска решения аналитически не определена процедура формирования случайной релаксационной последовательности  $\left\{ {}^{i-1}P_j^1, {}^{i-1}P_j^* \right\}$  (она задана алгоритмически), то известные приёмы доказательства сходимости, основанные на анализе сходимости случайных последовательностей  $\{\Delta P_j\}$  и

$\{\Delta C_j\}$ , здесь не подходят. В данном случае сходимость обусловлена специальным управлением, оп-ределённым в условии теоремы. Изменение обла-сти  $u_{\delta_j}^{i-1} \Pi$ , изменение её положения и уменьше-ние размера в процессе согласованной двухуровне-вой оптимизации обеспечивает, по существу, на-правленную адаптацию модели, приводит к сниже-нию оценок  $\hat{C}_{1j}, \hat{C}_j$ . Рассматривается сходимость в среднем, а при доказательстве теоремы использует-ся анализ дисперсии  $\sigma^2 C_j = f(\sigma^2 \hat{C}_1^{i-1}(i-1) \Pi, \hat{\beta}^{i-1})$ .

Важно подчеркнуть, что уменьшение  $\sigma^2 \hat{C}_1^{i-1}(\cdot)$  и, следовательно,  $\sigma^2 C_1^{i-1}(\cdot)$  означает одновремен-но уточнение решения, т. е. снижение дисперсии  $\sigma^2 C^{i-1}(\cdot)$ . Таким образом, оценка точности решения при многоуровневой согласованной оптимизации имеет динамический характер, точность повышает-ся в процессе поиска решения.

Для практического использования отметим сле-дующее:

1. Выполнение условий согласованности и схо-димости может наступать не одновременно. Если в процессе поиска меняется положение  $u_{\delta} \Pi$  и  $\delta = \delta^* = \text{const}$ , то очевидно согласованного решения можно не получить вовсе.

2. Требования  $\Delta C_1^{zd}$ ,  $\Delta C^{zd}$  и  $\Delta \Pi^{zd}$  не связаны друг с другом. Поэтому на практике первые два тре-бования задают не жёстко, при выполнении усло-вий  $i \Pi^{onm}(j) \in u_{\delta_{j-1}}^{i \Pi^{onm}}(j-1)$  и  $\Delta \Pi(j) \leq \Delta \Pi^{zd}$  процесс поиска решения приостанавливают, про-водят оценку  $\Delta \hat{C}_1$  и  $\Delta \hat{C}$  и, если они немного пре-восходят требования  $\Delta C_1^{zd}$  и  $\Delta C^{zd}$  (с учётом вели-чины разброса указанных оценок  $\sigma \Delta \hat{C}_1 = \sigma C_1^i(i \Pi, \beta)$ ,  $\sigma \Delta \hat{C}(j) = \sigma \Delta C^i(j)$ ), то счёт оста-навливают, решение найдено.

## Выводы

Методика позволяет провести технико-эконо-мическую оценку вариантов проектов КС ДЗЗ, космический сегмент которой включает базовый КА и модификации КА, исследовать влияние осо-

бенностей проектно-конструкторских решений КА (подсистем КА) на эффективность системы в пла-нируемый период, в том числе на надежность, срок активного существования, количество КА в систе-ме и сроки восстановления системы.

Рассмотренная методика также позволяет:

— определить влияние динамики внешних свя-зей — требований, предъявляемых к КС ДЗЗ (про-должительности периода реализации проекта, тре-бований по функциональной эффективности — раз-решению, спектральным диапазонам работы целе-вой съемочной системы, информационной произ-водительности и др.) на затраты и трудоемкость работ при реализации проекта космической систе-мы;

— прогнозировать влияние динамики внутрен-них связей (технико-экономических особенностей создания перспективных подсистем модуля целевой аппаратуры) на характеристики КС ДЗЗ.

*Работа выполнена в рамках реализации мероприя-тия 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. Матвеев Ю.А. Методы исследования моди-фикаций при разработке ЛА. — М.: Изд-во МАИ, 1992.
2. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Космические системы дистанционного зондирования Земли: со-стояние и перспективы развития // Полет. 2007. № 5. С. 31—37.
3. Ламзин В.В., Ламзин В.А. Вопросы развития и повышения эффективности космических систем дистанционного зондирования Земли. К.Э. Циол-ковский и современность // Труды ХЛП Научных чтений, посвященных разработке творческого на-следования К.Э. Циолковского. Калуга. 2007. С. 176—177.
4. 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