

# Оптимизация полезной нагрузки на борту космического аппарата комплексного назначения по критерию «эффективность-стоимость»

**Пантенков Д.Г.**

**Гусаков Н.В.**

к.т.н.

**Соколов В.М.**

к.т.н., старший научный сотрудник, ОАО «РКК Энергия им. С.П. Королева», г. Королёв, Московской обл.

## Аннотация

В данной статье предлагается научно-методический аппарат для оптимизации целевой нагрузки космических аппаратов комплексного назначения посредством решения оптимизационной задачи по критерию «эффективность-стоимость».

**Ключевые слова:** космический аппарат; массогабаритные показатели; эффективность; удельная стоимость вывода; полезная нагрузка.

## Введение

При проектировании космического аппарата комплексного назначения (КА КН) актуальными остаются задачи анализа, оценки и контроля технических и функциональных характеристик модулей полезной (целевой) нагрузки. Это связано, прежде всего, с тем, что от выбранных характеристик данных модулей напрямую зависит его энергопотребление и массогабаритные показатели. В данной статье в качестве модуля целевой нагрузки КА КН рассмотрим модуль регистрации радиосигналов. Пусть на некоторой поверхности Земли площадью  $S$  имеется  $N$  независимых друг от друга объектов излучения (станций связи, РЛС и т.д.), а также имеется орбитальная группировка КА КН, состоящая из  $M$  космических аппаратов, целевой задачей которых является регистрация как узкополосных, так и широкополосных радиосигналов [1-3].

В рамках сформулированных условий оптимизация полезной нагрузки является универсальной мерой оптимальности технического облика КА КН, что позволяет разработчикам целевой нагрузки решить актуальную задачу получения требуемой эффективности функционирования КА КН не ниже заданной при минимальных затратах на создание и эксплуатацию этих систем [4-5].

## Оптимизация выбора полезной нагрузки

Реализация технического облика КА КН для решения целевой задачи регистрации радиосигналов будет оптимальной при условии максимизации отношения эффективности  $E$  от решения  $i$ -ой целевой задачи и потраченных (вложенных) финансовых средств  $C_{PEГ}$

$$\xi = \frac{Eff}{C_{PEГ}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $C_{PEГ} = \sum_j C_j$ ,  $C_i$  – стоимость  $i$ -го модуля в составе полезной нагрузки КА;

$\sum_j C_j$  – общая стоимость полезной нагрузки КА ( $j=1,2,\dots,i,\dots,j-1,j$ ).

В рамках описываемой модели имеется  $N$  объектов потенциального их контроля числом  $M$  КА КН. При этом создание информационного поля принимаемых сигналов можно представить множеством способов. Каждому способу будет соответствовать свое значение критерия  $\xi$  и, очевидно, значение  $\xi = \xi_{\max}$  множества вариантов будет соответствовать оптимальному.

Множество способов приема полезного сигнала определяется следующими факторами:

- разновидностью передаваемой информации;
- быстродействием наведения антенной системы по направлению и частоте;
- энергетическими характеристиками наземной станции;
- количеством  $M$  КА КН;
- соотношением ширины спектра излучаемого сигнала и полосы пропускания приемного устройства.

Реализация совокупности способов приема и обработки информационного поля излучаемых сигналов с требуемой эффективностью определяется техническими характеристиками бортового комплекса КА КН, что в итоге влияет на стоимость модуля КА в целом. Отсюда следует, что эффективность гарантированного приема и оценки информационного поля напрямую коррелирует со стоимостью затрат на его реализацию. При этом можно определить оптимальные технические характеристики конкретного приемного модуля регистрации радиосигналов КА КН, обеспечивающие максимальное значение  $\xi$  в рамках рассматриваемого алгоритма оптимизации.

Учитывая передовой опыт проектирования и использования подобных модулей, его стоимость целесообразно оценить согласно стоимости модуля-аналога, но взвешенной с некоторым коэффициентом  $Y$  (коэффициент учитывает разницу в принимаемой энергетике на борт КА, сложности сигнала, ширины спектра сигнала, структуры кодирования и т.д.)

$$C_{\text{РЕГ}} = C_{\text{РЕГ\_ан}} \cdot Y^{\left[ \ln \frac{P_n G_n}{(P_n G_n)_{\text{ан}}} + \ln \frac{N}{N_{\text{ан}}} + \ln K_{\Delta F} \frac{f_0}{f_{0\text{ан}}} \right]}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{РЕГ\_ан}}$  – стоимость известного модуля-аналога;

$N, N_{\text{ан}}$  – число потенциально подавляемых целей проектируемым модулем и модулем-аналогом;

$P_n G_n / (P_n G_n)_{\text{ан}}$  – относительное изменение энергетического потенциала исследуемого модуля по сравнению с потенциалом аналога;

$K_{\Delta F} = \Delta F / \Delta F_{\text{ан}}$  – диапазон рабочих частот;

$f_0, f_{0\text{ан}}$  – средняя рабочая частота соответственно проектируемого модуля и модуля-аналога.

В силу того, что сигнал с проектируемого модуля на большинстве КА КН имеет схожую несущую частоту и ширину спектра сигнала, преобразуем (2) к виду:

$$C_{\text{РЕГ}} = C_{\text{РЕГ\_ан}} \cdot Y^{\left[ \ln \frac{P_n G_n}{(P_n G_n)_{\text{ан}}} + \ln \frac{N}{N_{\text{ан}}} \right]} \quad (3)$$

Очевидно, что стоимость всех  $M$  модулей регистрации радиосигналов, находящихся на бортах всех космических аппаратов комплексного назначения, входящих в орбитальную группировку, будет равна сумме стоимостей каждого модуля:

$$C_{\text{РЕГ}} = C_{\text{РЕГ\_ан}} \cdot \sum_{j=1}^M Y_j^{\left[ \ln \frac{P_n G_n}{(P_n G_n)_{\text{ан}}} + \ln \frac{N}{N_{\text{ан}}} \right]} \quad (4)$$

В случае идентичности модулей, расположенных на всех КА КН, входящих в орбитальную группировку, перейдем от суммы (4) к выражению (5):

$$C_{\text{РЕГ}} = M \cdot C_{\text{РЕГ\_ан}} \cdot Y^{\left[ \ln \frac{P_n G_n}{(P_n G_n)_{\text{ан}}} + \ln \frac{N}{N_{\text{ан}}} \right]} \quad (5)$$

Таким образом, цена модуля регистрации радиосигналов на борту КА КН определяется стоимостью модуля-эталона, принятого за аналог, и экспоненциальной зависимостью отношений энергетических потенциалов и количества излучаемых объектов.

Стоимостные оценки, полученные в рамках алгоритма оптимизации финансовых затрат по созданию радиоэлектронного модуля на борту КА КН для решения целевой задачи, позволяют с достаточной степенью точности прогнозировать стоимость разработки и эксплуатации средств системы в зависимости от технических характеристик и конкретных условий технической реализации системы управления.

Оценку эффективности информационного мониторинга  $N$  наземных РЭС более целесообразно проводить частными методами для конкретных случаев. Тогда эффективность регистрации наземных РЭС противника с КА КН  $E$  будет определяться двумя составляющими: результирующей вероятностью регистрации наземных РЭС  $E_1$  и вероятностью точного наведения диаграммы направленности антенны КА КН на объект излучения  $E_2$ :

$$E = E_1 \cdot E_2 \quad (6)$$

Пусть  $j$ -ый модуль КА КН гарантированно обеспечивает прием сигнала от  $i$ -ой РЭС с некоторой ве-

роятностью  $p$ , тогда эффективность регистрации всех  $N$  РЛС посредством излучаемого поля с числа  $M$  КА КН определим согласно выражению

$$E_1 = \prod_{i=1}^N \left[ 1 - \prod_{j=1}^M (1 - p_j)_i \right]. \quad (7)$$

Поскольку наведение антенны  $j$ -го модуля регистрации радиосигнала на  $i$ -ую РЛС будет иметь вероятностный характер  $P_{jH}$ , эффективность наведения информационного поля с КА КН оценим согласно выражению

$$E_2 = \prod_{i=1}^N \left[ 1 - \prod_{j=1}^M (1 - p_{jH})_i \right]. \quad (8)$$

Алгоритм оптимизации финансовых затрат по созданию радиоэлектронного модуля на борту КА КН для решения поставленной целевой задачи в конечном счете сведется к исследованию целевой функции вида:

$$\xi = \frac{\prod_{i=1}^N \left[ 1 - \prod_{j=1}^M (1 - p_j)_i \right] \cdot \prod_{i=1}^N \left[ 1 - \prod_{j=1}^M (1 - p_{jH})_i \right]}{M \cdot C_{\text{РЕГ.ан}} \cdot Y^{\left[ \ln \frac{P_n G_n}{(P_n G_n)_{\text{ан}}} + \ln \frac{N}{N_{\text{ан}}} \right]}} \rightarrow \max. \quad (9)$$

Взяв производную  $\xi'$  функции (9) по исследуемому параметру (аргументу) и затем приравняв ее к нулю, можно найти экстремумы (минимальное и максимальное значение) функции и далее произвести оптимизацию по выбранному параметру [6,7]. В качестве аргумента для производной можно взять мощность сигнала, подводимую к антенне; коэффициент усиления антенны, задаться пороговыми значениями вероятностей гарантированной регистрации наземной РЛС и точностью наведения антенны КА КН. Алгоритм оптимизации финансовых затрат по созданию целевого модуля на борту КА КН для решения целевой задачи является инвариантным для большого многообразия систем (станций, модулей) регистрации сигналов.

### Заключение

Анализ расчетов с использованием предлагаемого научно-методического аппарата применительно к функционированию орбитальной группировки космических аппаратов, состоящей из четырех КА КН на высокоэллиптической орбите и четырех КА КН на геостационарной орбите, показал, что применительно к данному составу орбитальной группировки путем оптимизации  $\xi$  можно получить комплексный выигрыш (в совокупности по вероятности решения целевой задачи и рациональной стоимости компонентов, блоков, модулей целевой нагрузки) по критерию «эффективность-стоимость» при решении поставленных целевых задач от 15 до 20 процентов. Как результат, критерий «эффективность-стоимость» является универсальной мерой степени оптимальности технического облика космического аппарата комплексного назначения и позволяет грамотно оценивать облик целевой нагрузки.

### Литература

1. Пантенков Д.Г. «Актуальность и проблематика использования космических аппаратов двойного назначения», сборник статей «Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика-2011)» - Москва. Энергоатмиздат. 2011 г. С. 250–255.
2. Пантенков Д.Г. «Проблема взвешенной интеграции двух космических аппаратов в единый с улучшенными техническими характеристиками», сборник статей «Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в инновационных проектах (Инноватика-2011)» - Москва. Энергоатмиздат. 2011 г. С. 255–258.
3. Пантенков Д.Г. «Итерационная модель оценки целесообразности проектирования космических аппаратов двойного назначения», журнал «Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов»/ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. Выпуск 11. Химки. 2011г. С. 25–40.
4. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. «Методика оценки целесообразности комплексирования задач при создании космических аппаратов», «Вестник Воронежского государственного технического университета». 2011. том 7. №6. С. 108–112.
5. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. «Марковская модель оценки целесообразности проектирования космических аппаратов двойного назначения», «Вестник Воронежского государственного технического университета». 2011. том 7. №6. С. 85–87.

6. Миротин Л.Б., Омельченко И.Н., Колобов А.А. и др. Инженерная логистика: логистически-ориентированное управление жизненным циклом продукции. Учебник для вузов. / Под редакцией Миротина Л.Б. и Омельченко И.Н. М.: Горячая линия – Телеком. 2011. 644 с.

7. Шелухин О.И. Моделирование информационных систем. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Горячая линия–Телеком. 2011. 536 с.

#### Для цитирования:

Панченков Д.Г., Гусakov Н.В., Соколов В.М. Оптимизация полезной нагрузки на борту космического аппарата комплексного назначения по критерию «эффективность–стоимость» // *i-methods*. 2010. Т. 2. № 1. С. 10–13.

## Optimization of the payload on Board the spacecraft integrated to the recruitment of the criterion "efficiency-cost"

**Panchenkov D.G.**

**Gusakov N.V.**

Ph.D.

**Sokolov V.M.**

Ph.D., senior researcher, JSC "rocket and space Corporation Energia. S.P. Korolev RSC Energia", Korolev, Moscow region.

#### Abstract

In this paper we present a methodological apparatus for optimizing target loads in spacecraft for multiple uses by solving an optimization problem according to the criterion "efficiency-cost".

**Keywords:** spacecraft; weight and overall dimensions; efficiency; the unit cost of output; payload.

#### References

1. Panchenkov D.G. "the Relevance and challenges of using space vehicles of double purpose", a collection of articles "System problems of reliability, quality, information and telecommunications and electronic technologies in innovative projects (Innovatika-2011)", Moscow. Energoatomizdat. 2011, Pp. 250–255.
2. Panchenkov D.G. "the Problem of weighted integration of the two spacecraft in a single with improved performance", collection of articles "System problems of reliability, quality, information and telecommunications and electronic technologies in innovative Pro-projects (Innovatika-2011)", Moscow. Energoatomizdat. 2011, Pp. 255–258.
3. Panchenkov D.G. "Iterative estimation model feasibility design space vehicles of double purpose", the magazine "the Topical issues of designing of space systems and complexes"/FGUP NPO im. S. A. Lavochkin. Issue 11. Khimki. 2011. Pp. 25–40.
4. Panchenkov D.G., Litvinenko, V. P., "Methodology for assessing the appropriateness of aggregation of tasks during the creation of spacecraft", "Herald of the Voronezh state technical University for the Humanities". 2011. volume 7. No. 6. Pp. 108–112.
5. Panchenkov D.G., Litvinenko V.P. "Markov model evaluating the feasibility of design-ing space vehicles of double purpose", "Herald of the Voronezh state technical University". 2011. volume 7. No. 6. Pp. 85–87.
6. Mirotin L.B., Omelchenko I.N., Kolobov A.A. and others Engineering logistics: logistics-oriented lifecycle management products. Textbook for high schools. / Edited by Miroтина B.L. and Omelchenko I.N. M.: Hot line – Telecom. 2011. 644 p.
7. Shelukhin O.I., Modeling of information systems. Textbook for high schools. 2–e Izd., Rev. and supplementary M.: Hot line–Telecom. 2010. 536 p.

#### For citation:

Panchenkov D.G., Gusakov N.V., Sokolov V.M. Optimization of the payload on Board the spacecraft is integrated to the recruitment of the criterion "efficiency-cost" // *i-methods*. 2010. Vol. 2. No. 1. Pp. 10–13.