

© А. Н. Мащенко¹, А. И. Федакин²

¹Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

²Інститут технічної механіки НАНУ і НКАУ, Дніпропетровськ

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ПО КРИТЕРИЮ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Формалізовано задачу обґрунтування параметрів систем космічного апарата в умовах конкуренції продукції на ринку космічних послуг. Параметром, що пов'язує економічні і технічні показники, є надійність. Сукупність локальних показників, що характеризують інтегральний коефіцієнт конкурентоздатності, а також його форма визначаються з урахуванням систем пріоритетів Особи, що приймає рішення.

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является быстро развивающейся областью, которая уверенно становится вторым (после спутниковой связи) направлением бизнеса, осуществляемого с помощью космических аппаратов (КА). ДЗЗ является источником данных, которые служат основой для широкого набора информационных продуктов и видов деятельности в странах всего мира.

Для того чтобы КА ДЗЗ Украины оказались рентабельными при совместной эксплуатации с КА других государств, необходимо использовать все возможности, увеличивающие конкурентоспособность национальной продукции ДЗЗ на мировом рынке. Одной из таких возможностей является оптимальный выбор технико-экономических показателей систем КА по критерию прибыли, который позволяет учесть как внешние факторы рынка, (спрос и цену на продукцию *i*-го вида), так и внутренние конструктивные и стоимостные показатели.

Непосредственное решение этой задачи требует знания количественных зависимостей прибыли от параметров систем КА, установление которых — сложная проблема. С целью снижения ее размерности учтем, что величина параметров систем определяется из необходимости обеспечения работоспособности, количественной характеристикой которой является надежность.

Поэтому представляется целесообразным вначале определить оптимальные нормы надежности составляющих подсистем, а затем — соответствующие им параметры.

Рассмотрим возможный вариант декомпозиции решения рассматриваемой задачи.

На первом этапе выбирается масса КА. Для этого

проводится анализ задач отраслей и требований к аппаратуре для их решения [1], формируются альтернативные варианты КА, отличающиеся номенклатурой решаемых задач, комплектующими элементами, массами обеспечивающих и целевых комплексов и др. Для каждого альтернативного варианта определяется математическое ожидание потенциально возможной величины прибыли в предполагаемый период эксплуатации $(0, t)$. Для КА, представляющего систему длительного действия [2], состоящей из независимых невосстанавливаемых подсистем, каждая из которых может находиться лишь в двух состояниях (работоспособности и отказа), выражение для математического ожидания прибыли представим в виде

$$\begin{aligned}
 \Pi(0, t) = & P_0 H_0 \left\{ \Phi_0 + \sum_{i=1}^{n_c} \frac{1}{r_i} \int_0^t \Phi_i(x_i) f(x_i) dx_i + \right. \\
 & \left. + \sum_{1 \leq i < j \leq h} \frac{1}{r_i r_j} \int_0^t f(x_i) dx_i \int_0^t \Phi_{ij}(x_i, x_j) f(x_j) dx_j + \dots \right\} - \\
 & - C - C_s, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где P_0, H_0 — соответственно вероятности безотказной работы обеспечивающего комплекса и аппаратуры целевого комплекса в интервале $[0, t]$; n_c — количество видов аппаратуры целевого комплекса; Φ_0 — величина дохода КА при условии, что вся аппаратура целевого комплекса была работоспособна в интервале $[0, t]$; r_i — вероятность безотказной работы аппаратуры *i*-го вида; $\Phi_i(x_i)$ — величина дохода КА при условии, что отказала только аппаратура *i*-го вида, причем отказ ее произошел в момент времени x_i ($0 < x_i < t$); $\Phi_{ij}(x_i, x_j)$ —

величина прибыли КА при условии, что отказала только аппаратура i -го и j -го видов, причем отказы их произошли в моменты времени x_i и x_j соответственно ($0 < x_i < t$, $0 < x_j < t$) и т. д.; $f_i(x_i)$ — плотность времени x_i ; C — себестоимость; C_o — стоимость эксплуатации. В случае, когда каждый вид аппаратуры целевого комплекса вносит независимую долю в общий выходной эффект, выражение (1) приобретает вид

$$P(0, t) = P_0(t) \sum_{i=1}^{n_c} \left[r_i(t) \Phi_i(t) + \int_0^t f_i(x_i) \Phi_i(x_i) dx_i \right] - C - C_o, \quad (2)$$

Величина дохода зависит от многих факторов (суммарной потребности продукции i -го вида, ее конкурентоспособности, политических, экономических и др. факторов).

Объем продаж коммерческой продукции КА ДЗЗ i -го вида Q_i определяется, прежде всего, ее суммарной потребностью $Q_{\Sigma i}$ (которая определяется по результатам прогнозов на предполагаемый период эксплуатации), числом N_{ki} прогнозируемых КА-конкурентов и ее конкурентоспособностью

$$Q_i = Q_{\Sigma i} \frac{\varphi_{0i}}{\varphi_{0i} + \sum_{j=1}^k \varphi_j},$$

где φ_{0i} и φ_j — коэффициенты конкурентоспособности продукции i -го вида проектируемого КА и КА-конкурентов соответственно.

Полагая, что суммарная потребность Q_{Σ} может быть обеспечена производительностью и временем функционирования аппаратуры, доход от продукции i -го вида будет равен

$$\Phi_i(x_i) = Q_i u_i = \gamma_i x_i u_i \frac{\varphi_{0i}}{\varphi_{0i} + \sum_{j=1}^k \varphi_j}, \quad (3)$$

где γ_i , x_i — производительность и время отказа аппаратуры i -го вида; u_i — средняя за время t цена продукции от решения задачи i -го вида. В качестве исходных данных для расчета прибыли (2) рассматриваемых альтернатив применяются данные об аналогах, которые на последующих этапах проектирования будут уточняться.

Оценка коэффициента конкурентоспособности, являющегося интегральным показателем, зависящим от ряда u_i технических, экономических, нормативных, экологических и др. параметров, без

привлечения дополнительной информации (в частности о виде зависимости, «весах» параметров) невозможна [5, 7]. В то же время прогнозирование конкурентоспособности в условиях рыночной экономики — один из важных моментов проектирования, определяющий целесообразность разработки. В связи с этим в [4] подчеркивается, что при решении уникальных многокритериальных задач выбора в качестве источника дополнительной информации необходимо использовать Лицо, принимающее решение (ЛПР), как ответственного за разработку в целом.

Из совокупности известных подходов сравнения альтернатив по многим критериям с использованием информации ЛПР для рассматриваемой задачи наиболее приемлемым является метод на основе теории многокритериальной полезности [5, 7]. Метод основан на аксиоматическом подходе, позволяет реализовать алгоритмы с проверкой на непротиворечивость и транзитивность информации ЛПР, и главное — получать количественные интегральные оценки сравнения альтернатив.

Состав локальных критериев u_i , характеризующих конкурентоспособность продукции аппаратуры целевого комплекса, зависит от требований пользователя о виде продукции (информационные материалы для дальнейшей обработки либо готовые результаты решения хозяйственных задач). В обоих случаях состав локальных критериев определяется на основании информации ЛПР путем построения функций доверия и исследования представительности критериев [7].

В [7] под функцией доверия $\mu(\varepsilon)$ понимается вероятность p истинности утверждения $u(s'') - u(s') = \varepsilon \Rightarrow s'' R s'$ для всех $s'', s' \in S$, где $u(s)$ — критерий, характеризующий соответствие систем $s \in S$ цели; R — бинарное отношение \succ^A или \succ^A (соответственно более предпочтительно по отношению к цели A либо менее предпочтительно). Обозначив через δ минимальное значение ε , принимаемое во внимание ЛПР в процессе установления предпочтительности между системами на множестве S , в [4] введены определения: при $\lim_{\varepsilon \rightarrow \delta} \mu(\varepsilon) = 1$ критерий $u(s)$ называется представительным; при $0.5 < \lim_{\varepsilon \rightarrow \delta} \mu(\varepsilon) < 1$ — косвенным и при $\lim_{\varepsilon \rightarrow \delta} \mu(\varepsilon) \leq 0.5$ — непредставительным.

В работе [7] отмечается, что только представительный критерий гарантирует истинность (с учетом представлений ЛПР) отношений предпочтительности, установленных по значениям $u(s)$. Но это не означает, что совокупность косвенных, или даже непредставительных критериев не может об-

ладать достаточно высокой представительностью.

Для продукции первого вида в число локальных критериев, обеспечивающих представительность интегрального критерия, могут входить цена и календарное время получения информации, а также [1] оперативность, число спектральных областей электромагнитного излучения в видимом, ИК-, СВЧ- и радиолокационном диапазонах, разрешение на местности в тех же диапазонах. Для продукции второго вида в число локальных критериев могут входить цена, календарное время получения информации, показатели точности решения задачи и др.

В случае, если погрешности критериев ε_i ($i = 1, \dots, n$) независимые величины, функция доверия интегрального критерия будет равна

$$\mu_{1,\dots,n}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = 1 - \prod_{i=1}^n \mu_i(\varepsilon_i),$$

где $\mu_i(\varepsilon_i) = p\{s'Rs' \mid u(s') - u(s'') = \varepsilon\}$.

Если же локальные критерии — зависимые величины, то

$$\mu_{1,\dots,n}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = 1 - \int_0^{\delta_1} \dots \int_0^{\delta_n} f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) \prod_{i=1}^n d\varepsilon_i, \quad (4)$$

где $f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ — многомерная плотность распределения.

В силу того, что локальные функции доверия $\mu_i(\varepsilon_i)$ строятся в соответствии с предпочтениями ЛПР [7], то они, как правило, будут отличны от нормального распределения. В этом случае для определения многомерной плотности $f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ необходимо воспользоваться методикой [3], позволяющей получать многомерные распределения с заданными маргинальными распределениями и зависимостью, определяемой по статистическим данным.

При достижении

$$\begin{aligned} \mu_{1,\dots,n}(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) &= p\{s'Rrs' \mid u_1(s') - u_1(s'') = \\ &= \varepsilon_1, \dots, u_n(s') - u_n(s'') = \varepsilon_n\} = \\ &= 1 - \int_0^{\delta_1} \dots \int_0^{\delta_n} f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) \prod_{i=1}^n d\varepsilon_i \geq \mu_{\tau p}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mu_{\tau p}$ — нижняя граница представительности, интегральный критерий $u^{(n)}$ позволяет производить оценку отношений предпочтительности систем с требуемой представительностью [7].

Построение интегрального критерия начинается с проверки условий независимости по приращению и предпочтению [7]. Если выполняется условие независимости по предпочтению, то интегральный критерий имеет аддитивную форму и для его построения целесообразно использовать алгоритм согласо-

ванного шкалирования, процедура которого на примере ракеты-носителя рассмотрена в работе [6]. В более общем случае, когда условия независимости по приращению или предпочтению не выполняются, но установлена справедливость условий существования и непрерывности, интегральный критерий записывается в нормальной форме [7]

$$\varphi(u) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(u^{(i)}), \quad (6)$$

где $u^{(i)} = (u_1, \dots, u_i)$ — вектор, содержащий только первые i из общего числа n критериев.

Для числа локальных критериев $n = 11-12$ определение $\varphi_i(u^{(i)})$ необходимо проводить с использованием алгоритма, основанного на представлении поверхностей безразличия в виде поверхности второго порядка [7]

$$\begin{aligned} \varphi(u) &= \sum_{i=1}^n a_{i,j} u_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n a_{ij} u_i u_j + \\ &+ \sum_{i=1}^n (a_{i,n+1} u_i + a_{n+1,n+1}), \end{aligned} \quad (7)$$

где $a_{i,j}$ определяются путем решения системы уравнений с учетом информации ЛПР об эквивалентных по предпочтительности точек.

После оценки конкурентоспособности для определения прибыли по выражению (2) необходимо иметь данные по себестоимости создания КА и стоимости его эксплуатации. Эту информацию на рассматриваемом этапе проектирования можно установить на основании статистических данных. Так, например, зависимость себестоимости КА от массы x_1 и отношений ширины обзора к разрешающей способности, умноженного на количество поддиапазонов в видимом, ИК и радиационном диапазонах и на срок существования ($x_2 \dots x_5$ соответственно), определенную по данным о восьми КА ДЗЗ, имеет вид

$$\begin{aligned} c &= -21.7 + 0.046x_1 - 0.0002x_2 + 0.0015x_3 + \\ &+ 0.0076x_4 - 0.016x_5. \end{aligned}$$

Квадрат множественного коэффициента корреляции составил 0.96.

Полученные данные позволяют по выражению (2) прогнозировать прибыль рассматриваемых альтернатив и выбрать вариант КА определенной массы.

На следующем этапе проводится традиционное проектирование с учетом полученной на предыдущем этапе информации (массы КА и его целевого комплекса, номенклатуры задач и др.). По результатам эскизного проектирования, когда становятся известными принципиальные схемы работы систем, режимы функционирования, комплекующие эле-

менты и узлы, представляется возможным определение с необходимой при инженерном проектировании точностью зависимостей масса — надежность и стоимость — надежность. Для этого могут использоваться методики оценки надежности [3]. Результаты численных расчетов масс, стоимости и соответствующих им значений надежности вариантов составляющих подсистем аппроксимируются выражениями вида [3]

$$m = a + b \lg(1 - p), \quad (8)$$

$$c = e + d \lg(1 - p), \quad (9)$$

где a , b , e и d — коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.

Предположим, что закон распределения времени до отказов систем КА является экспоненциальным. Тогда с учетом выражений (2), (8), (9) задача оптимального выбора параметров систем КА заключается в том, чтобы найти такие значения показателей интенсивностей отказов систем КА, которые доставляют максимум прибыли (2):

$$\begin{aligned} \Pi(0, t) = \exp \left(-t \sum_{i=1}^{n_{об}} \lambda_i \right) \sum_{i=1}^{n_{сп}} \left\{ \gamma_i t u_i \frac{\varphi_{0i}(e^{-\lambda_i t}, Q)}{\varphi_{0i}(e^{-\lambda_i t}, Q) + \sum_{j=1}^{N_{ki}} \varphi_j} + \right. \\ \left. + \gamma_i u_i \frac{\varphi_{0i}(e^{-\lambda_i t}, Q)}{\varphi_{0i}(e^{-\lambda_i t}, Q) + \sum_{j=1}^{N_{ki}} \varphi_j} e^{-\lambda_i t} \left[- \left(\frac{t}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_i^2} \right) \right] - \frac{1}{\lambda_i} \right\} - \\ - \sum_{i=1}^{n_{об} + n_{сп}} [e_i + d_i \lg(1 - e^{-\lambda_i t})] - C_o \rightarrow \max_{\lambda_i} \quad (10) \end{aligned}$$

при ограничении на суммарную массу КА $G_{КА}$, определенную на предыдущем этапе проектирования:

$$G_{КА} = \sum_{i=1}^{n_{об} + n_{сп}} [a_i + b_i \lg(1 - e^{-\lambda_i t})]. \quad (11)$$

После определения из системы (10), (11) оптимальных значений интенсивностей отказов систем

λ_i , по выражениям (8), (9) определяются значения массы систем m_i и себестоимостей (с учетом обработки) C_i , по которым находятся оптимальные значения параметров и стоимости обработки систем.

Если полученные оптимальные значения надежностей систем обеспечивающего и целевого комплекса существенно отличаются от принятых (по аналогам) на первом этапе проектирования, то проводится вторая итерация рассмотренного подхода определения оптимальных параметров.

1. Авдеевский В. С., Успенский Г. Р. Космическая индустрия. — М.: Машиностроение, 19989.—568 с.
2. Беляев Ю. К., Богатырев В. В., Болотин В. В. и др. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985.—608 с.
3. Конохов С. Н., Федякин А. И. Вероятностно-статистические методы проектирования систем космической техники. — Днепропетровск: Ин-т технической механики НАН Украины и НКА Украины, 1997.—250 с.
4. Ларичев О. И. Организационные системы и методы стратегического планирования научных исследований и разработок (обзор) // Автоматика и телемеханика.—1974.— № 5.—С. 133—142.
5. Ларичев О. И., Мошквич Е. М. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений. — М.: Физматгиз, 1996.—208 с.
6. Машченко А. Н., Федякин А. И. Методологические аспекты проектирования ракеты-носителя по критерию экономической эффективности // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 2/3.—С. 68—73.
7. Николаев В. И., Брук В. М. Системотехника: методы и приложения. — Л.: Машиностроение, 1985.—200 с.

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF EARTH-OBSERVATION SPACECRAFT ACCORDING TO CRITERION FOR ECONOMIC EFFICIENCY

A. N. Mashchenko, A. I. Fedyakin

The problem on validation of spacecraft systems parameters under competition conditions on the launch-services market is formalized. The reliability is considered as the parameter linking economic factors with technical ones. A set of local factors evaluating the integrated coefficient of competitiveness as well as its form are defined considering priorities of a decision-making Person.