

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ В СОСТАВЕ ГИБРИДНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. В. Васильев, О. Н. Герасимов, Н. А. Кашеев,
В. С. Чаплинский, В. П. Буц

Целевая установка

Обосновывается метод оптимизации распределения требований к уровням достижения заданных показателей надежности, живучести, помехозащищенности исходя из требования к обобщающему показателю эффективности (устойчивости).

Информационно-управляющий комплекс (ИУК) космической системы (КС) в настоящее время является структурным формированием, выполняющим функции автоматизированной системы управления (АСУ) космическими аппаратами (КА) и систем передачи-приема и распространения данных информации целевого назначения (ИЦН) – специнформации (СИ) [1–3].

Гибридная космическая система (ГКС) наблюдения, обеспечивающая многочисленных периферийных потребителей информацией целевого назначения, образует новую сложную техническую систему на основе совокупности следующих комплексов и систем:

- многоспутниковой КС наблюдения, включающей малые и микроКА (МКА);
- автономного регионального унифицированного (АРУ) ИУК, интегрирующего в одной сложной системе (и на одном пункте) функции АСУ КА и наземного спецкомплекса (НСК);
- космической системы ретрансляции (КСР), включающей специализированные спутники – ретрансляторы (СР) на геостационарной орбите (ГСО) и наземно-космические информационные сети (НКИС), в том числе с использованием целевых МКА наблюдения, навигации и связи нового поколения;
- навигационной аппаратуры потребителя (НАП) космических навигационных систем (КНС) в составе МКА.

Такая ГКС позволяет:

- существенно повысить оперативность *обновления* информации наблюдения в интересах многочисленных потребителей путем передачи СИ непосредственно потребителям на пролете МКА в их зоне видимости;
- обеспечить кардинальное решение проблемы устойчивости функционирования КС наблюдения в целом за счет новых структурных свойств – неопределенности для противоположной стороны маршрутов обмена информацией и многочисленности абонентов НКИС с возможностью их взаимозаменяемости.

Кроме того, ожидаемый экономический эффект от создания и применения такой гибридной системы космического наблюдения по сравнению с прототипами (системами и технологиями обмена информацией ранних поколений) представляется существенным за счет сокращения наземных пунктов, средств связи и передачи данных и др.

Термин ГКС может быть применим и для других объединенных комплексов и систем с целью решения специальных задач ГКС.

Под устойчивостью понимается способность системы (комплекса) поддерживать свои тактико-технические характеристики (ТТХ) на уровне, обеспечивающем заданные требования к показателям качества системы в течение заданного времени ее функционирования в условиях дестабилизирующих факторов и организованного противодействия.

Согласно приведенному определению свойство устойчивости должно включать также такое качество, выделенное в [4], как *управляемость системы (активность поведения)*, предполагаю-

щее также ее информированность о внешней среде, так как в противном случае затруднительны целенаправленные действия в игровых ситуациях.

Самоорганизация (адаптивное переустройство) – способность системы менять во времени свою структуру, характеристики и поведение с целью приспособления к изменяющимся условиям среды на основе обучения и предвидения в соответствии со всеми выделенными свойствами.

Для сложных стохастических процессов под самоорганизацией понимается способность управления этими процессами с помощью генерации комбинаций и применения интегральных воздействий при неполной информации о процессах и неполной их управляемости.

Анализ объектов исследования (космические системы, АРУ ИУК и др. [5]) позволяет сделать вывод о возможном многообразии свойств (качеств) сложных систем, не ограничиваемом сформулированными понятиями устойчивости и самоорганизации (что может быть проиллюстрировано хотя бы наименованиями стандартных разделов тактико-технических заданий создаваемых систем). Целостное исследование сложной системы требует совместного рассмотрения всех качеств [6, 7].

Этот вывод неизбежно ведет к необходимости преодоления пресловутого «проклятия многомерности» на пути к решению поставленной задачи с использованием обобщенных свойств типа «эффективности» объектов исследования, т.е. к корректной математически формализованной декомпозиции задачи по отдельным качествам, понижающей ее размерность [8–10].

Обобщенные свойства при этом могут быть представлены вероятностными формами оценки достижения системой цели (взаимодействие системы со средой носит стохастический характер), цель – формированием и реализацией полной группы случайных событий, исключая опасных события, которые могут привести к невосполнимым и недопустимым потерям. При этом требуются количественное определение потерь, классификация событий, приводящих к потерям по степени опасности и, соответственно, исключение опасных событий или их парирование с упреждением.

При декомпозиции задач синтеза технических систем с применением многочисленных обобщенных свойств типа эффективности с показателями, выраженными в вероятностной форме достижения тактических целей по каждому свойству, в совокупности составляющих эффективность (устойчивость), возникает необходимость решения одной из центральных задач – оптимального распределения требований к уровням достижения тактических целей исходя из требования к обобщающему показателю эффективности (устойчивости).

Задача оптимального распределения требований к уровням достижения тактических целей

Такая задача может быть представлена в следующем общем виде:

$$\begin{aligned} \text{Min } C, C = C_1P_1 + C_2P_2 + \dots + C_nP_n, \\ P_1 P_2 \dots P_n \geq P_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где C – суммарная стоимость системы (комплекса); $P_i, i = 1, 2, \dots, n$ – вероятности достижения тактических целей; P_0 – ограничение обобщенного показателя, удовлетворяющее потребителя системы.

Постановка задачи (1) справедлива для независимых событий достижения тактических целей, составляющих по условиям задачи полную группу событий.

Вероятности, включая P_0 , целесообразно ограничивать областями разложения в степенные ряды вблизи значений P_0 или 1, что только и имеет практический смысл. Соответственно этим областям должны определяться регрессионные зависимости, характеризующие стоимость системы.

Решение задачи (1) получено с использованием методов динамического программирования Р. Беллмана, где n – количество шагов, приближающих к обобщенному решению задачи:

$$\underline{n = 1}$$

$$\begin{aligned} \text{Min } C, C = C_1P_1, \\ P_1 = P_0. \end{aligned}$$

$n=2$

$$\begin{aligned} \text{Min } C, C &= C_1 P_1 + C_2 P_2, \\ P_1 P_2 &= P_0, \\ P_1 &= \frac{P_0}{P_2}, C = C_1 \frac{P_0}{P_2} + C_2 P_2; \end{aligned}$$

приравнявая производную функции C по P_2 к нулю, получим искомое решение

$$\begin{aligned} C_2 &= C_1 \frac{P_0}{P_2^2}; \\ P_2 &= \left(\frac{C_1}{C_2} P_0 \right)^{\frac{1}{2}}; P_1 = \left(\frac{C_2}{C_1} P_0 \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

$n=3$

$$\begin{aligned} \text{Min } C, C &= C_1 P_1 + C_2 P_2 + C_3 P_3, \\ P_1 P_2 P_3 &= P_0, \\ P_1 P_2 &= \frac{P_0}{P_3}, P_1 = \left(\frac{C_2 P_0}{C_1 P_3} \right)^{\frac{1}{2}}; P_2 = \left(\frac{C_1 P_0}{C_2 P_3} \right)^{\frac{1}{2}}; \\ C &= C_1 \left(\frac{C_2 P_0}{C_1 P_3} \right)^{\frac{1}{2}} + C_2 \left(\frac{C_1 P_0}{C_2 P_3} \right)^{\frac{1}{2}} + C_3 P_3; \end{aligned}$$

приравнявая производную функции C по P_3 к нулю, получим искомое решение

$$P_3 = \sqrt[3]{P_0 \frac{C_1 C_2}{C_3^2}}; P_2 = \sqrt[3]{P_0 \frac{C_1 C_3}{C_2^2}}; P_1 = \sqrt[3]{P_0 \frac{C_2 C_3}{C_1^2}}.$$

Общее решение на n -м шаге имеет вид

$$P_i = \sqrt[n]{P_0 \frac{\prod_{J=1, J \neq i}^{n-1} C_J}{C_i^{n-1}}}; C_{\text{Min}} = \sqrt[n]{P_0} \sum_{i=1}^n \prod_{j=1, j \neq i}^{n-1} C_J. \quad (2)$$

В силу разнородности решаемых технических задач по реализации показателей $P_i, i = 1, 2, \dots, n$, с учетом стоимости некоторые множители произведения $P_1 P_2 \dots P_n$ в зависимости от значений коэффициентов регрессии при оценках стоимости могут быть больше единицы. При этом теряется физический смысл такого показателя, как вероятность.

Тогда, дополняя полученное решение (2) ограничениями

$$P_0 < P_i < 1, i = 1, 2, \dots, n,$$

имеющими физический смысл, показатели $P_i, i = 1, 2, \dots, n$, могут быть определены следующим образом.

Показатель P_i со значением в (2) больше единицы определяется как максимально возможный (потенциально реализуемый). При этом количество переменных задачи (1) снижается на единицу с соответствующими поправками к ограничению P_0 .

Минимум унимодальной функции $C(P_1, P_2, \dots, P_n)$ может быть уточнен путем итераций.

В задачах, оперирующих со свойствами «устойчивость» и «самоорганизация», в соответствии с результатами анализа этих свойств необходимо рассмотрение совместного качества

«надежность, живучесть, помехозащищенность». При этом характеристики совместного качества могут классифицироваться на *пассивные* (нерегулируемые) в процессе выполнения функциональных задач системой и *активные* (из арсенала активности поведения – управляемости).

Тогда, рассматривая тактические качества как независимые, можно предложить следующие показатели для этих качеств:

– надежность, показатель $P_{бр}$ – вероятность безотказной работы в течение времени t :

$$P_{бр} = P_{брП} + (1 - P_{брП})P_{брА}, \quad (3)$$

где $P_{брП}$ – вероятность безотказной работы при пассивном поведении системы; $P_{брА}$ – вероятность активного парирования отказов;

– живучесть, показатель $P_{ж}$ – вероятность сохранения минимально необходимого состава функционирующих средств в течение времени $t_{п}$ проведения поражающих операций в соответствии с заданными сценариями и моделями противодействия:

$$P_{ж} = P_{жП} + (1 - P_{жП})P_{жА}, \quad (4)$$

где $P_{жП}$ – вероятность сохранения минимально необходимого состава средств в течение времени $t_{п}$ за счет стойкости средств, не требующей активного поведения; $P_{жА}$ – вероятность активного парирования опасных поражающих воздействий;

– помехозащищенность, показатель $P_{пмз}$ – вероятность успешного выполнения сеанса связи длительностью T в условиях радиоэлектронного подавления (РЭП) в соответствии с заданными сценариями и моделями противодействия:

$$P_{пмз} = P_{пмзП} + (1 - P_{пмзП})P_{пмзА}, \quad (5)$$

где $P_{пмзП}$ – вероятность успешного выполнения сеанса связи длительностью T в различных условиях за счет характеристик помехоустойчивости радиолиний, не требующей активного поведения системы; $P_{пмзА}$ – вероятность активного парирования эффективных помех в условиях организованного РЭП;

– управляемость, совокупность $P_{упр}$ показателей активных действий по обеспечению требований к показателям надежности, живучести, помехозащищенности:

$$P_{упр} = (P_{брА}, P_{жА}, P_{пмзА}). \quad (6)$$

Обобщенный показатель устойчивости с учетом выражений (3)–(6) приобретает следующий вид:

$$P_y = P_{бр}P_{ж}P_{пмз} = [P_{брП} + (1 - P_{брП})P_{брА}] \cdot [P_{жП} + (1 - P_{жП})P_{жА}] \cdot [P_{пмзП} + (1 - P_{пмзП})P_{пмзА}]. \quad (7)$$

Распределительная задача оптимизации шести характеристик $P_{брП}$, $P_{брА}$, $P_{жП}$, $P_{жА}$, $P_{пмзП}$, $P_{пмзА}$ может быть решена в два этапа.

Этап 1. Задача определения соотношений между пассивной и активной составляющей каждого свойства (надежности, живучести, помехозащищенности) представляется в соответствии с (1) в следующем виде:

$$\text{Min } [C_{П}P_{П} + C_{А}P_{А}], \quad (8)$$

$$P_{П} + (1 - P_{П})P_{А} \geq P_i,$$

где $P_{П}$ – пассивная составляющая; $P_{А}$ – активная составляющая (i -го свойства).

Решение задачи (8):

$$P_{А} = \frac{P_i - P_{П}}{1 - P_{П}};$$

$$\text{Min } [C_{П}P_{П} + C_{А} \frac{P_i - P_{П}}{1 - P_{П}}];$$

$$C_{П} - C_{А} \frac{1 - P_i}{(1 - P_{П})^2} = 0;$$

$$P_{\Pi}^2 - 2P_{\Pi} + 1 - \frac{C_A}{C_{\Pi}}(1 - P_i) = 0;$$

$$P_{\Pi} = 1 - \left[\frac{C_A}{C_{\Pi}}(1 - P_i) \right]^{\frac{1}{2}}; P_A = 1 - \left[\frac{C_{\Pi}}{C_A}(1 - P_i) \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (9)$$

$$C_{\min} = \sum_{i=1}^n C_i P_i = \sum_{i=1}^n [C_{\Pi i} + C_{A i} - 2\sqrt{C_{A i} C_{\Pi i}}(1 - P_i)]. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует

$$C_i P_i = C_{\Pi i} + C_{A i} - 2\sqrt{C_{\Pi i} C_{A i}}(1 - P_i), \quad (11)$$

где P_i – результат решения задачи (1) – заданное значение.

Производная выражения (11) по P_i имеет вид

$$C_i = \sqrt{C_{\Pi i} C_{A i}}(1 - P_i)^{-1}. \quad (12)$$

Из выражения (12) следует, что переменные $C_{\Pi i}$ и $C_{A i}$ определяются гиперболической зависимостью

$$C_{\Pi i} C_{A i} = C_i^2(1 - P_i),$$

которую удобнее представить в следующем виде:

$$a_{A i} a_{\Pi i} = 1 - P_i, \quad (13)$$

где $a_{\Pi i} = C_{\Pi i}/C_i$, $a_{A i} = C_{A i}/C_i$.

Если ввести физически осмысленные ограничения $0 < C_{\Pi i} / C_i \leq 1$, $0 \leq C_{A i} / C_i < 1$, то можно получить следующие оценки, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Зависимости $a_{\Pi} = a_{\Pi}(a_A, P)$ – без индексов i

a_A	$P = 0,9$	$P = 0,99$	$P = 0,999$
0	$a_{\Pi} = 1$	$a_{\Pi} = 1$	$a_{\Pi} = 1$
0,1	$a_{\Pi} \approx 1$	$a_{\Pi} = 0,1$	$a_{\Pi} = 0,01$
0,5	$a_{\Pi} = 0,2$	$a_{\Pi} = 0,02$	$a_{\Pi} = 0,002$
0,9	$a_{\Pi} = 0,1$	$a_{\Pi} = 0,01$	$a_{\Pi} = 0,001$

Из выражения (13) и табл. 1 следует, что для малых значений вероятности $1 - P_i$ стоимостные составляющие a_{Π} , a_A могут быть значительно снижены.

Выводы

1. Разработанный метод решения задачи оптимального распределения требований к уровням достижения тактических целей сложной системы исходя из требования к обобщающему показателю эффективности (устойчивости) позволил математически формально декомпозировать задачу.

2. Сформулированы направления дальнейших исследований по каждому свойству сложной системы:

- количественное определение потерь в процессе функционирования системы;
- классификация событий, приводящих к потерям по степени опасности;
- поиск способов исключения опасных событий или их парирования с упреждением.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» (Соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015 г.) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Список литературы

1. Кашеев, Н. А. Особенности решения задач синтеза информационно-управляющих комплексов / Н. А. Кашеев, В. С. Чаплинский // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 3–10.
2. Modeling the Effect of Local Thermal Effect on the Stress-strain state of the Conductive Layer Printed Circuit Board / A. Telegin, A. Zatytkin, M. Kalaev, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43827–43830.
3. Лысенко, А. В. Особенности разработки типологии устройств амортизации радиоэлектронных средств на основе фасетной структуры / А. В. Лысенко // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 151–155.
4. Флейшман, Б. С. Элементы теории потенциальной эффективности сложных систем / Б. С. Флейшман. – М. : Советское радио, 1971. – 224 с.
5. Кашеев, Н. А. Радиотехнические средства управления космическими аппаратами / Н. А. Кашеев ; ГОУ ВПО «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)». – М., 2005. – 202 с.
6. Study Algorithm Speed Signal Generating Feedback for Information-measuring System Control Active Vibration Protection Red / P. Bushmelev, A. Pivkin, B. Kumatov, A. Lysenko, S. Zatytkin // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43831–43834.
7. Lysenko, A. An Information-measuring Control System for Active Vibroprotection of Radio-electronic Devices / A. Lysenko, A. Zatytkin, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43835–43838.
8. Пивкин, А. В. Автоматизированная методика управления физическими параметрами собственных форм бортовой радиоэлектронной аппаратуры на резонансных частотах / А. В. Пивкин, Д. А. Голушко, Н. К. Юрков // Научный альманах. – 2015. – № 9, вып. 11. – С. 791–794.
9. Буц, В. П. Моделирование развития трещин в проводниках печатных плат как последствий технологических дефектов / В. П. Буц, А. М. Телегин, М. П. Калаев // Молодой ученый. – 2015. – № 21 (101), ч. II. – С. 127–131.
10. Лысенко, А. В. Методика моделирования влияния внешних механических воздействий на динамические параметры РЭА в среде MATHCAD / А. В. Лысенко // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 68–69.

Васильев Сергей Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, начальник отдела,
Научно-исследовательский центр
Центрального научно-исследовательского института
Войск воздушно-космической обороны
(141091, Россия, Московская обл., г. Королев,
ул. Тихонравова, 29)
E-mail: pashakolendo@mail.ru

Герасимов Олег Николаевич

начальник военного представительства
Министерства обороны РФ,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8)
E-mail: gera0502@mail.ru

Кашеев Николай Александрович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
космических систем им. А. А. Максимова –
филиал Государственного космического
научно-производственного центра им. М. В. Хруничева
(141091, Россия, Московская обл, г. Юбилейный,
ул. Тихонравова, 9)
E-mail: info@niiks.com

Vasil'ev Sergej Vladimirovich

candidate of technical sciences,
senior staff scientist, head of department,
Scientific Research Center
of Central Scientific Research Institute
of Armies of Aerospace Defence
(141091, 29 Tihonravova street, Korolev,
Moscow region, Russia)

Gerasimov Oleg Nikolaevich

head of the military mission
of The Ministry of defense of RF,
Scientific-Research Institute of Physical Measurements
(440026, 8 Volodarsky street, Penza, Russia)

Kashcheev Nikolay Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
senior research manager,
Scientific Research Institute of Space Systems
named after A. A. Maksimov –
branch of State Space Scientific Production Center
named after M. V. Hrunichev
(141091, 9 Tihonravova street, Yubileyny,
Moscow region, Russia)

Чаплинский Владимир Степанович

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
космических систем им. А. А. Максимова –
филиал Государственного космического
научно-производственного центра им. М. В. Хруничева
(141091, Россия, Московская обл, г. Юбилейный,
ул. Тихонравова, 9)
E-mail: info@niiks.com

Буц Виктор Петрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Аннотация. Обосновывается метод оптимизации распределения требований к уровням достижения заданных показателей надежности, живучести, помехозащищенности исходя из требования к обобщающему показателю эффективности (устойчивости). Информационно-управляющий комплекс космической системы представляется элементом структуры, выполняющим функции автоматизированной системы управления космическими аппаратами и систем передачи-приема и распространения данных информации целевого назначения – специнформации. Решена задача обоснования характеристик информационно-управляющих комплексов гибридной космической системы наблюдения на основе совместных свойств «надежность–живучесть–помехозащищенность», пассивной и активной составляющей по каждому свойству, включающей управляемость и самоорганизацию исследуемых объектов, объединенных обобщенным свойством «устойчивость». Разработанный метод решения задачи оптимального распределения требований к уровням достижения тактических целей сложной системы, исходя из требования к обобщающему показателю эффективности (устойчивости), позволил математически формально декомпозировать задачу, а также сформулировать направления дальнейших исследований по каждому свойству сложной системы.

Ключевые слова: информационно-управляющий комплекс, гибридная космическая система, устойчивость, надежность, живучесть, помехозащищенность.

Chaplinskiy Vladimir Stepanovich

doctor of technical sciences, professor,
senior research manager,
Scientific Research Institute of Space Systems
named after A. A. Maksimov –
branch of State Space Scientific Production Center
named after M. V. Hrunichev
(141091, 9 Tihonravova street, Yubileynyy,
Moscow region, Russia)

Buts Viktor Petrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. Substantiates the optimization method distribution requirements-level achievements of the set of indicators of reliability, durability, noise immunity based on the requirements of generalising indicators of efficiency (sustainability). Information and control complex systems of space-cop seems element structure, performing the functions of automated spacecraft control systems and systems to Chi-reception and dissemination purpose in-formation – spetsin-formation. The problem study the characteristics of information-control complexes hybrid space system of observation-tion on the basis of the joint properties of "reliability–durability–noise immunity " passive and active component of each property, including managed-bridge and self-organization of the objects combined generalized property of "sustainability ". The developed method of solving the problem of an optimal allocation of requirements for levels of achievement of tactical objectives of a complex system based on the requirements of generalising indicators of efficiency (sustainability), formally allowed mathematically decompose the problem and formulate a direction for further research on each property of a complex system.

Key words: an information-operating complex, hybrid space system, stability, reliability, survivability, noise immunity.

УДК 829.7/629.76/.78.085

Методы обеспечения устойчивости обмена информацией на основе самоорганизующихся информационно-управляющих комплексов в составе гибридных космических систем / С. В. Васильев, О. Н. Герасимов, Н. А. Кашеев, В. С. Чаплинский, В. П. Буц // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 2 (14). – С. 23–29.