

ТОМ 2, №1 (23)

ЯНВАРЬ - МАРТ 2018

ISSN 2618-7957

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И ТЕХНОЛОГИИ

SPACECRAFTS &
TECHNOLOGIES

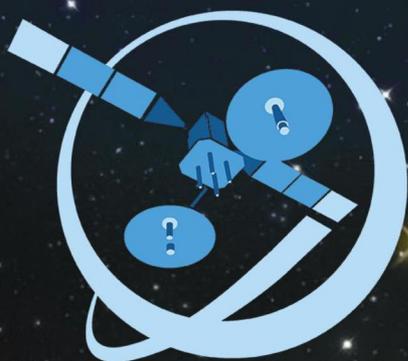
МКА «Михаил Решетнев» («МИР»)
Производитель: АО «ИСС»



Технологическая платформа

НИСС

Национальная Информационная
Спутниковая Система



НИСС

Деятельность технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» направлена на скоординированное решение комплекса образовательных, научных, технических, технологических и экономических проблем создания и использования перспективных космических систем и комплексов.

Стратегической целью технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» является разработка совокупности «прорывных» технологий для:

- радикального повышения показателей пользовательских свойств космических аппаратов новых поколений и доступности персональных пакетных космических услуг;
- значительного расширения присутствия на мировых рынках высокотехнологичной продукции и услуг в космической, телекоммуникационной и других некосмических отраслях экономики.

Журнал является официальным научным изданием технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система».

Сайт ТП «НИСС»: tp.iss-reshetnev.ru



Уважаемые коллеги!

Уже третий год технологическая платформа «Национальная информационная спутниковая система» издает отраслевой журнал, в котором публикуются основные результаты научных исследований и разработок по актуальным вопросам создания современных космических аппаратов, новых материалов и технологий, применяемых при создании космической техники, развития перспективных космических услуг. Освещаются проблемы космического приборостроения, вопросы, посвященные инновационным инструментам и экономическим аспектам развития космической отрасли.

За время своего существования редакция журнала проделала большую работу по его совершенствованию и приведению к современным международным стандартам.

Журнал выходит на новый уровень, обеспечивающий его заметную роль в среде отечественных журналов космической тематики и включение в международные информационно-аналитические системы. Настоящий выпуск журнала технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» уже увидит свет под новым названием - «Космические аппараты и технологии» («Spacecraft & Technologies»).

Уверен, что ребрендинг журнала с последующим развитием позволит ему стать важным инструментом для усиления научного потенциала участников нашей технологической платформы и отечественной космической отрасли в целом.

Н. А. Тестоведов

**Генеральный директор АО «ИСС»,
Президент ТП «НИСС»,
главный редактор – председатель
редакционного совета, чл.-кор. РАН**

Космические аппараты и технологии

Ежеквартальный научный
журнал

Издается с января 2012 года

ISSN 2618-7957

Издатель и учредитель:
Ассоциация «Технологическая платформа
«Национальная информационная спутниковая система»

Журнал «Космические аппараты и технологии» –
рецензируемый научный журнал технологической
платформы «Национальная информационная
спутниковая система».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций
(свидетельство ПИ № ФС 77 - 72862 от 22.05.2018 г.)

Импакт-фактор РИНЦ за 2017 г. – 0,150

«Космические аппараты и технологии» публикуют
оригинальные работы, обзорные статьи, очерки
и обсуждения, охватывающие последние достижения
в области космонавтики.

Тематические направления журнала:

- ракетно-космическая техника;
- новые материалы и технологии в космической
технике;
- космическое приборостроение;
- космические услуги;
- инновации и экономика космической отрасли.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде
не опубликованные и не представленные к печати
в других изданиях. Статьи, отбираемые для публикации
в журнале, проходят закрытое (двойное слепое)
рецензирование.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной
основе.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала
возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com,
www.cyberleninka.ru

Адрес редакции: 662972, Красноярский край,
ЗАТО г. Железногорск, ул. Ленина, 52
E-mail: isercit@gmail.com; <http://www.journal-niss.ru>

Адрес издателя:
662972, Красноярский край,
ЗАТО г. Железногорск, ул. Ленина, 52, корп. 4, ком. 224

Допечатная подготовка:
ООО «Центр информации»
660079, г. Красноярск, ул. Свердловская, 23, к. 32
lev_zhivilo@mail.ru

Разработка макета Л. М. Живило
Редактор Н. Ф. Ткачук
Компьютерная верстка: Л. М. Живило, И. В. Манченкова

Тираж 200 экз. Заказ 5592
Распространяется бесплатно

Отпечатано Библиотечно-издательским комплексом
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-67; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru

Главный редактор
Тестоедов Николай Алексеевич
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, председатель редакционного совета
(Железногорск)

Заместитель главного редактора
Халиманович Владимир Иванович
канд. физ.-мат. наук, профессор (Железногорск)

Ответственный секретарь
Хныкин Антон Владимирович
канд. техн. наук (Железногорск)

Редакционная коллегия
Гарин Евгений Николаевич
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)
Головёнкин Евгений Николаевич
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Двирный Валерий Васильевич
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Ковель Анатолий Архипович
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Косенко Виктор Евгеньевич
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Лопатин Александр Витальевич
д-р техн. наук (Красноярск)

Охоткин Кирилл Германович
д-р физ.-мат. наук, доцент (Железногорск)

Пономарев Сергей Васильевич
д-р физ.-мат. наук (Томск)

Цибульский Геннадий Михайлович
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

Чеботарёв Виктор Евдокимович
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

Матвеев Станислав Алексеевич
канд. техн. наук (Санкт-Петербург)

Непомнящий Олег Владимирович
канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

Смотров Андрей Васильевич
канд. техн. наук (Жуковский)

Сухотин Виталий Владимирович
канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

Хартов Станислав Викторович
канд. техн. наук (Красноярск)

Глез Мари-Пьер
профессор (Тулуза, Франция)

Фернандес Кабальеро Антонио
профессор (Альбасете, Испания)

Нинкович Деян
д-р техн. наук (Белград, Сербия)

Редакционный совет
Аннин Борис Дмитриевич
академик РАН, д-р физ.-мат. наук (Новосибирск)
Шабанов Василий Филиппович
академик РАН, д-р физ.-мат. наук (Красноярск)
Попов Гарри Алексеевич
академик РАН, д-р техн. наук (Москва)
Васильев Валерий Витальевич
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук (Хотьково)
Махутов Николай Андреевич
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук (Москва)
Сяхье Сергей Григорьевич
чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук (Томск)
Шайдуров Владимир Викторович
чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук (Красноярск)
Чернявский Александр Григорьевич
(Королёв)

Медведский Александр Леонидович
д-р физ.-мат. наук (Жуковский)

Овчинников Сергей Геннадьевич
д-р физ.-мат. наук, профессор (Красноярск)

Пчеляков Олег Петрович
д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск)

Хартов Виктор Владимирович
д-р техн. наук, профессор (Королёв)

Spacecrafts & Technologies

Scientific quarterly journal

Published since 2012

ISSN 2618-7957

Publisher and founder
Association «Technology Platform
«National Information Satellite System»

«Spacecrafts & Technologies» is peer-reviewed scientific journal of Technology Platform «National Information Satellite System».

The journal is registered by the the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (PI certificate no. FS 77 - 72862, May 22, 2018).

The journal publishes original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in space.

The journal directions:

- Rocket and space equipment;
- New materials and technologies in space equipment;
- Space instrument engineering;
- Space Services;
- Innovation and economics of the space industry.

«Spacecrafts & Technologies» publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on www.elibrary.ru, scholar.google.com, www.cyberleninka.ru

Chief Editor

Testoyedov N. A.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering,
Chairman of Editorial Board

Deputy Chief Editor

Khalimanovich V. I.

PhD in Physics and Mathematics, Professor

Executive Secretary

Khnykin A. V.

PhD in Engineering

Editorial Staff

Garin E. N.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Golovenkin E. N.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Dvirny V. V.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Kovel A. A.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Kosenko V. E.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Lopatin A. V.

Doctor of Engineering (Russia)

Okhotkin K. G.

Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor (Russia)

Ponomarev S. V.

Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Tsybulsky G. M.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Chebotarev V. E.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

Matveev S. A.

PhD in Engineering (Russia)

Nepomnyashy O. V.

PhD in Engineering, Associate Professor (Russia)

Smotrov A. V.

PhD in Engineering (Russia)

Sukhotin V. V.

PhD in Engineering, Associate Professor (Russia)

Khartov S. V.

PhD in Engineering (Russia)

Gleizes Marie-Pierre

Professor (France)

Fernández-Caballero Antonio

Professor (Spain)

Ninković Dejan

Doctor of Engineering (Serbia)

Editorial Board

Annin B. D.

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Shabanov V. Ph.

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Popov G. A.

Academician of RAS, Doctor of Engineering (Russia)

Vasiliev V. V.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering (Russia)

Makhutov N. A.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering (Russia)

Psakhie S. G.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Shaidurov V. V.

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Cherniavsky A. G.

(Russia)

Medvedtskiy A. L.

Doctor of Physics and Mathematics (Russia)

Ovchinnikov S. G.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russia)

Pchelyakov O. P.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russia)

Khartov V. V.

Doctor of Engineering, Professor (Russia)

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

**А. В. Колычев, В. А. Керножицкий, Л. П. Юнаков,
А. А. Левихин**
РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ОБРАЗЦА
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТЕРМОЭМИССИОННОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. А. Толмачев, В. Ф. Волков, А. С. Андрианов
АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОЙ КОРРЕКТИРОВКИ
ПРОЦЕССА РАЗВЕРТЫВАНИЯ СЛОЖНЫХ
ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ

А. А. Толмачев, М. А. Прохоров, А. С. Андрианов
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТЕГОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ
ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Д. С. Викторов, Е. В. Самоволина
АЛГОРИТМ ПАРИРОВАНИЯ СБОЕВ В БОРТОВЫХ
ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ
СО СТРУКТУРНО-ВРЕМЕННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

**В. Н. Тяпкин, В. Н. Ратушняк, Д. Д. Дмитриев,
А. Б. Гладышев**
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ ЗА СЧЕТ
КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ В НАВИГАЦИОННОЙ
АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Д. С. Викторов, Е. В. Пластинина
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ
СИГНАЛА С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ
В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ
КВАНТОВАТЕЛЯХ ФАЗЫ И НАПРЯЖЕНИЯ

Д. С. Викторов, Е. Н. Жидков, Р. Е. Жидков
МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ
КОЛИЧЕСТВА НЕОБНАРУЖЕННЫХ ДЕФЕКТОВ
ЕСТЕСТВЕННОЙ СЕМАНТИКИ ПРОГРАММЫ
С ТРЕБУЕМОЙ СТЕПЕНЬЮ ДОВЕРИЯ
ПРИ ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ ЦИФРОВЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**С. А. Семенов, В. С. Семенов, В. В. Поддубский,
Е. Н. Жидков**
ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ
О ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИХ ГРУППОВЫХ
ОБЪЕКТАХ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ
С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

**ИННОВАЦИИ И ЭКОНОМИКА
КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ**

Л. П. Ивлева
РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА
К ОЦЕНКЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ, СОЗДАВАЕМОЙ
ПО ГОСУДАРСТВЕННЫМ КОНТРАКТАМ

ROCKET AND SPACE EQUIPMENT

5 **A. V. Kolychev, V. A. Kernozhitskiy, L. P. Unakov,
A. A. Levihin**
DEVELOPMENT OF THE LABORATORY SAMPLE
OF THE HYDRODYNAMIC THERMOEMISSION
CONVERTER OF POWER PLANTS
OF SPACECRAFTS

10 **A. A. Tolmachev, V. F. Volkov, A. S. Andrianov**
ALGORITHM OF OPTIMAL CORRECTION OF
THE PROCESS OF DEPLOYMENT OF COMPLEX
TECHNICAL COMPLEXES OF SPACE
INFRASTRUCTURE

17 **A. A. Tolmachev, M. A. Prohorov, A. S. Andrianov**
DETERMINATION OF STABILITY CATEGORY FOR
DISTRIBUTED AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

SPACE INSTRUMENT ENGINEERING

22 **D. S. Viktorov, E. V. Samovolina**
THE ALGORITHM OF PARRY FAILURES IN THE
ONBOARD DIGITAL COMPUTER COMPLEXES
WITH THE STRUCTURAL AND TIME REDUNDANCY

30 **V. N. Tyapkin, V. N. Ratushnyak, D. D. Dmitriev,
A. B. Gladyshev**
INCREASE OF NOISE SUPPRESSION EFFICIENCY
DUE TO CORRECTION OF FREQUENCY
CHARACTERISTICS OF RECEIVING CHANNELS IN
THE NAVIGATION EQUIPMENT OF CONSUMERS

38 **D. S. Viktorov, E. V. Plastinina**
THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF
THE FUNCTIONAL TRANSFORMATIONS
OF A SIGNAL WITH ANGULAR MODULATION
IN SEQUENTIALLY THE CONNECTED
QUANTIZERS OF A PHASE AND TENSION

47 **D. S. Viktorov, E. N. Zhidkov, R. E. Zhidkov**
METHODICAL APPROACH FOR EVALUATION
OF THE NUMBER UNDETECTED NATURAL
SEMANTICS DEFECTS WITH THE REQUIRED
DEGREE OF CONFIDENCE IN THE VERIFICATION
OF SPACE VEHICLES ON-BOARD COMPUTER
SYSTEMS SOFTWARE

53 **S. A. Semenov, V. S. Semenov, V. V. Poddubsky,
E. N. Zhidkov**
THE APPROACH TO PROCESSING AEROSPACE
GROUP OBJECTS DATA INTO INFORMATION
SYSTEM WITH LIMITED CAPABILITIES

**INNOVATION AND ECONOMICS OF
THE SPACE INDUSTRY**

61 **L. P. Ivleva**
DEVELOPMENT OF THE METHODICAL
APPROACH TO ESTIMATION OF INTELLECTUAL
PROPERTY, CREATED BY STATE CONTRACTS

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ОБРАЗЦА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТЕРМОЭМИССИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**А. В. Колычев, В. А. Керножицкий, Л. П. Юнаков,
А. А. Левихин**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Приведены сведения о разрабатываемом в БГТУ «ВОЕНМЕХ» гидродинамическом термоэмиссионном преобразователе, а именно о варианте его лабораторного образца. Лабораторный образец предназначен для проведения комплексных экспериментальных исследований гидродинамического термоэмиссионного преобразователя для двух видов рабочих тел – продуктов сгорания органического топлива и инертных газов с добавками щелочных металлов.

В ходе разработки лабораторного образца гидродинамического термоэмиссионного преобразователя было высказано предложение о его создании на основе приведения продуктов сгорания органического топлива. В данном случае существенно упрощается создание лабораторного образца по причине более низкой трудоемкости организации пламени.

Основными элементами разработанного лабораторного образца являются катод – источник электронов и анод – элемент, воспринимающий электроны, вышедшие с катода, соединенные через полезную нагрузку.

В данном случае существует проблема изменения термоэмиссионных характеристик источника электронов – катода, как за счет процессов «отравления» (адсорбции), так и за счет возможных химических превращений. Проведенные предварительные исследования показали, что при определенной температуре рабочего тела уменьшение тока не происходит.

Областью применения таких преобразователей являются автономные источники питания арктических транспортных средств и космических аппаратов со сверхдлительным сроком эксплуатации.

Ключевые слова: термоэлектронная эмиссия, гидродинамический термоэмиссионный преобразователь, высокоскоростные потоки слабоионизированной плазмы.

Увеличение количества частных предприятий, обеспечивающих вывод полезного груза на орбиты, ведет к увеличению количества космических аппаратов (КА), работающих на околоземных орбитах и в межпланетном пространстве. Поэтому актуальным является развитие бортовых источников электроэнергии, получаемых в том числе путем преобразования избыточной тепловой энергии. К таким КА можно отнести и разрабатываемый в РФ транспортно-энергетический модуль, предназначенный как для довыведения КА на различные орбиты, очистки околоземного

пространства от осколков и мусора, так и для проведения дальних межпланетных автоматических экспедиций.

Предполагается, что в основе энергообеспечения указанных КА станет система с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую энергию. Поэтому задача разработки и совершенствования таких систем электрообеспечения тоже является актуальной.

В БГТУ «ВОЕНМЕХ» разработан и исследуется новый тип гидродинамических термоэмиссионных преобразователей (ГИТЭП) [1–3], в основу которых положен процесс организации в активной зоне термоэмиссионного преобразователя высокоскоростных потоков инертных газов

(СИП). Причем добавление легкоионизируемых добавок, например цезия, калия, бария, позволит существенно увеличить ток термоэмиссии при нагреве [4–9]. Это позволяет обеспечить большие зазоры при сравнимой с классическими ТЭП генерируемой мощности, а значит, повысить на данной основе надежность и долговечность ГИТЭП как источников электрической энергии КА.

В ходе исследований возникло предположение, которое заключается в том, что подобные ГИТЭП могут работать на основе газов – продуктов сгорания органического топлива. Это позволит расширить область применения ГИТЭП на объекты, предназначенные для освоения новых территорий, например Арктики.

Мировая новизна и работоспособность ГИТЭП подтверждены патентом на изобретение № 2538768 и патентом на полезную модель № 139811 [1–2].

Следующим этапом предполагаются экспериментальные исследования лабораторного образца (ЛО) ГИТЭП. Для этого на первом этапе разработан облик ЛО ГИТЭП на продуктах сгорания органического топлива, которые получить и применить для исследований не представляется проблематичным.

Предлагаемое устройство (рис. 1) включает в себя катод, анод, токовывод, токоввод, полезную нагрузку, канал движения рабочего тела, подставку, фиксатор, крепеж, гильзу, гайки и электроизолирующие прокладки.

Катод предназначен для обеспечения эмиссии электронов при нагреве, анод – для восприятия электронов из потока рабочего тела и перенаправления его в токовывод, полезную нагрузку и токоввод. Причем работа выхода катода больше работы выхода анода, что приводит к возникновению разности потенциалов, которая усиливается в 1,5–2,0 раза за счет острой формы катода. В полезной нагрузке совершается полезная работа электронов за счет тепла, полученного при нагреве катода. Канал движения рабочего тела предназначен для направленного движения рабочего тела от катода на выход. Подставка предназначена для надежного расположения ЛО ГИТЭП в заданном месте, фиксатор – для фиксации анода в заданном положении при воздействии на него набегающего потока рабочего тела.

Крепеж предназначен для жесткой связи с ЛО ГИТЭП с платформой, гильза – для охлаждения анода за счет большей интегральной сте-

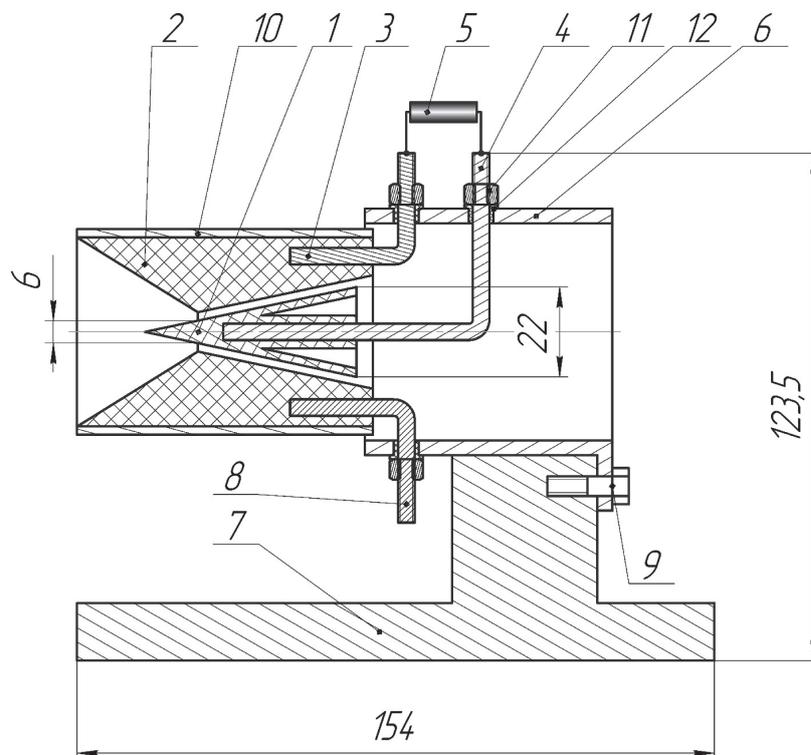


Рис. 1. Предлагаемое устройство гидродинамического генератора: 1 – катод; 2 – анод; 3 – токовывод; 4 – токоввод; 5 – полезная нагрузка; 6 – канал движения рабочего тела; 7 – подставка; 8 – фиксатор; 9 – крепеж; 10 – гильза; 11 – гайка; 12 – электроизолирующая прокладка

пени черноты, гайки – для фиксации через токоввод и токовывод катода и анод.

ЛО ГИТЭП работает следующим образом. На катод начинает подаваться рабочее тело, например, продукты сгорания пропана и кислорода. В результате катод нагревается до температур, при которых с его поверхности начинают выходить горячие электроны и за счет проводящей среды продуктов сгорания и контактной разности потенциалов между катодом и анодом попадают на анод и воспринимаются им. Часть тепловой энергии «горячих» электронов идет на нагрев анода, а за счет другой они совершают полезную работу в полезной нагрузке, куда попадают через токовывод. Одновременно за счет развитой внешней поверхности анода, его массивности и степени черноты температура анода поддерживается на уровне ниже температуры катода, что способствует усилению разности потенциалов в течение всего времени работы. После полезной нагрузки «остывшие» электроны через токовывод попадают в катод, и цикл генерации электроэнергии повторяется заново.

На основе данных по плотности тока эмиссии и ресурса выбранных материалов при соответствующих температурах [4–9, 10] можно предполагать следующие характеристики.

Ожидаемые характеристики ЛО ГИТЭП

Суммарная электрическая мощность	4–5 Вт
Средняя плотность тока эмиссии	1–2 А/см ²
Средняя температура катода	1600–1700 К
Средняя площадь эмиссии катода	5–6 см ²
Генерируемое напряжение	0,75–1,0 В

Так, достоверно известно, что существуют материалы с повышенной эмиссионной способностью (пониженной работой выхода) при нагреве, например торированный вольфрам, который функционирует в среде аргона. В этом случае «отравления» не происходит и за счет более низкой работы выхода электроды функционируют при более низких температурах и не разрушаются.

Однако, в отличие от варианта с инертными газами, в случае применения продуктов сгорания органического топлива существует возможность «отравления» катода и уменьшения термоэмиссии за счет образования новых химических соединений. Но наличие высокоскоростного высокотемпературного потока и высокой температуры катода может привести к компенсации процессов «отравления» путем десорбции и последующего

уноса «отравляющих» элементов. В результате катод может функционировать аналогично функционированию ГИТЭП в среде инертных газов. Предварительные испытания показали, что на некоторых материалах и при определенной температуре продуктов сгорания органического топлива изменений в величине тока не происходит. Однако полученные данные требуют подтверждения.

Материалы можно разделить на две группы: материалы электродов (катода и анода) и материалы конструкции.

В качестве материалов катода и анода предлагаются материалы из гесаборидов, характеризующихся высокими термоэмиссионными и прочностными свойствами при высоких температурах [4–9, 10]. Причем разница между работами выхода катода и анода приводит к появлению полезного напряжения, которое усиливается за счет острой формы катода.

На поверхности катода и анода при высоких температурах могут образовываться химические соединения, уменьшающие термоэмиссионную способность катода и анода, в том числе оксиды и карбиды. Однако наличие высокоскоростного потока позволит обеспечить унос образующихся химических соединений без существенных изменений термоэмиссионных характеристик электродов. Кроме того, в [6] утверждается, что величина низкой работы выхода гесаборидов объясняется внутренней структурой материала.

В качестве материалов токовывода, токоввода и канала движения рабочего тела предлагается освоенная промышленностью сталь ХН78Т с высокими прочностными характеристиками при высоких температурах. Для гильзы предлагается хромоникелевый сплав с интегральной степенью черноты 0,64–0,76. При окислении при более высоких температурах степень черноты может вырасти до 0,86.

Для платформы, крепежа и гаек предлагается применять стандартный для таких изделий материал 14Х17Н2.

Для электроизолирующих прокладок предлагается хорошо зарекомендовавший себя в подобных системах материал на основе Al₂O₃.

В настоящий момент ведется выпуск конструкторской документации на элементы ЛО ГИТЭП.

Параллельно ведется разработка ЛО ГИТЭП на основе применения инертных газов.

Разработанные технические решения при создании ЛО ГИТЭП обладают технологической новизной и простотой, базируются на применении отечественных материалов и технологий. Это обуславливает высокую надежность создаваемых на их основе энергетических установок и сокращает сроки их отработки и ввода в эксплуатацию.

Список литературы

1. Термоэмиссионный электрогенерирующий канал : пат. 2538768 Рос. Федерация : МПК G21C 3/40 / Керножицкий В.А., Колычев А.В., Атамасов В. Д., Романов А. В., Шаталов И. В. ; заявители и патентообладатели: Керножицкий В. А., Колычев А. В., Атамасов В. Д., Романов А. В., Шаталов И.В. – № 2013143069/07 ; заявл. 20.09.2013 ; опублик. 10.01.2015, Бюл. № 1.
2. Термоэмиссионный электрогенерирующий канал : пат. на полезную модель № 139811 Рос. Федерация: МПК G21C 3/40 / Керножицкий В. А., Колычев А. В., Ипатов О. С.; заявители и патентообладатели БГТУ Керножицкий В. А., Колычев А. В., Ипатов О. С. – № 2013145364/07 ; заявл. 09.10.2013 ; опублик. 27.04.2014, Бюл. № 12.
3. Колычев А. В., Керножицкий В. А. Гидродинамические термоэмиссионные преобразователи энергетических установок космических аппаратов со сверхдлительным сроком активного существования // Исследования на-укограда. 2017. Т. 1, № 3. С. 126–129. DOI: 10.26732/2225-9449-2017-3-126-129.
4. Ушаков Б. А., Никитин В. Д., Емельянов И. Я. Основы термоэмиссионного преобразования энергии. М. : Атомиздат, 1974. 288 с.
5. Квасников Л. А., Кайбышев В. З., Каландаришвили А. Г. Рабочие процессы в термоэмиссионных преобразова-телях ядерных энергетических установок. М. : Изд-во МАИ, 2001. 240 с.
6. Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма / под ред. Б. Я. Мойжеса, Г. Е. Пикуса. М. : Наука, 1973.
7. Стаханов И. П., Черновец В. Е. Физика термоэмиссионных преобразователей. М. : Энергоатомиздат, 1985.
8. Фоменко В. С. Эмиссионные свойства материалов. Киев : Наук. думка, 1981. 338 с.
9. V. C. Wilson, S. P. Podkulski. Characteristics of a thermionic converter with a chloride vapor deposited tungsten emitter (110) and a nickel collector // NASA contractor report CR-1416. WASHINGTON DC.
10. Кресанов В. С., Малахов Н. П., Морозов В. В. и др. Высокоэффективный эмиттер электронов на основе гекса-борида лантана. М. : Энергоатомиздат, 1987. 152 с.

История статьи

Поступила в редакцию 5 марта 2018 г.

Принята к публикации 5 апреля 2018 г.

DEVELOPMENT OF THE LABORATORY SAMPLE OF THE HYDRODYNAMIC THERMOEMISSION CONVERTER OF POWER PLANTS OF SPACECRAFTS

A. V. Kolychev, V. A. Kernozhitskiy, L. P. Unakov, A. A. Levihin

Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov, Saint Petersburg, Russian Federation

Data on the hydrodynamic thermoemission converter developed in D.F. Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», namely on option of its laboratory sample are provided in the present article. During development laboratory sample of hydrodynamic thermoemission converter was suggested to create laboratory sample of hydrodynamic thermoemission converter on the basis of reduction of products of combustion of organic fuel. This case creation of the Leningrad Region because of lower labor input of the organization of a flame significantly becomes simpler.

Basic elements developed by the Leningrad Region are the cathode – a source of electrons and the anode – the element perceiving the electrons which have left from the cathode, connected through payload.

However, in this case there is a problem of change of thermoemission characteristics of a source of electrons – the cathode, both due to processes of «poisoning» (adsorption), and due to possible chemical transformations. However, the conducted preliminary researches have shown that at a certain temperature of a working body reduction of current happens.

The laboratory sample is intended for carrying out complex pilot studies of the hydrodynamic thermoemission converter for two types of working bodies - combustion products of organic fuel and inert gases with additives of alkaline metals. The scope of such converters is independent power sources of the Arctic vehicles and spacecrafts with the superlong term of operation.

Keywords: thermionic emission, hydrodynamic thermionic converter, high-speed flows of easy ionized plasma.

References

1. Kolychev A. V., Kernozhitskiy V. A., e.a. (RU) *Termoemissionnii elektrogeneriruyuschii kanal* [The thermoemission electrogenerating channel]. Patent RU 2538768, 2015, bulletin no. 1. 13 p.
2. Kolychev A. V., Kernozhitskiy V. A., e.a. (RU) *Termoemissionnii elektrogeneriruyuschii kanal* [The thermoemission electrogenerating channel]. Patent RU 139811, 2014, bulletin no. 12. 13 p.
3. Kolychev A.V., Kernozhitskiy V.A. Hydrodynamic thermionic converters power plants of spacecrafts with the superlongterm lifecicle. The Research of the Science City, 2017, vol. 1, no. 3, pp. 126–129. DOI: 10.26732/2225-9449-2017-3-126-129.
4. Ushakov B. A., Nikitin V. D., Emelyanov I. Ya. *Osnovy termoemissionnogo preobrazovaniya energii* [Fundamentals of thermionic energy conversion]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974. 288 p.
5. Kvasnikov L. A., Kaybyshev V. Z., Kalendarishvili A. G. *Rabochie protsessy v termoemissionnykh preobrazovatelyakh yadernykh energeticheskikh ustanovok* [Working processes in thermionic converters of nuclear power plants]. Moscow, MAI Publ., 2001. 240 p.
6. *Termoemissionnye preobrazovateli i nizkotemperaturnaya plazma* [Thermoemission converters and low-temperature plasma]. Pod red. B. YA. Mojzhesa, G. E. Pikusa. Moscow, Nauka Publ., 1973.
7. Stahanov I. P., Chernovec V. E. *Fizika termoemissionnykh preobrazovatelej* [Physics of thermionic converters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985.
8. Fomenko V. S. *Emissionnye svoystva materialov* [Emissive properties of materials]. Kiev, Nauk. dumka Publ., 1981. 338 p.
9. Wilson V. C., Podkulski S. P. Characteristics of a thermionic converter with a chloride vapor deposited tungsten emitter (110) and a nickel collector. NASA contractor report CR-1416. WASHINGTON DC.
10. Kresanov V. S., Malahov N. P., Morozov V. V. *Vysokoehffektivnyj ehmitter ehlektronov na osnove gekhsaborida lantana* [Highly efficient electron emitter based on lanthanum hexaboride]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 152 p.

Article history

Received 5 March 2018

Accepted 5 April 2018

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ПРОЦЕССА РАЗВЕРТЫВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

А. А. Толмачев¹, В. Ф. Волков², А. С. Андрианов²

¹Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, г. Тверь, Российская Федерация

²Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассматривается задача управления расходом ресурсов в процессе развертывания сложных технических комплексов, таких как малогабаритная модульная квантово-оптическая система «Сажень-ТА». Развертывание сложных технических комплексов для их применения по целевому назначению обычно ограничено жесткими директивными сроками, поэтому любая задержка недопустима. Ее устранение может быть реализовано чаще всего только за счет привлечения дополнительных ресурсов на последующих этапах. Разработанный алгоритм базируется на принципе оптимальности Р. Беллмана, позволяющем разрабатывать гибкую программу управляющих воздействий, зависящих от конкретного исхода каждого этапа, длительность которого превысила заданный норматив. Данная программа может быть реализована в соответствующих системах поддержки принятия решений, а также включена в имитационные модели процессов развертывания и применения квантово-оптической системы «Сажень-ТА». В статье описывается детальный алгоритм оптимальной корректировки, соответствующий нормальному распределению продолжительности каждого из этапов. Оперативные характеристики развертывания сложных технических комплексов определяются требованиями вышестоящих уровней управления, а специфика задач, решаемых потребителями, может ограничить функционирование сложных технических комплексов пределами одного технологического цикла. На практике из-за влияния случайных или неучтенных факторов всегда существует риск не уложиться в заданный заказчиком срок. Один из возможных подходов к расчету данных рисков заключается в последовательном уточнении значений вероятностей успешного выполнения задачи развертывания с учетом фактического времени, затраченного на предыдущие этапы.

Ключевые слова: адаптивная корректировка, развертывание, инновационная космическая инфраструктура, ретроспективная развертка, принцип оптимальности, условно-оптимальное управление, дополнительные ресурсы.

Введение

Рассмотрим процесс управления развертыванием сложных технических комплексов (СТК), функционирующих по жесткому временному регламенту. Оперативные характеристики развертывания СТК определяются требованиями вышестоящих уровней управления, а специфика задач, решаемых потребителями, может ограничить функционирование СТК пределами одного технологического цикла. На практике из-за влияния случайных или неучтенных факторов всегда существует риск не уложиться в заданный заказ-

чиком срок. Один из возможных подходов к расчету данных рисков заключается в последовательном уточнении значений вероятностей успешного выполнения задачи развертывания с учетом фактического времени, затраченного на предыдущие этапы.

Постановка задачи

Обозначим $z_{\text{пл}}$ плановое (нормативное) значение продолжительности всего цикла развертывания системы; \hat{t}_i – продолжительность i -го этапа, $i = (1, N)$, т. е. $\sum_{i=1}^N \hat{t}_i^{\text{пл}} = z_{\text{пл}}$.

Будем полагать, что параметры распределения величин \hat{t}_i и $\hat{z} = \sum_{i=1}^N \hat{t}_i$ однозначно связаны с соответствующими директивными характеристиками.

Пусть первый этап процесса развертывания был реализован за время t_1^* , причем $t_1^* > t_1^{пл}$, т. е. величина $t_1^* > t_1^{пл}$ – это величина задержки (опоздания), и продолжительность выполнения задачи развертывания подлежит уточнению:

$$\hat{z}_1 = \frac{\hat{z}}{t_1^*} = t_1^* + \hat{t}_2 + \hat{t}_3 + \dots + \hat{t}_N \quad [1].$$

Обозначим $1 - \gamma_{t_1^*} = R_{t_1^*}$ – риск невыполнения требований потребителя (заказчика) по сроку развертывания малогабаритной модульной квантово-оптической системы (ММОС) «Сажень-ТА». Применяв аппарат теории вероятностей, получим:

$$\varphi_{t_1^*}^* = \int_0^{z_{пл}} \varphi_{\hat{z}_1}(t) dt,$$

где

$$\gamma_{\hat{z}_1} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ju(t-t_1^*)} du * \prod_{i=2}^N e^{ju x} \varphi_{t_i}(x; A_{\langle K_i \rangle}) dx.$$

При невыполнении неравенства $\gamma_{t_1^*} \geq \gamma_{дир}$, где $\gamma_{дир}$ – директивное значение, на оставшихся этапах необходимо проведение дополнительных оперативных мероприятий по обеспечению гарантированного выполнения задачи развертывания с требуемой вероятностью $\gamma_{дир}$ в заданный срок $z_{пл}$. В результате этих мероприятий в конечном счете произойдет корректировка параметров $A_{\langle K_i \rangle}$ оставшихся этапов. В данной статье ограничимся рассмотрением корректировки только одного последующего этапа.

Обозначим $Y_{\langle K_2 \rangle}$ дополнительно привлекаемые ресурсы, т. е. $A_{\langle K_2 \rangle} = A_{\langle K_2 \rangle} + Y_{\langle K_2 \rangle}$; $f^{(2)}$ – функция зависимости стоимости $\Delta s^{(2)}$ корректировки от значений дополнительных ресурсов, т. е. $\Delta s^{(2)} = f^{(2)}(Y_{\langle K_2 \rangle})$ [2].

Тогда вектор корректировок должен обеспечивать выполнение равенства $\gamma_{t_i} = \gamma_{дир}$.

Пусть реализовано $(v - 1)$ этапов, т. е.

$$\frac{\hat{z}}{T_{(v-1)}^*} = \hat{z}_{(v-1)} = \sum_{i=1}^{(v-1)} t_i^* + \hat{t}_v + \dots + \hat{t}_N,$$

тогда риск невыполнения задачи развертывания в заданный срок с учетом исхода $(v - 1)$ -го этапов определяется по формуле

$$R_{T_{(v-1)}^*} = 1 - \int_0^{z_{пл}} \gamma_{\hat{z}/T_{(v-1)}^*}(t) dt,$$

где

$$\gamma_{\hat{z}/T_{(v-1)}^*} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ju \left(t - \sum_{i=1}^{(v-1)} t_i^* \right)} du * \prod_{i=v}^N e^{ju x} \varphi_{t_i^*}(x; A_{\langle K_i \rangle}) dx.$$

Задача оптимальной корректировки процесса развертывания формулируется следующим образом. Требуется определить такие значения $\hat{Y}_{\langle K_v \rangle}$ вектора корректировок на каждом этапе, для которых минимизируются дополнительно привлекаемые ресурсы при ограничении на риск невыполнения задач развертывания в заданный срок [3].

$$\Delta s(\hat{Y}_{\langle K_2 \rangle}, \dots, \hat{Y}_{\langle K_N \rangle}) = \sum \Delta s^{(v)}(\hat{Y}_{\langle K_v \rangle}) \rightarrow \min_{Y_{\langle i \rangle}} \Delta s(Y_{\langle K_2 \rangle}, \dots, Y_{\langle K_N \rangle}) \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\gamma_1(t_1^*, \hat{Y}_{\langle K_1 \rangle}) = \gamma_{дир};$$

$$\gamma_2(t_1^*, t_2^*, \hat{Y}_{\langle K_1 \rangle}) = \gamma_{дир}; \quad \varphi_{t_2}(t) = \varphi_{t_2}(t, (A_{\langle K_2 \rangle} + \hat{Y}_{\langle K_N \rangle}));$$

.....

$$\gamma_{N-1}(t_1^*, t_2^*, \dots, \hat{Y}_{\langle K_{N-1} \rangle}) = \gamma_{дир};$$

$$\varphi_{t_{N-1}}(t) = \varphi_{t_{N-1}}(t, (A_{\langle K_{N-1} \rangle} + \hat{Y}_{\langle K_{N-2} \rangle})).$$

Специфика данной задачи оптимизации (многоэтапность процесса, случайный характер исхода каждого этапа, зависимость исхода этапа от корректировки параметров распределения его продолжительности, аддитивность показателя (1) делают естественным обращение к алгоритмам стохастического динамического программирования для получения решения задачи. Для некоторых законов распределения величин t_i и небольшого числа этапов решение может быть получено аналитически. Покажем это на примере четырехэтапного процесса развертывания для варианта нормального закона распределения продолжительности величин \hat{t}_i .

Параметр состояния

Проведем следующие рассуждения. Пусть реализован первый этап, он продолжался t_1^* единиц времени и вероятность γ_1 оказывается меньше заданной $\gamma_{дир}$.

Надо полагать, что стоимость дополнительных ресурсов, выделяемых и используемых на 2-м этапе, пропорциональна величине «опоздания» $(t_1^* - m_1)$.

Пусть после корректировки параметров $M[\hat{t}_2], \sigma[\hat{t}_2]$ реализован 2-й этап и $\gamma_2^* < \gamma$.

Тогда стоимость дополнительно используемых на 3-м этапе ресурсов будет пропорциональна суммарной величине «опоздания»: $(t_1^* - m_1 + t_2^* - m_2)$.

Аналогично, $\Delta s^{(4)} \sim t_1^* - m_1 + t_2^* - m_2 + t_3^* - m_3$.

Выберем в качестве параметра состояния \hat{x} величину «опоздания». Это дискретная случайная величина, принимающая значения:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= t_1^* - m_1; \\ \hat{x}_2 &= t_1^* - m_1 + t_2^* - m_2; \\ \hat{x}_3 &= t_1^* - m_1 + t_2^* - m_2 + t_3^* - m_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Алгоритм динамической корректировки

Вероятность своевременного информационного обеспечения с учетом исхода t_1^* первого этапа равна:

$$\Delta s^{(2)} \sim t_1^* - t_1^{\text{пл}} = t_1^* - m_1;$$

$$\gamma_1^* = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{z_1^{\text{ле}} - t_1^* - m_2 - m_3 - m_4}{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 \cdot \sqrt{2}}} \right) + 1 \right], \quad (3)$$

где $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$.

При $\gamma_1^* < \gamma$:

$$\begin{aligned} m_2' &= m_2 + y_1, \sigma_2' = \sigma_2 + y_1', \\ \text{т.е. } Y_{\langle K_2 \rangle} &= y_1 y_1'^T. \end{aligned} \quad (4)$$

Затраты на корректировку равны: $\Delta s^{(2)} = \Delta s^{(2)}(\hat{x}_1, y_1, y_1')$, а компоненты вектора корректировки должны удовлетворять равенству

$$\frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{z_1^{\text{ле}} - t_1^* - m_2 - y_1 - m_3 - m_4}{\sqrt{(\sigma_2 + y_1')^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 \cdot \sqrt{2}}} \right) + 1 \right] = \gamma \quad (5)$$

или $y_1' = \Psi_1(y_1, t_1^*)$.

Пусть $t_2 = t_2^{**} = t_2^*(y_1, y_1')$. Вероятность γ_2^{**} равна:

$$\frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{z_1^{\text{пл}} - t_1^* - t_2^{**} - m_3 - m_4}{\sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_4^2 \cdot \sqrt{2}}} \right) + 1 \right] = \gamma_2^{**}. \quad (6)$$

При $\gamma_2^{**} < \gamma$:

$$\left. \begin{aligned} m_3' &= m_3 + y_2, \sigma_3' = \sigma_3 + y_2'; \\ Y_{\langle K_3 \rangle} &= y_2 y_2'^T; \\ \Delta s^{(3)} &= \Delta s^{(3)}(\hat{x}_2, y_2, y_2'). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Введем понятие «суммарного показателя затрат на корректировку», после реализации и корректировки третьего этапа он равен:

$$\begin{aligned} \hat{\eta}_{2,3}(\hat{x}_1, y_1, y_1', y_2, y_2') &= \\ &= \Delta s^{(2)}(\hat{x}_1, y_1, y_1') + \Delta s^{(3)}(\hat{x}_2, y_2, y_2'), \end{aligned} \quad (8)$$

где компоненты y_2, y_2' вектора корректировки на третьем этапе удовлетворяют равенству:

$$\frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{z_1^{\text{пл}} - t_1^* - t_2^{**} - m_3 - y_2 - m_4}{\sqrt{(\sigma_3 + y_2')^2 + \sigma_4^2 \cdot \sqrt{2}}} \right) + 1 \right] \geq \gamma \quad (9)$$

или $y_2' = \Psi_2(y_2, t_1^*, t_2^{**})$.

Аналогично рассуждая, получим задачу определения оптимальных (в смысле выбранного критерия) значений вектора корректировки. Заметим, что обратить в минимум величину $\hat{\eta}_{2,3,4}$ нельзя, т.к. при любой нашей корректировке суммарные затраты $\hat{\eta}_{2,3,4}$ (а также и затраты $\Delta s^{(v)}$ на каждом шаге) остаются случайной величиной. Однако мы можем выбрать такую корректировку, при которой среднее значение $M[\hat{\eta}_{2,3,4}]$ стоимости дополнительно используемых ресурсов будет минимально [4, 5].

Функция дополнительных затрат

Пусть $t_1 = t_1^*$. Чтобы «уложиться» в заданное время $z^{\text{пл}}$, нужно каким-то образом распределить «опоздание» $x_1 = t_1^* - m_1$ по оставшимся этапам. Если мы хотим компенсировать это «опоздание» x_1 на втором этапе, то, очевидно, должны проводить такую корректировку параметров распределения его продолжительности, которая уменьшит и математическое ожидание \bar{t}_2 , и среднее квадратическое отклонение σ_{i_2} , т.е. должно быть:

$$\Delta \bar{t}_2 = \bar{t}_2' - \bar{t}_2 < 0,$$

$$\Delta \sigma_{i_2} = \sigma_{i_2}' - \sigma_{i_2} < 0.$$

При этом очевидно, что стоимость корректировки пропорциональна модулям величин \bar{t}_2, σ_{i_2} , т.е. $\Delta s^{(2)} \sim |\bar{t}_2|$; $\Delta s^{(2)} \sim |\sigma_{i_2}|$.

$$\text{Но } \Delta \bar{t}_2 = y_1, \Delta \tau_{i_2} = y_1'.$$

Можно доказать, что среднее значение суммарного показателя эффективности корректировки равно: $\hat{\eta}_{2,3,4}(x_1, y_1, y_1', y_2, y_2', y_3, y_3') =$

$$= \sum_{v=1}^3 c_v^x x_v + c_v^{\Delta m} y_v^2 + c_v^{\Delta \sigma} y_v',$$

где

$$\begin{aligned} x_1 &= t_1^* - m_1, y_1' = \Psi_1(y_1, t_1^*), \\ x_2 &= x_1 + y_1, y_2' = \Psi_2(y_2, t_1^*, t_2^{**}), \\ x_3 &= x_2 + y_2, y_3' = \Psi_3(y_3, t_1^*, t_2^{**}, t_3^{***}). \end{aligned} \quad (10)$$

Составление и решение рекуррентных функциональных уравнений

Сформулируем задачу оптимизации корректировки процесса развертывания для рассматриваемого примера. Требуется определить такие значения $\tilde{y}_1, \tilde{y}_1', \tilde{y}_2, \tilde{y}_2', \tilde{y}_3, \tilde{y}_3'$ компоненты вектора корректировки на каждом шаге, которые дают минимум среднего суммарного показателя затрат на корректировку (10):

$$\begin{aligned} \eta_{2,3,4}(x_1, \tilde{y}_1, \tilde{y}_1', \tilde{y}_2, \tilde{y}_2', \tilde{y}_3, \tilde{y}_3') = \\ = \min_{\{Y\}}(x_1, \tilde{y}_1, \tilde{y}_1', \tilde{y}_2, \tilde{y}_2', \tilde{y}_3, \tilde{y}_3') = \mu \end{aligned}$$

при ограничениях:

$$\left. \begin{aligned} y_1' &= \Psi_1(y_1, t_1^*), \\ y_2' &= \Psi_2(y_2, t_1^*, t_2^{**}), \\ y_3' &= \Psi_3(y_3, t_1^*, t_2^{**}, t_3^{***}). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Для отыскания решения задачи введем в рассмотрение функцию:

$$\mu_N(x) = \min_{\{Y\}} \eta_{2,3,\dots,N}(x, y_1, y_1', \dots, y_{N-1}, y_{N-1}'). \quad (12)$$

Пусть $\mu_1(x)$ – средние минимальные затраты на корректировку программы работ в одношаговой операции, начинающейся в состоянии x .

Для второго этапа (первого шага):

$$\mu_1(x) = \min_{y_{1y}, y_{1y}'} \Delta s^{(2)}(x, y_{1y}, y_{1y}') \quad (13)$$

при $y_{1y}' = \Psi_1(y_{1y}, t_1^*)$.

Далее переходим к 2-шаговой операции:

$$\mu_2(x) = \min_{y_{2y}(x), y_{2y}'(x)} \left[\Delta s^{(2)}(x, y_{2y}, y_{2y}') + \mu_1(x_2) \right]$$

и к 3-шаговой операции, объединяя при этом 2-й и 3-й шаги в один шаг. Тогда в соответствии с принципом оптимальности

$$\mu_3(x) = \min_{y_{31}, y_{31}'} \Delta s^{(2)}(x_2, y_{31}, y_{31}' + \mu_2(x_2)) \quad (14)$$

при $y_{3y}' = \Psi_3(y_{3y}, t_1^*)$.

Величина $\mu_2(x_2)$ определяется так же, как $\mu_2(x_1)$, однако на вспомогательные переменные y_{21}, y_{21}' накладывается ограничение $y_{21}' = \Psi_2(y_{21}, t_1^*, t_2^{**})$, а на вспомогательные переменные y_{22}, y_{22}' используемые для определения $\mu_1(x_3)$, – ограничение $y_{22}' = \Psi_3(y_{22}, t_1^*, t_2^{**}, t_3^{***})$:

$$\left. \begin{aligned} \mu_2(x_2) &= \min_{y_{21}, y_{21}'} \left[\Delta s^{(3)}(x_2, y_{21}, y_{21}') + \mu_1(x_3) \right]; \\ y_{21}' &= \Psi_2(y_{21}, t_1^*, t_2^{**}), x_2 = x_1 + y_{1y}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_1(x_3) &= \min_{y_{22}, y_{22}'} \Delta s^{(4)}(x_3, y_{22}, y_{22}'); \\ y_{22}' &= \Psi_3(y_{22}, t_1^*, t_2^{**}, t_3^{***}), x_3 = x_2 + y_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Рекуррентные соотношения (14), (15), (16) соответствуют ретроспективной развертке (обратному ходу) алгоритма, а значения:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{3y}(x), \tilde{y}'_{3y}(x), \tilde{y}_{2y} = \tilde{y}_{21}, \tilde{y}'_{2y} = \\ = \tilde{y}'_{21}, \tilde{y}_{1y}(x) = y_{22}, \tilde{y}'_{1y}(x) = y'_{22} \end{aligned}$$

являются условно-оптимальными значениями компонентов вектора корректировки [6].

Решив последовательно функциональные уравнения (14), (15), (16), при $x = x_1 = t_1^* - m_1$, определяем минимальные средние дополнительные затраты на развертывание:

$$\mu = \mu_3(x_1). \quad (17)$$

Затем, построив прямую развертку (прямой ход алгоритма), определяем оптимальные значения компонент вектора корректировки [7].

Оптимальная корректировка на 2-м этапе:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}_1 &= \tilde{y}_3(x_1), \\ \tilde{y}'_1 &= \tilde{y}'_3(x_1). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Оптимальная корректировка на 3-м этапе:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}_2 &= \tilde{y}_{2y}(x_1), \\ \tilde{y}'_2 &= \tilde{y}'_{2y}(x_1). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Оптимальная корректировка на 4-м этапе:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}_3 &= \tilde{y}_{1y}(x_1), \\ \tilde{y}'_3 &= \tilde{y}'_{1y}(x_1). \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Пример работы алгоритма

Рассмотрим пример работы алгоритма оптимальной корректировки процесса развертывания сложных технических комплексов космической

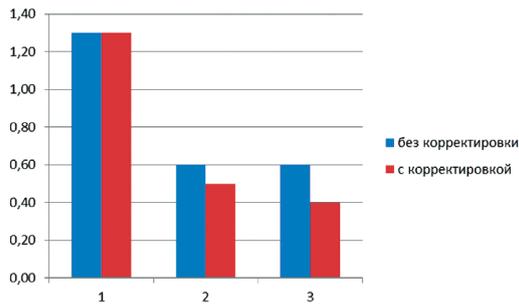


Рис. 1. Время этапов развертывания до и после корректировки

плуатационной практики. Проведем моделирование процессов развертывания по 200 раз, каждый без коррекции и с ней. Усреднённые результаты моделирования показаны на рис. 1.

Как видно из результатов, после корректировки плана развертывания время первого этапа развертывания превышает директивное на 30 %, как и без корректировки, а время второго и третьего этапов снизилось на 10 % и 20 % соответственно. Таким образом, время развертывания уменьшилось с 2,5 часа до 2,2 часа.

Заключение

Из вышеизложенного метода управления следует, что найденная оптимальная корректировка (18–20) является адаптивной и зависит от того, как будет развиваться случайный процесс развертывания.

Мы не определили жесткую «программу корректировки», но указали для каждой фазы процесса то «управление», которым следует отвечать на любой случайный исход предыдущей фазы.

Представленный алгоритм может быть переработан для других видов закона распределения продолжительности каждой из фаз, а также для вариантов с перестановкой этапов (например, вследствие изменения приоритетов или при целенаправленной рандомизации чередования фаз) [8, 9, 10]. Точность оценивания выигрыша от оптимизации в основном будет определяться степенью адекватности зависимостей, используемых при расчете затрат $\Delta \hat{s}^{(v)}$.

инфраструктуры. При помощи имитационного моделирования создадим две модели развертывания сложных технических комплексов космической инфраструктуры, таких как ММКОС «Сажень-ТА», при этом в одной из моделей будет применен алгоритм корректировки. Процесс развертывания данных комплексов согласно эксплуатационной документации производится в три этапа: 1) выбор места установки комплекса; 2) установка комплекса на выбранном месте; 3) настройка и начало работы комплекса. На каждом из этапов комплекс подвержен ряду случайных событий, замедляющих развертывание комплекса и приводящих к срыву плана по развертыванию. Согласно эксплуатационной документации время на развертывание составляет 2 часа: первый этап – 1 час, второй и третий этапы – по 30 минут, соответственно вероятность выполнения задачи за это время должна равняться 1. Средние вероятности событий, задерживающих развертывание, и время задержек были получены в ходе полевых испытаний и экс-

Список литературы

1. Александров А. Э., Якушев Н. В. Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом разброса времени доставки // Управление большими системами. М. : ИПУ РАН, 2006, вып. 12–13. С. 5–14.
2. Бородинова И. А., Сараев Л. А. Стохастические транспортные задачи // Вестник Самарского госуниверситета. 2010. Вып. 7 (81). С. 1–20.
3. Грушин Д. А. Построение модели идентификации рисков при реализации компонентов системы // Системы управления бизнес-процессами. 2014. № 13. С. 10–15.
4. Иконникова А. Д., Соколов Б. В. Динамическая модель планирования, модернизации и функционирования информационной системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. № 11. С. 62–69.
5. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М. : АСТ, 2006. 502 с.
6. Толмачёв С. Г. Принятие проектных решений на основе нечеткого отношения предпочтения // Информационно-управляющие системы. СПб., 2014. № 5 (72). С. 42–51.
7. Фридман А. Я., Курбанов В. Г. Ситуационное моделирование надежности и безопасности промышленно-природных систем // Информационно-управляющие системы. СПб., 2014. № 4 (71). С. 32–41.
8. Лясковский В.Л. [и др.]. Общесистемное проектирование и содержание работ по проектированию АСОИУ : учеб. пособие. Тверь : ВА ВКО, 2010. 188 с.
9. Наблюдение и измерение характеристик космических объектов : учеб. пособие / В. Н. Алдохина, А. А. Бабишкин, В. О. Королев, Д. А. Рогов, Р. В. Катюха ; под общ. ред. В. Н. Алдохиной. СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского, 2016. 174 с.

10. Волков В. Ф., Толмачев А. А. Методика обоснования рационального варианта системы информационного обеспечения АСУ специального назначения // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. СПб., 2014. № 5. С. 52–59.

История статьи

Поступила в редакцию 6 марта 2018 г.

Принята к публикации 9 апреля 2018 г.

ALGORITHM OF OPTIMAL CORRECTION OF THE PROCESS OF DEPLOYMENT OF COMPLEX TECHNICAL COMPLEXES OF SPACE INFRASTRUCTURE

A. A. Tolmachev¹, V. F. Volkov², A. S. Andrianov²

¹Military Aerospace Defense Academy, Tver, Russian Federation

²Military Space Academy, Saint Petersburg, Russian Federation

The problem of resource consumption control in the process of deployment of complex technical complexes, such as small-sized modular quantum-optical system "Sazhen-TA" is considered. The deployment of complicated technical complexes for their use for the intended purpose are usually limited to hard policy terms, therefore, any delay is unacceptable. Its elimination can be realized, most often, only by attracting additional resources in the subsequent stages. The developed algorithm is based on the principle of optimality of R. Bellman, which allows not to determine the final plan of correction, but to develop a flexible program of control actions that depend on the specific outcome of each stage, the duration of which exceeded the specified standard. This program can be implemented in appropriate decision support systems, as well as included in the simulation models of the deployment and application of quantum-optical system "Sazhen-TA". The article describes a detailed algorithm of optimal correction corresponding to the normal distribution of the duration of each stage. Operational characteristics of expansion of difficult technical complexes are defined by requirements of higher levels of management, and the specifics of the tasks solved by consumers can limit functioning of difficult technical complexes to limits of one production cycle. In practice because of influence of random or unaccounted factors there is always a risk not to meet the deadline set by the customer. One of possible approaches to calculation of these risks consists in consecutive specification of values of probabilities of successful performance of a problem of expansion taking into account the actual time spent for the previous stages.

Keywords: adaptive adjustment, the deployment of innovative space infrastructure, the retrospective scan, principle of optimality, conditionally-optimal control, additional resources.

References

1. Aleksandrov A. E., Yakushev N. V. *Stokhasticheskaya postanovka dinamicheskoy transportnoy zadachi s zaderzhkami s uchetom razbrosa vremeni dostavki* [Stochastic statement of the dynamic transport problem with delays taking into account the spread of the delivery time]. *Upravleniye bol'shimi sistemami*. Moscow, IPU RAN, 2006, no. 12-13, pp. 5–14. (In Russian)
2. Borodinova I. A., Sarayev L. A. *Stokhasticheskiye transportnyye zadachi* [Stochastic transport problems]. *Vestnik Samarskogo Gosuniversiteta*, 2010, no. 7 (81), pp. 1–20. (In Russian)
3. Grushin D. A. *Sistemy upravleniya biznes – protsessami* [Building a risk identification model for the implementation of system components], 2014, no. 13, pp. 10-15. (In Russian)
4. Ikonnikova A. D., Sokolov B. V. *Dinamicheskaya model' planirovaniya, modernizatsii i funktsionirovaniya informatsionnoy sistemy* [Dynamic model of planning, modernization and functioning of the information system]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye*, 2008, no. 11, pp. 62–69. (In Russian)
5. Petukhov G.B., Yakunin V.I. *Metodologicheskiye osnovy protsessa proyektirovaniya tselenapravlennykh protsessov i tselestremlyennykh sistem* [Methodological basis of external design of purposeful processes and purposeful systems]. Moscow, AST Publ., 2006. 502 p.
6. Tolmachov S.G. *Prinyatiye projektnykh resheniy na osnove nechetkogo otnosheniya predpochteniya* [Adoption of design solutions based on a fuzzy preference relation]. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy*, Saint-Petersburg, 2014, no. 5 (72), pp. 42–51. (In Russian)

7. Fridman A. YA., Kurbanov V. G. *Situatsionnoye modelirovaniye nadezhnosti i bezopasnosti promyshlennno-prirodnykh sistem* [Situational modeling of reliability and safety of industrial natural systems]. Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy, Saint-Petersburg, 2014, no. 4 (71) pp. 32–41. (In Russian)
8. Lyaskovskiy V. L. e.a. *Obshchesistemnoye proyektirovaniye i sodержaniye rabot po proyektirovaniyu ASOIU: uchebnoye posobiye* [System-wide design and maintenance of design works of ASOIU: a tutorial]. Tver', VA VKO Publ., 2010, 188 p.
9. Aldokhina V. N., Babishkin A. A., Korolev V. O., Rogov D. A., Katyukha R. V. *Nablyudeniye i izmereniye kharakteristik kosmicheskikh ob'yektov: uchebnoye posobiye* [Observation and measurement of the characteristics of space objects: a tutorial]. Saint-Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhayskogo, 2016. 174 p.
10. Volkov V.F. Tolmachev A.A. *Metodika obosnovaniya racional'nogo varianta sistemy informacionnogo obespecheniya ASU special'nogo naznachenija* [The method of substantiation of a rational variant of the information system of the special purpose ACS]. Naukojomiye tehnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli, Saint-Petersburg, 2014, no. 5, pp. 52–59. (In Russian)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТЕГОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А. А. Толмачев¹, М. А. Прохоров², А. С. Андрианов²

¹Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова,
г. Тверь, Российская Федерация

²Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

В настоящее время космические системы и средства стали одним из основных инструментов обеспечения боевой и повседневной деятельности вооруженных сил развитых государств мира. В современных условиях космические системы встают в ряд стратегических компонент, устойчивость функционирования которых критична для сохранения военно-стратегического равновесия. Анализ конфликтов последних десятилетий показал тенденцию к смещению противоборства в космическую сферу и киберпространство. Космические системы и средства позволяют существенно повысить боевые возможности войск, а государство, не обладающее возможностью использования средств вооруженной борьбы, размещенных в воздушно-космической сфере, или допустившее просчеты в политике развития и использования своих космических систем и средств, будет обречено на гарантированное поражение в будущих военных конфликтах. Обороноспособность и безопасность Российской Федерации непосредственно зависят от состояния и возможностей средств стратегического предупреждения о подготовке к агрессии, начале ракетно-ядерного нападения, а также качества всестороннего обеспечения космическими силами и средствами армии и флота в мирное и военное время. В связи с этим появилась необходимость осуществить корректировку содержания категории устойчивости функционирования распределенных автоматизированных систем управления.

Ключевые слова: требование, устойчивость, разведзащищенность, распределенная автоматизированная система управления, космические системы, информационное противоборство, космические средства.

Введение

Особая роль в концепциях войн нового поколения отводится космическим системам и средствам (КСС). Уже сегодня КСС стали одним из основных инструментов стратегического сдерживания и обеспечения боевой и повседневной деятельности вооруженных сил развитых государств мира [1]. Анализ опыта применения космических систем обеспечения боевых действий показывает, что, во-первых, КСС позволяют существенно повысить боевые возможности войск (примерно в 1,5–2,0 раза), и, во-вторых, государство, не обладающее возможностью использования средств вооруженной борьбы, размещенных в воздушно-космической сфере, или допустившее просчеты

в политике развития и использования своих КСС, будет обречено на гарантированное поражение в будущих военных конфликтах [2].

Безопасность и обороноспособность Российской Федерации непосредственно зависят от возможностей и состояния средств стратегического предупреждения о подготовке к агрессии, начале ракетно-ядерного нападения, а также качества всестороннего обеспечения космическими силами и средствами армии и флота в мирное и военное время.

Таким образом, в современных условиях КСС встают в ряд стратегических компонент, паритет в которых критичен для сохранения военно-стратегического равновесия.

Реализация возможностей КСС обеспечения боевых действий, боевого применения войск (сил) ВС РФ во многом определяется качественным состоянием технической основы их системы управ-

ления – распределенными автоматизированными системами управления (РАСУ), посредством которых осуществляется управление орбитальными группировками космических аппаратов военного и двойного назначения [3].

В связи с важностью решаемых задач к РАСУ предъявляются жесткие требования по качеству функционирования, а именно по их устойчивости. Таким образом, необходимо определить содержание категории устойчивости процесса функционирования РАСУ, входящей в состав КСС.

Определение категории устойчивости распределенных автоматизированных систем управления

С общефилософской точки зрения устойчивость задает меру изменчивости. В результате превышения меры происходит скачкообразный переход – революция с последующими качественными изменениями той или иной системы. Рассматривая этот процесс в рамках функционирования РАСУ, революцию процесса справедливо воспринимать как деструкцию, то есть переход к непригодно новому состоянию, разрушение заданных, необходимых свойств [4].

В процессе функционирования на РАСУ оказывают влияние дестабилизирующие факторы, к которым относят [5]:

- эксплуатационно-технические отказы элементов системы;
- стихийные и преднамеренные воздействия на элементы системы;
- естественные помехи, приводящие к искажению информации.

РАСУ считается устойчивой, когда под действием дестабилизирующих факторов, приводящих к снижению эффективности, осуществляется чисто тождественное изменение или так называемое ноль-преобразование. Порождение тождественного преобразования происходит при помощи компенсирующих механизмов.

Под компенсирующим механизмом понимают свойство или совокупность свойств, реализующие процессы, посредством которых нейтрализуются негативные последствия воздействий с целью сохранения устойчивости системы [6].

Исходя из обозначенных выше факторов, воздействующих на системы, выделяют следующие свойства, реализующие компенсирующие механизмы в распределенных РАСУ:

- 1) живучесть;
- 2) надежность;
- 3) помехоустойчивость.

Механизм, компенсирующий воздействие факторов на РАСУ, представлен на рис. 1.

Очевидна интегральная природа свойства устойчивости. Таким образом, под устойчивостью понимается способность РАСУ функционировать в условиях воздействия определенного подмножества факторов, т.е. способность системы компенсировать те или иные изменения, вызванные тем или иным фактором.

Согласно ГОСТ 34.003-90 под устойчивостью РАСУ как системы военного назначения понимается комплексное свойство, характеризующееся живучестью, помехоустойчивостью и надежностью.

В современных условиях вследствие тотальной информатизации общества в целом и вооруженных сил в частности все чаще наблюдается смещение противоборства в информационную сферу (киберпространство). В связи с этим все больше в практику внедряются принципы информационного противоборства. Несомненным лидером на этом пути являются США. В рамках концепции информационного противоборства предполагается бороться с системами управления при помощи информационного оружия, в частности ориентированного на поражение аппаратно-программных средств систем передачи, хранения и обработки информации, функционирующих в киберпространстве [7].

В связи с возможностью подавления систем управления без риска скомпрометировать атакующую сторону (информационная операция по срыву Иранской ядерной программы Stuxnet проведена

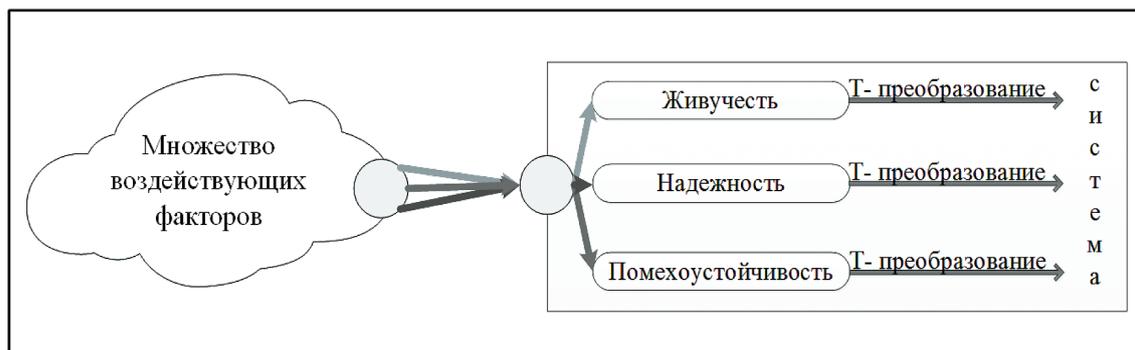


Рис. 1. Компенсирующие механизмы РАСУ

в 2010 году, однако до сих пор доподлинно не известны организаторы операции) наибольшее развитие получили средства специального программно-математического воздействия, которые объединяют возможности алгоритмического и программного информационно-технического оружия [7].

Для успешного проведения информационной операции необходимо осуществление разведывательных действий в отношении системы-цели (добывание информации из компьютерных систем и сетей, характеристик их программно-аппаратных средств и пользователей). Для вскрытия критически важных характеристик систем-целей в США развернуты глобальные комплексы компьютерной разведки (рис. 2) [8, 9].

Результаты, полученные в [10], наглядно показывают зависимость успешности информацион-

ного воздействия от свойства разведзащищенности элементов РАСУ (рис. 3).

Здесь P_1 – значение вероятности программно-аппаратной доступности инфокоммуникационной сети; P_2 – значение вероятности аппаратной доступности технических каналов утечки информации; T – время готовности злоумышленника к воздействию.

Руководствуясь концепцией информационного противоборства, необходимо внести корректировку в категорию устойчивости РАСУ. Устойчивость детерминируется не только надежностью, живучестью и помехоустойчивостью, но и разведзащищенностью, то есть способностью скрыть особенности системы управления, что не позволит противнику подобрать такое воздействие, действие которого невозможно будет обра-

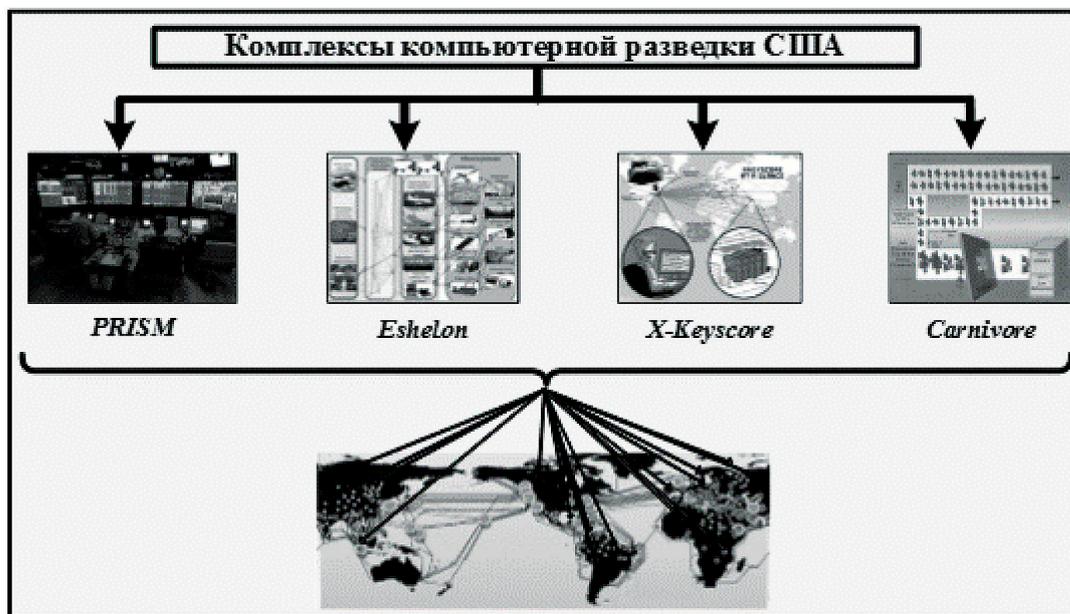


Рис. 2. Компьютерные комплексы разведки США

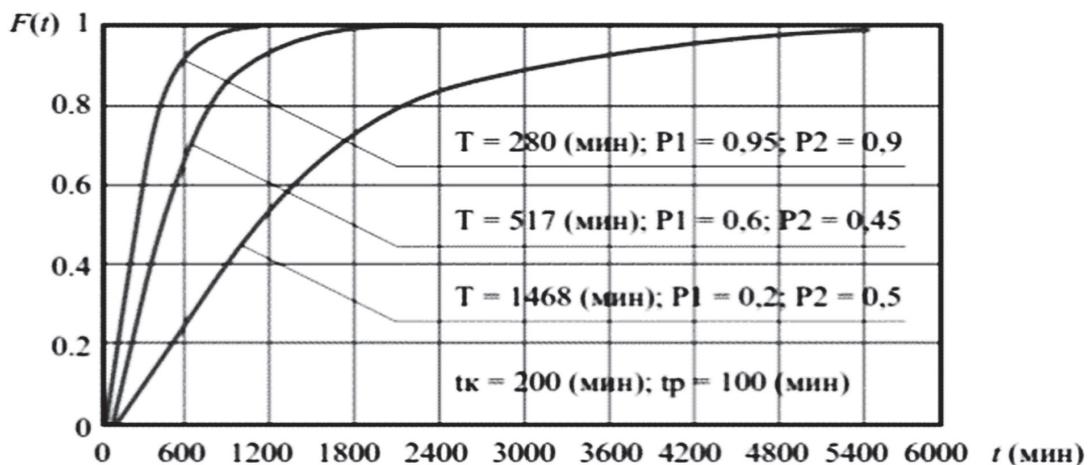


Рис. 3. Семейство функций распределения вероятности готовности противника к информационному воздействию при различной программно-аппаратной и аппаратной защищенности

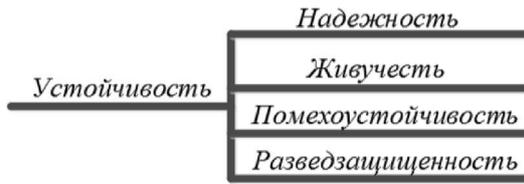


Рис. 4. Дерево атрибутивного свойства устойчивости РАСУ

титель в ноль-преобразование при помощи компенсаторских механизмов РАСУ.

Таким образом, устойчивость функционирования РАСУ должна характеризоваться атрибутивными свойствами, представленными на рис. 4.

Заключение

Проведенный анализ показал прямую зависимость успешности реализации информационно-технического воздействия на РАСУ от свойства разведзащищенности системы. В связи с этим обозначилась необходимость корректировки категории устойчивости РАСУ и дополнения ее атрибутивным свойством разведзащищенности.

Список литературы

1. Российский Институт Стратегических Исследований [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://riss.ru>.
2. Чащин С. В., Вечеркин В. Б., Гончаров А. М. Алгоритм оценивания живучести комплексов систем автоматизации и его элементов в условиях деструктивных воздействий // Телекоммуникационные технологии. 2016. № 14. С. 122–125.
3. Мануйлов Ю. С., Петушков А. М., Новиков Е. А. Управление целевым применением космической навигационной системы по технологии гибких стратегий. СПб. : ВКА имени А. Ф. Можайского. 2007. 176 с.
4. Прохоров М. А. Оценка устойчивости центра управления полетом космических аппаратов в условиях деструктивных воздействий // Труды II Межвузовской научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». СПб., 2017. С. 160–163.
5. Иванов А. К. Проектирование устойчивой АСУ : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2002. 144 с.
6. Артюхов В. В. Общая теория систем: самоорганизация, устойчивость, разнообразие, кризисы. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 224 с.
7. Макаренко С. И. Информационное оружие в технической сфере: терминология, классификация, примеры // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 3. С. 292–376.
8. Макаренко С. И., Иванов М. С., Попов С. А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты : монография. СПб. : Свое издательство, 2013. 166 с. : ил.
9. Коцыняк М. А., Кулешов И. А., Кудрявцев А. М. Киберустойчивость информационно-телекоммуникационной сети. СПб. : Бостон-спектр, 2015. 150 с.
10. Евглевская Н. В., Привалов Ан. А., Привалов Ал. А. Модель процесса подготовки злоумышленника к информационному воздействию на автоматизированные системы управления железнодорожным транспортом // Бюллетень результатов научных исследований. 2012. С. 17–25.

История статьи

Поступила в редакцию 6 марта 2018 г.

Принята к публикации 5 апреля 2018 г.

DETERMINATION OF STABILITY CATEGORY FOR DISTRIBUTED AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

A. A. Tolmachev¹, M. A. Prohorov², A. S. Andrianov²

¹Military Aerospace Defense Academy, Tver, Russian Federation

²Military Space Academy, Saint Petersburg, Russian Federation

At present, space systems and means became one of the main instruments of ensuring fighting and daily activity of Armed forces of the developed states of the world. In modern conditions space systems rise in a row strategic a component which stability of functioning it is critical for maintaining strategic balance. The analysis of the conflicts of the last decades has shown a tendency to confrontation shift to the space sphere and a cyberspace. Space systems and means allow to raise significantly fighting opportunities of troops, and the state which doesn't have potential of use of the means of armed struggle placed in the aerospace sphere, or allowed miscalculations in policy of development and use of the space systems and means,

will be doomed to the guaranteed defeat in future military conflicts. The defense capability and safety of the Russian Federation directly depend on a state and opportunities of means of strategic warning of preparation for aggression, the beginning of nuclear missile attack and also quality of comprehensive providing with space forces and means of army and fleet in peace and wartime. In this regard there was a need to carry out correction of content of category of stability of a funktsionirovaniye of the distributed automated control systems.

Keywords: demand, stability, intelligence protection, distributed automated control system, space systems, information confrontation, space assets.

References

1. Rossijskij Institut Strategicheskikh Issledovanij [Russian Institute for Strategic Studies]. – www: <http://riss.ru>. (In Russian)
2. Chashchin S. V., Vecherkin V. B., Goncharov A. M. *Algoritm ocenivaniya zhivuchesti kompleksov sistem avtomatizatsii i ego ehlementov v usloviyah destruktivnykh vozdeystvij* [Algorithm for estimating the survivability of complexes of automation systems and its elements under destructive influences] / *Telekommunikacionnye tekhnologii*. 2016. no. 14. pp. 122–125. (In Russian)
3. Manujlov YU. S., Petushkov A. M., Novikov E. A. *Upravlenie celevym primeneniem kosmicheskoy navigacionnoj sistemy po tekhnologii gibkih strategij* [Management of the target application of the space navigation system using flexible strategy technology]. Saint-Petersburg, VKA imeni A. F. Mozhajskogo. 2007. 176 p.
4. Prohorov M. A. *Ocenivanie ustojchivosti centra upravleniya poletom kosmicheskikh apparatov v usloviyah destruktivnykh vozdeystvij* [Estimation of the stability of the space flight control center under the conditions of destructive influences] [Trudy konferencii II Mezhevuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Problemy tekhnicheskogo obezpecheniya vojsk v sovremennykh usloviyah»] 2017, pp. 160–163. (In Russian)
5. Ivanov A. K. *Proektirovanie ustojchivoj ASU: Uchebnoe posobie* [Designing a sustainable control system]. Ul'yanovsk, UIGTU, 2002. 144 p.
6. Artyuhov V. V. *Obshchaya teoriya sistem: Samoorganizatsiya, ustojchivost', raznoobrazie, krizisy* [General theory of systems: Self-organization, sustainability, diversity, crises]. Moscow, Knihnyj dom «LIBROKOM», 2009. 224 p.
7. Makarenko S.I. *Informacionnoe oruzhie v tekhnicheskoy sfere: terminologiya, klassifikatsiya, primery* [Information weapons in the technical sphere: TNM, classification, examples]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2016, no. 3, pp. 292–376. (In Russian)
8. Makarenko S. I., Ivanov M. S., Popov S. A. *Pomekhozashchishchennost' sistem svyazi s psevdosluchajnoj perestrojkoj rabochej chastoty. Monografiya* [Interference immunity of communication systems with pseudo-random working frequency tuning]. Saint-Petersburg, Svoe izdatel'stvo Publ., 2013. 166 p. (In Russian)
9. Kocynyak M. A., Kuleshov I. A., Kudryavcev A. M., *Kiberustojchivost' informacionno-telekommunikacionnoj seti* [Cyber resistance of the information and telecommunications network]. Saint-Petersburg, Boston-spektr Publ., 2015. 150 p.
10. Evglevskaya N. V., Privalov An. A., Privalov Al. A. *Model' processa podgotovki zloumyshlennika k informacionnomu vozdeystviyu na avtomatizirovannye sistemy upravleniya zheleznodorozhnym transportom* [Model of the process of preparing an attacker for information impact on automated railway management systems]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanij*, 2012, pp. 17–25. (In Russian)

Article history

Received 6 March 2018

Accepted 5 April 2018

АЛГОРИТМ ПАРИРОВАНИЯ СБОЕВ В БОРТОВЫХ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ СО СТРУКТУРНО-ВРЕМЕННОЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

Д. С. Викторов, Е. В. Самоволина

*Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова,
г. Тверь, Российская Федерация*

В настоящее время проблема обеспечения надежного функционирования бортовых цифровых вычислительных комплексов становится всё актуальнее. При проектировании бортовых цифровых вычислительных комплексов космических аппаратов необходимо обеспечить высокую производительность, минимальные массогабаритные и энергетические характеристики, наличие средств диагностики и парирования последствий отказов. Кроме того, к бортовым цифровым вычислительным комплексам космических аппаратов предъявляются такие требования, как высокая суммарная надежность системы, минимальные показатели времени обнаружения и парирования отказов.

Для повышения надёжности управляющих систем существует много способов, основным из которых является структурное резервирование. Применение резервирования даёт возможность на основе введения избыточности, путём голосования выявить отказавшую систему и исключить её из конфигурации.

Однако в бортовых цифровых вычислительных комплексах интенсивность отказов на порядок ниже, чем интенсивность сбоев. Это может привести к тому, что сбой, воспринятый системой как отказ, послужит причиной выведения из конфигурации исправного канала. Путём возвращения программы на предыдущую точку восстановления и прохождения фрагмента программы повторно появляется возможность классифицировать тип неисправности сбой/отказ. При данном подходе реконфигурация системы произойдёт только после безуспешных попыток пройти фрагмент программы n раз (как правило, в технике применяется повтор 7–8 раз).

Целью работы является разработка алгоритма парирования сбоев в бортовых вычислительных системах с трёхканальной архитектурой, который предполагает комплексное применение тестового контроля и точек восстановления с различным доминированием в зависимости от количества исправных каналов.

Ключевые слова: тестовый контроль, точка восстановления, бортовой цифровой вычислительный комплекс.

Бортовой цифровой вычислительный комплекс (БЦВК) современных космических аппаратов (КА) отвечает за реализацию логики работы КА, предназначен для управления вычислительными процессами между модулями, обработки телеметрической информации (информации о состоянии) аппарата, координации работы модулей КА, диагностики, устранения отказов и состоит из большого количества программно-аппаратных компонент. Элементная база БЦВК функционирует на предельных тактовых частотах. Это является причиной того, что интенсивность сбоев на порядок выше интенсивности отказов 10^{-9} – 10^{-10} 1/с [1].

Надежное функционирование БЦВК обеспечивается использованием разных видов избыточности: структурной, временной, функциональной, информационной, версионной [2, 3]. Наиболее распространена в БЦВК структурная избыточность, которая используется для парирования отказов. Комплексное использование структурной и временной избыточности позволяет распознавать и парировать не только отказы, но и сбои как программных, так и аппаратных компонент. Это особенно важно для БЦВК летательных аппаратов, к которым наряду с высокими требованиями к надёжности и достоверности контроля функционирования предъявляются довольно жёсткие ограничения на массогабаритные и энергетические характеристики.

Классические алгоритмы обеспечения надежного функционирования, которые базируются на структурной и временной избыточности, исследованы в работах [4–8] и др., однако их комплексному использованию уделялось недостаточно внимания. Данное обстоятельство обуславливает необходимость разработки алгоритма обеспечения отказоустойчивости БЦВК на основе комплексного использования структурной и временной избыточности.

При разработке алгоритма парирования сбоев в БЦВК приняты следующие допущения:

- а) поток отказов всех элементов схемы простейший, последствия сбоев ликвидируются либо мажоритарными органами, либо повторным счётом участка программы обработки информации;
- б) отказ любого элемента средств мажоритирования, диагностирования и реконфигурации ведёт к отказу БЦВК;
- в) интенсивности восстановления для отказов и сбоев являются неизменными;
- г) восстановление сбившегося канала осуществляется путём повтора программы обработки информации с предыдущей точки восстановления (ТВ), при этом ТВ представляет собой периодически записываемое операционной системой в энергонезависимую память состояние всех полей основной памяти БЦВК.

Подобный подход применяется в большинстве известных работ по исследованию надёжности программно-аппаратных комплексов [1, 9, 10].

Предлагаемый алгоритм парирования сбоев представлен на рис. 1. Сущность алгоритма заключается в применении тестового контроля (ТК) и информации в ТВ (для защиты от сбоев) с различным доминированием в зависимости от количества исправных каналов.

Система начинает работу в трёхканальной конфигурации, при этом результатом вычислений является тот, который зафиксирован двумя каналами, при этом третий канал подвергается ТК. Если по результатам ТК канал признан исправным (сбой), то восстановление вычислительного процесса осуществляется по ТВ путём повтора последнего фрагмента программы обработки информации. При успешном восстановлении канала данные, характеризующие текущее состояние БЦВК из любого исправного канала, записываются в ТВ восстановленного канала.

В случае идентификации ТК отказа канала БЦВК реконфигурируется в двухканальную архитектуру.

В двухканальной конфигурации осуществляется периодическое сравнение результатов обработки данных в каналах. При несовпадении результатов вычислений оба канала прекращают обработку информации и предпринимается по-

пытка восстановления обоих каналов по ТВ путём n -кратного повторения вычислений с предыдущей ТВ. Если в результате этой операции удастся получить одинаковые результаты вычислений в двух каналах, то БЦВК продолжает функционировать в двухканальной конфигурации (сбой в канале). В противном случае (отказ канала) оба канала подвергаются ТК с целью выявления отказавшего, который исключается из конфигурации, и БЦВК переходит на функционирование в одноканальной конфигурации.

Функционирование в одноканальной архитектуре предполагает наличие средств встроенного контроля для выявления неисправности канала. При получении сигнала от средств встроенного контроля о неисправности канала (сбой) осуществляется попытка его восстановления по ТВ путём s -кратного повторения фрагмента программы обработки информации. Если средства встроенного контроля обнаружат, что неисправность ликвидирована, то БЦВК продолжит обработку информации. При исчерпании лимита повторов фрагмента программы БЦВК признаётся отказавшей.

Таким образом, комплексное применение ТК и восстановления по ТВ с различным преобладанием в зависимости от количества исправных каналов позволяет классифицировать неисправности как сбой и отказ, что позволяет избежать неоправданного расхода резервных ресурсов и, следовательно, повысить надёжность БЦВК.

Проведём количественную оценку прироста надёжности от применения предложенного выше алгоритма, для чего разработаем модели надёжности БВС. При разработке модели примем дополнительное допущение об экспоненциальном законе распределения времени до отказа.

Принимая во внимание принятые допущения, математическая модель, описывающая поведение БЦВК для предложенного алгоритма, может быть описана марковской цепью с непрерывным временем и следующими дискретными состояниями:

S_0 – БЦВК исправно функционирует в 3-канальной конфигурации;

S_1 – БЦВК копирует данные, характеризующие текущее состояние трёх исправных каналов в ТВ;

S_2 – БЦВК восстанавливает неисправный канал по ТВ;

S_3 – отказ одного канала;

S_4 – БЦВК исправно функционирует в 2-канальной конфигурации;

S_5 – БЦВК копирует данные, характеризующие текущее состояние двух исправных каналов в ТВ;

S_6 – БЦВК восстанавливает вычислительный процесс двух каналов по ТВ;

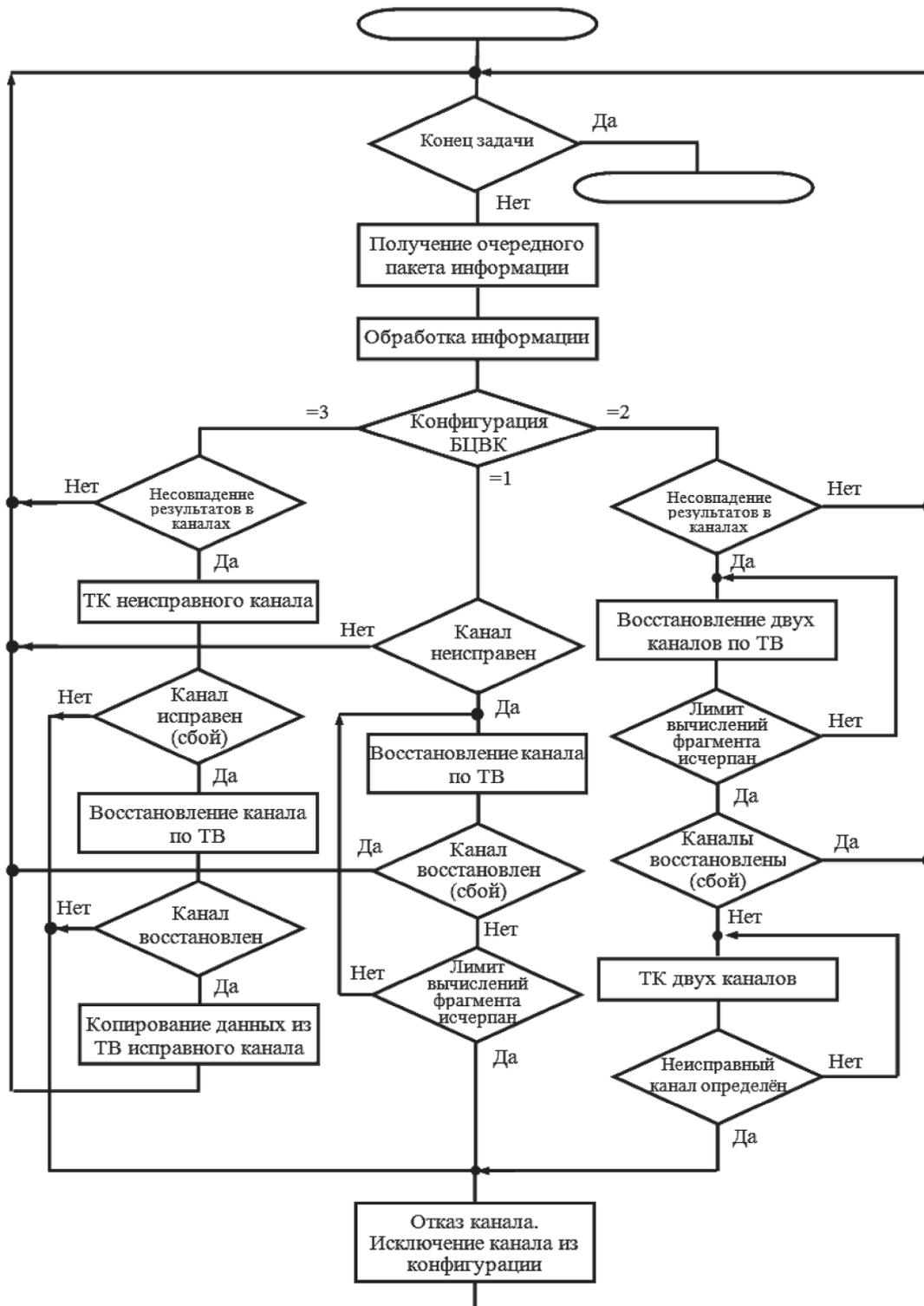


Рис. 1. Алгоритм парирования сбоев в БВС

S_7 – отказ второго канала;
 S_8 – БЦВК исправно функционирует в 1-канальной конфигурации;
 S_9 – БЦВК копирует данные, характеризующие текущее состояние исправного канала в ТВ;
 S_{10} – по сигналу от встроенных средств контроля БЦВК восстанавливает вычислительный процесс в канале по ТВ;

S_{11} – встроенные средства контроля БЦВК выявили неисправность канала, и осуществляется попытка его восстановления функционирования путём s -кратного повторения вычислений с последней ТВ;
 S_{12} – отказ БЦВК.
 Граф переходов БЦВК, учитывающий интенсивности переходов, приведен на рис. 2.

В соответствии с методикой расчёта марковских процессов имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 P_0(t)/dt &= -P_0(t)3\lambda_{\text{СБ}} - P_0(t)3\lambda_{\text{ОТК}} - P_0(t)\lambda_{\text{ТВ}} + \\
 &\quad + P_1(t)\mu_{\text{ТВ}} + P_{12}(t)\mu_{\text{В3}} + P_2(t)\mu_{\text{В1}}; \\
 P_1(t)/dt &= -P_1(t)\mu_{\text{ТВ}} + P_0(t)\lambda_{\text{ТВ}}; \\
 P_2(t)/dt &= -P_2(t)\mu_{\text{В1}} + P_0(t)3\lambda_{\text{СБ}}; \\
 P_3(t)/dt &= -P_3(t)\mu_{\text{ТК}} + P_0(t)3\lambda_{\text{ОТК}}; \\
 P_4(t)/dt &= -P_4(t)2\lambda_{\text{ОТК}} - P_4(t)2\lambda_{\text{СБ}} - P_4(t)\lambda_{\text{ТВ}} + \\
 &\quad + P_3(t)\mu_{\text{ТК}} + P_5(t)\mu_{\text{ТВ}} + P_6(t)\mu_{\text{ТВ}}; \\
 P_5(t)/dt &= -P_5(t)\mu_{\text{ТВ}} + P_4(t)\lambda_{\text{ТВ}}; \\
 P_6(t)/dt &= -P_6(t)\mu_{\text{ТВ}} + P_4(t)2\lambda_{\text{СБ}}; \\
 P_7(t)/dt &= -P_7(t)\mu_{\text{В2}} + P_4(t)2\lambda_{\text{ОТК}}; \\
 P_8(t)/dt &= -P_8(t)\ell\lambda_{\text{СБ}} - P_8(t)\lambda_{\text{ТВ}} - P_8(t)\ell\lambda_{\text{ОТК}} - \\
 &\quad - P_8(t)(1-\ell)(\lambda_{\text{СБ}} + \lambda_{\text{ОТК}}) + P_9(t)\mu_{\text{ТВ}} + \\
 &\quad + P_{10}(t)\mu_{\text{ТВ}} + P_7(t)\mu_{\text{В2}}; \\
 P_9(t)/dt &= -P_9(t)\mu_{\text{ТВ}} + P_8(t)\lambda_{\text{ТВ}}; \\
 P_{10}(t)/dt &= -P_{10}(t)\mu_{\text{ТВ}} + P_8(t)\ell\lambda_{\text{СБ}}; \\
 P_{11}(t)/dt &= -P_{11}(t)c\mu_{\text{ТВ}} + P_8(t)\ell\lambda_{\text{ОТК}}; \\
 P_{12}(t)/dt &= -P_{12}(t)\mu_{\text{В3}} + P_8(t)(1-\ell)(\lambda_{\text{СБ}} + \lambda_{\text{ОТК}}) + \\
 &\quad + P_{11}(t)c\mu_{\text{ТВ}},
 \end{aligned}$$

где $\mu_{\text{В1}} = \frac{1}{T_{\text{ТВ}} + T_{\text{ТК}} + \frac{T_{\text{ТВ-ТВ}}}{2}}$; $\mu_{\text{В2}} = \frac{1}{T_{\text{ТВ}} + T_{\text{ТК}}}$; $\mu_{\text{В3}} = \frac{1}{T_{\text{Ц}}}$.

$\mu_{\text{В1}}$ характеризует интенсивность восстановления трёхканальной БЦВК и предполагает проведение ТК неисправного канала с целью определения вида неисправности, повтор фрагмента программы обработки информации с последней ТВ и копирование данных, характеризующих состояние системы из исправного канала в восстановленный.

$\mu_{\text{В2}}$ описывает интенсивность восстановления двухканальной БЦВК и включает повтор фрагмента программы обработки информации с последней ТВ и проведение ТК обоих каналов для выявления отказавшего.

$\mu_{\text{В3}}$ характеризует интенсивность восстановления БЦВК после отказа последнего канала и предполагает рестарт системы.

В системе уравнений приняты следующие обозначения:

P_0 – вероятность безотказной работы БЦВК в трёхканальной конфигурации;

P_1 – вероятность нахождения БЦВК в состоянии формирования ТВ;

P_2 – вероятность возникновения сбоя в одном канале;

P_3 – вероятность отказа одного канала;

P_4 – вероятность безотказной работы БЦВК в двухканальной конфигурации;

P_5 – вероятность нахождения БЦВК в состоянии копирования ТВ;

P_6 – вероятность возникновения сбоя в канале при функционировании БЦВК в двухканальной конфигурации;

P_7 – вероятность отказа канала при функционировании БЦВК в двухканальной конфигурации;

P_8 – вероятность безотказной работы БЦВК в одноканальной конфигурации;

P_9 – вероятность нахождения БЦВК в состоянии копирования ТВ;

P_{10} – вероятность возникновения сбоя в канале;

P_{11} – вероятность восстановления функционирования канала путём c -кратного повторения вычислений с ТВ;

P_{12} – вероятность отказа БЦВК;

$T_{\text{ТВ}}$ – временной интервал, необходимый для формирования ТВ;

$T_{\text{ТК}}$ – время, затраченное на тестирование канала;

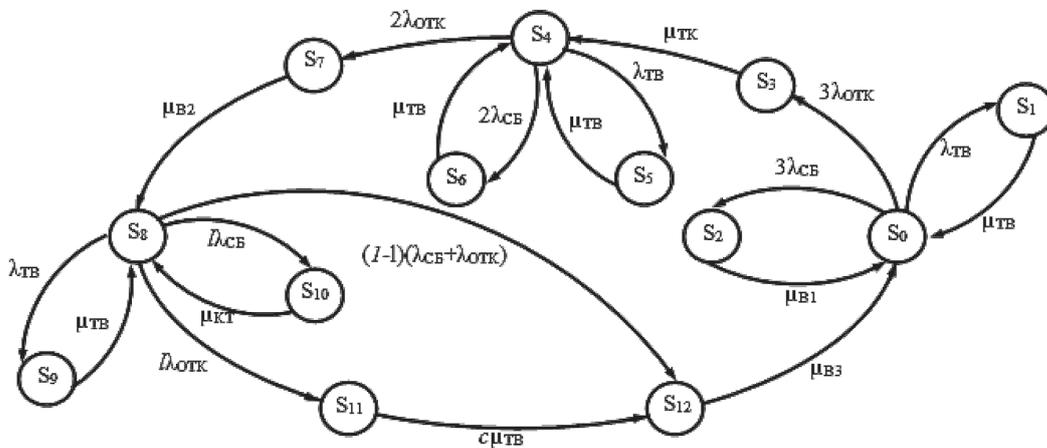


Рис. 2. Граф переходов БЦВК при правильном определении вида неисправности

$T_{ТВ-ТВ}$ – временной интервал между двумя соседними ТВ;

$T_{Ц}$ – время цикла обработки информации.

Решая систему уравнений, следует учитывать, что модель описывает все возможные состояния БЦВК, а следовательно, $\sum_{i=1}^n P_i = 1$. Из системы уравнений можно вычислить вероятности нахождения БЦВК в любом возможном состоянии $P_i(t)$. Для БЦВК КА представляет интерес оценка вероятности безотказной работы за время t , которая вычисляется по формуле

$$P(t) = \sum_{i \in E} P_i(t),$$

где E – множество работоспособных состояний БЦВК, в которых система осуществляет обработку информации.

Предложенная модель предполагает применение идеальных по достоверности и безотказности средств встроенного контроля, что даёт весьма приблизительные результаты при оценке безотказности.

Значительный рост тактовых частот привёл к тому, что в ходе тестирования каналов может быть ошибочно классифицирован вид неисправности, т. е. сбой воспринят как отказ и наоборот. Для учёта ошибочной классификации вида неисправности в граф (рис. 2) добавлены следующие переходы:

$S_3 \rightarrow S_0$ и $S_7 \rightarrow S_4$, интенсивность которых $D_2\mu_{ТК}$ (характеризуют такое состояние БЦВК, при котором ТК классифицировал отказ канала как сбой);

$S_2 \rightarrow S_4$ и $S_6 \rightarrow S_8$, интенсивность которых $D_3\mu_{ТК}$ (означает, что ТК классифицировал сбой канала как отказ).

При этом граф переходов БЦВК с учётом ошибочной классификации вида неисправности примет вид, представленный на рис. 3. Дискретные состояния в данном графе аналогичны графу на рис. 2.

Принимая во внимание методику расчёта марковских процессов, получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$P_0(t)/dt = -P_0(t)3\lambda_{СБ} - P_0(t)3\lambda_{ОТК} - P_0(t)\lambda_{ТВ} + P_1(t)\mu_{ТВ} + P_3(t)D_2\mu_{ТК} + P_{12}(t)\mu_{ВЗ} + P_2(t)\mu_{В1};$$

$$P_1(t)/dt = -P_1(t)\mu_{ТВ} + P_0(t)\lambda_{ТВ};$$

$$P_2(t)/dt = -P_2(t)D_1\mu_{В1} - P_2(t)D_3\mu_{ТК} + P_0(t)3\lambda_{СБ};$$

$$P_3(t)/dt = -P_3(t)\mu_{ТК} + P_0(t)3\lambda_{ОТК};$$

$$P_4(t)/dt = -P_4(t)2\lambda_{ОТК} - P_4(t)2\lambda_{СБ} - P_4(t)\lambda_{ТВ} + P_3(t)D_1\mu_{ТК} + P_2(t)D_3\mu_{ТК} + P_5(t)\mu_{ТВ} + P_6(t)\mu_{ТВ} + P_7(t)D_2\mu_{ТК};$$

$$P_5(t)/dt = -P_5(t)\mu_{ТВ} + P_4(t)\lambda_{ТВ};$$

$$P_6(t)/dt = -P_6(t)\mu_{ТВ} - P_6(t)D_3\mu_{ТК} + P_4(t)2\lambda_{СБ};$$

$$P_7(t)/dt = -P_7(t)D_1\mu_{В2} - P_7(t)D_2\mu_{ТК} + P_4(t)2\lambda_{ОТК};$$

$$P_8(t)/dt = -P_8(t)\ell\lambda_{СБ} - P_8(t)\lambda_{ТВ} - P_8(t)\ell\lambda_{ОТК} - P_8(t)(1-\ell)(\lambda_{СБ} + \lambda_{ОТК}) + P_7(t)D_1\mu_{В2} + P_6(t)D_3\mu_{ТК} + P_9(t)\mu_{ТВ} + P_{10}(t)\mu_{ТВ};$$

$$P_9(t)/dt = -P_9(t)\mu_{ТВ} + P_8(t)\lambda_{ТВ};$$

$$P_{10}(t)/dt = -P_{10}(t)\mu_{ТВ} + P_8(t)\ell\lambda_{СБ};$$

$$P_{11}(t)/dt = -P_{11}(t)c\mu_{ТВ} + P_8(t)\ell\lambda_{ОТК};$$

$$P_{12}(t)/dt = -P_{12}(t)\mu_{ВЗ} + P_8(t)(1-\ell)(\lambda_{СБ} + \lambda_{ОТК}) +$$

где D_1 – вероятность правильной классификации неисправности ТК; D_2 – вероятность того, что ТК классифицировал отказ как сбой; D_3 – вероятность того, что ТК классифицировал сбой как отказ.

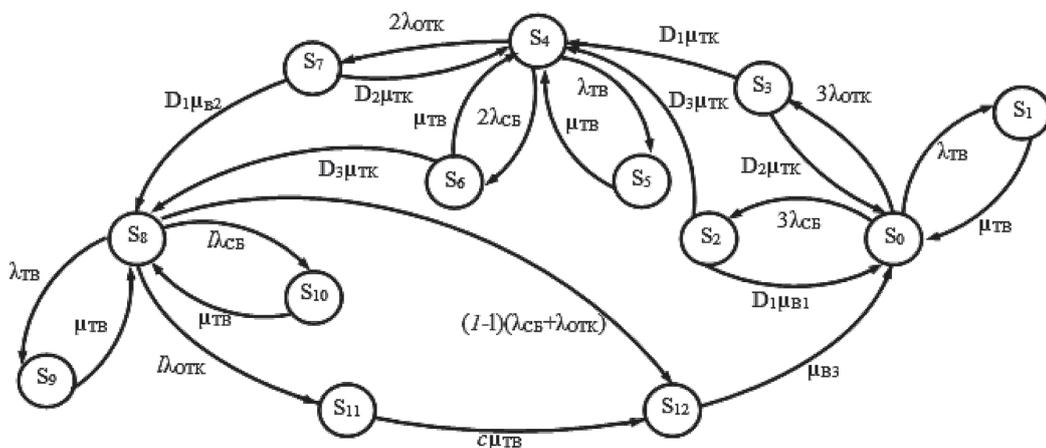


Рис. 3. Граф переходов с ошибочным определением ТК вида неисправности

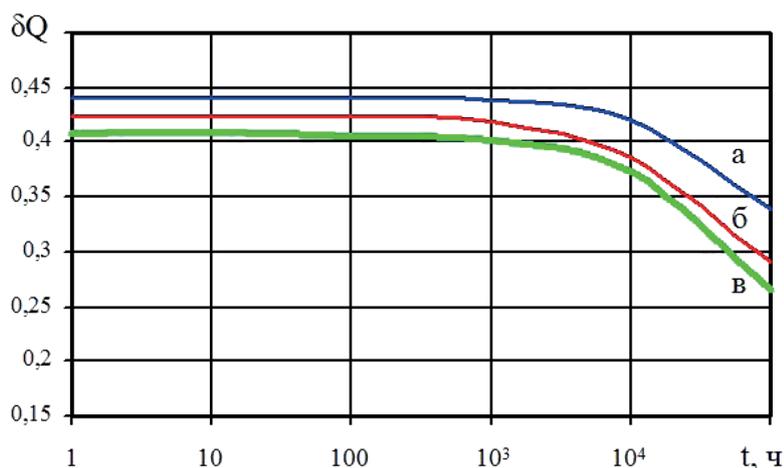


Рис. 4. Зависимость относительного выигрыша в снижении вероятности отказа при: а) $D_1 = 1, D_2 = 0, D_3 = 0$; б) $D_1 = 0, D_2 = 1, D_3 = 0$; в) $D_1 = 0, D_2 = 0, D_3 = 1$

При моделировании значения переменных означают достоверность тестового контроля – D_1, D_2, D_3 могут принимать значения 0 или 1.

В системе уравнений вероятности P_0, P_4, P_8 характеризуют безотказную работу БЦВК в трёхканальной, двухканальной и одноканальной конфигурации соответственно.

Анализ системы уравнений позволяет предположить, что при увеличении $\lambda_{ТВ}$ увеличиваются значения вероятностей P_0, P_4, P_8 и БЦВК сохраняет работоспособность при любом количестве сбоев.

Учитывая, что в работе рассматриваются БЦВК КА, безотказность которых лежит в диапазоне $0,9 \dots 0,999$, в качестве показателя для оценки эффективности разработанного алгоритма целесообразно применять показатель – относительный выигрыш δQ в снижении вероятности отказа.

$$\delta Q = \frac{Q_0 - Q}{Q_0},$$

где Q – вероятность отказа БЦВК, реализующего предложенный метод структурно-временного резервирования;

Q_0 – вероятность отказа БЦВК, относительно которой определяется относительный выигрыш δQ в снижении вероятности отказа.

Следует учитывать, что БЦВК КА рассматриваются как невозстанавливаемые системы, поэтому согласно [2, 3] относительный выигрыш в снижении вероятности отказа целесообразно рассчитывать так:

$$\delta Q = \frac{Q_0 - (1 - [P_0 + P_4 + P_8])}{Q_0}.$$

В свою очередь, за Q_0 примем вероятность отказа трёхканальной БЦВК без ТК и восстановления по ТВ, численные значения которых получены в [5].

На основании анализа данных об отказах и сбоях в БЦВК [1, 3] для моделирования были выбраны следующие базовые значения: $\lambda_{ОТК} = 10^{-8}$ 1/ч; $\lambda_{СБ} = 10^{-9}$ 1/ч; $\lambda_{ТВ} = 10^3$ 1/ч; $\mu_{ТК} = 10^4$ 1/ч; $\mu_{ТВ} = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч, $T_{ТВ} = 10^{-4}$ ч, $T_{ТВ-ТВ} = 10^{-3}$ ч, $T_{ТК} = 10^{-4}$ ч, $T_{Ц} = 5 \cdot 10^{-3}$ ч. Результаты моделирования зависимости относительного выигрыша в снижении вероятности отказа от времени эксплуатации при различной достоверности контроля представлены на рис. 4.

Результаты моделирования показали, что применение предложенного алгоритма позволяет повысить (до 45 % по показателю δQ – относительный выигрыш в снижении вероятности отказа) надёжность трёхканальных БЦВК со структурно-временной избыточностью.

Предлагаемый алгоритм ориентирован на идентификацию и парирование сбоев и отказов. Алгоритм может применяться в любых БЦВК с межканальными связями. Для его реализации необходимо обеспечить синхронную работу каналов БЦВК. Всё вышеперечисленное позволяет осуществить эффективную практическую реализацию предложенного алгоритма при жёстких ограничениях на массогабаритные и энергетические характеристики.

Список литературы

1. Kafka P. How Safe Is Safe Enough? / Kafka P.// Proceeding of 10th European Conference on Safety and Reliability, Munich, Germany, 13–17 September, 1999. Vol. 1. P. 385–390.
2. Харченко В. С. Модели и свойства многоальтернативных отказоустойчивых систем // Автоматика и телемеханика. 1992. № 12. С. 140–147.

3. Харченко В. С., Литвиненко В. Г., Терещенков С. В., Мельников В. А. Обеспечение устойчивости управляющих вычислительных систем к физическим дефектам и дефектам программирования программно-аппаратных средств // Зарубежная радиоэлектроника. 1992. № 6. С. 18–35.
4. Доманицкий С. М. Построение надежных логических устройств. М. : Энергия, 1971. 212 с.
5. Черкесов Г. Н. Надежность программно-аппаратных комплексов. СПб. : Питер, 2004. 472 с.
6. Разыграев А. П. Основы управления полетом космических аппаратов : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1990. 480 с.
7. Микрин Е. А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 336 с.
8. Красовский П. А. Метрология космических навигационных спутниковых систем : монография. Менделеево : ФГУП «ВНИИФТРИ», 2009. 216 с.
9. Основы теории полета космических аппаратов / под ред. Г. С. Нариманова, М. К. Тихонравова. М. : Машиностроение, 1972. 608 с.
10. Космический ракетный комплекс «Зенит» глазами его создателей / под ред. В. Н. Соловьева [и др.]. М. : МАИ, 2003. 216 с.

История статьи

Поступила в редакцию 16 марта 2018 г.

Принята к публикации 5 апреля 2018 г.

THE ALGORITHM OF PARRY FAILURES IN THE ONBOARD DIGITAL COMPUTER COMPLEXES WITH THE STRUCTURAL AND TIME REDUNDANCY

D. S. Viktorov, E. V. Samovolina

Military Aerospace Defense Academy, Tver, Russian Federation

Currently, the problem of ensuring reliable operation of onboard digital computing systems is becoming increasingly important. When designing on-Board digital computing systems of spacecraft, it is necessary to provide a combination of a number of indicators: high performance, minimal mass-size and energy characteristics, availability of diagnostic tools and parry the consequences of failures. In addition, one of the main requirements for the onboard digital computing complex of spacecraft is the high total reliability of the system, the minimum time for detection and parry of failures.

To improve the reliability of control systems, there are many ways, the main of which is structural redundancy. The use of reservations makes it possible, through the introduction of redundancy, by voting to identify the failed system and exclude it from the configuration.

However, in onboard digital computing complexes the failure rate is much lower than the failure rate. This can cause the failure to be perceived by the system as a failure and cause the system to exit the configuration of a healthy channel. By returning the program to the previous recovery point and passing the program fragment again, you can classify the type of failure/failure. Under this approach, the reconfiguration of the system will occur only after unsuccessful attempts to pass a fragment of the program n times (as a rule, the technique is used repeat 7–8 times).

The aim of the work is to develop an algorithm for parrying failures in onboard computing systems with three-channel architecture, which involves the complex application of test control and recovery points with different dominance depending on the number of serviceable channels.

Keywords: test control, recovery point, on-board computer.

References

1. Kafka P. How Safe Is Safe Enough? [Kafka P. // Proceeding of 10th European Conference on Safety and Reliability]. Munich, Germany, 13–17 September, 1999, vol. 1. pp. 385–390. (In Russian)
2. Kharchenko V. S. *Modeli i svoystva mnogoal'ternativnykh otkazoustojchivykh sistem* [Models and properties of multi-alternative fault-tolerant systems]. Avtomatika i telemekhanika, 1992, no. 12, p. 140–147. (In Russian)
3. Kharchenko V. S., Litvinenko V. G., Tereshchenkova S. V., Melnikov V. A. *Obespechenie ustojchivosti upravlyayushchih vychislitel'nykh sistem k fizicheskim defektam i defektam programmirovaniya programmno-apparatnykh sredstv* [The sustainability managers of computer systems to physical defects and defects of the programming hardware and software]. Foreign Radioelectronics, 1992, no. 6, p. 18–35. (In Russian)

4. Domenici S. M. *Postroenie nadezhnyh logicheskikh ustrojstv* [Building a reliable logical devices]. Moscow, Energy Publ., 1971. 212 p.
5. Cherkesov G. N. *Nadyozhnost' programmno-apparatnyh kompleksov* [Reliability of software and hardware systems]. St. Petersburg, Peter Publ., 2004. 472 p.
6. Razygraev A. P. *Osnovy upravleniya poletom kosmicheskikh apparatov : ucheb. posobie dlya vtuzov* [The basics of flight control of spacecrafts: the Textbook. textbook for technical colleges]. 2nd ed., Rev. and extra. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 480 p.
7. Mikrin E. A. *Bortovye komplekсы upravleniya kosmicheskimi apparatami i proektirovanie ih programmno obespecheniya* [Onboard systems of spacecraft control and design of their software]. Moscow, Publishing house of MGTU they. N. Uh. Bauman, 2003. 336 p.
8. Krasovskii A. P. *Metrologiya kosmicheskikh navigacionnyh sputnikovyyh sistem. Monografiya* [Metrology, space navigation satellite systems. Monograph]. Mendeleevo, FSUE "VNIIFTRI", 2009. 216 p.
9. *Osnovy teorii poleta kosmicheskikh apparatov* [Fundamentals of the theory of flight of space vehicles] (ed. by G. S. Narimanov, M. K. Tihonravova). Moscow, Mechanical engineering Publ., 1972. 608 p.
10. *Kosmicheskij raketnyj kompleks «Zenit» glazami ego sozdatelej* [Space rocket complex "Zenit" through the eyes of its creators] (ed. V. N. Solovyov, e.a.). Moscow, MAI, 2003. 216 p.

Article history

Received 16 March 2018

Accepted 5 April 2018

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ ЗА СЧЕТ КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ В НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**В. Н. Тяпкин, В. Н. Ратушняк, Д. Д. Дмитриев,
А. Б. Гладышев**

*Военно-инженерный институт Сибирского федерального университета,
г. Красноярск, Российская Федерация*

Пространственно-временная обработка сигналов в адаптивных радиоэлектронных системах, в том числе и навигационных, остается предметом интенсивных исследований, так как позволяет повысить эффективность приема полезных сигналов в условиях воздействия естественных или преднамеренных помех. Библиография по этой тематике весьма обширна и включает в себя большое число статей научного и прикладного характера, диссертаций, монографий, патентных материалов. Значительная часть этих работ имеет ссылки на монографии Р. Монзинго и Б. Уидроу, в которых изложены основные принципы, критерии и алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов. До настоящего времени развитие пространственно-временной обработки сигналов во многом сдерживалось несовершенством элементной базы. Применение в современной навигационной аппаратуре потребителей быстродействующих сигнальных процессоров, реализующих перспективные методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов, предоставляет возможность цифровыми способами формировать требуемую диаграмму направленности антенной системы и корректировать частотные характеристики приемных каналов, реализовывать сложные алгоритмы оптимальной обработки полезных сигналов, оперативно управлять основными режимами работы аппаратуры. Одним из важнейших приложений пространственно-временной обработки сигналов является подавление помеховых сигналов, а его эффективность напрямую зависит от степени межканальной корреляции этих сигналов, принятых антенными элементами адаптивной антенной решетки. Для максимизации коэффициента подавления помех требуется принятие мер по выравниванию частотных и фазовых характеристик приемных трактов и высокой точности вычисления весовых коэффициентов. В статье рассматриваются вопросы пространственной фильтрации помех при использовании адаптивного компенсатора помех с учетом коррекции частотных характеристик приемных каналов средств спутниковой навигации. Представлен градиентный алгоритм пространственной компенсации помех, а также влияние адаптивной коррекции частотных характеристик приемных каналов на качество подавления помех. Продемонстрировано формирование диаграммы направленности многоэлементной адаптивной антенной решетки при пространственном подавлении помех путем моделирования в среде Matlab.

Ключевые слова: адаптивный автокомпенсатор, адаптивный корректор частотных характеристик, помехоустойчивый ГНСС-приемник, устройство подавления помех.

Основной задачей совершенствования существующих алгоритмов пространственного подавления помех является разработка способов компенсации временных задержек между разнесенными антенными элементами в адаптивной

антенной решетке (ААР) с учетом согласования геометрии расположения антенных элементов с плоским волновым фронтом принимаемых помеховых колебаний, коррекции частотных характеристик приемных каналов, оптимизации вычислительных операций при адаптации к помехам различного вида и обработке полезных сигналов.

Некоторое повышение степени корреляции принятой аддитивной смеси сигналов и помех в приемных каналах навигационного приемника достигается за счет коррекции частотных характеристик и калибровки группового времени задержки сигналов компенсационных приемных каналов под основной приемный канал. Начальная временная обработка принимаемых сигналов основана на использовании схемы выравнивающего фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра). Применение КИХ-фильтров позволяет добиться минимальной разности частотных характеристик каналов между основным и компенсационным каналами.

Для получения высоких характеристик точности навигационных измерений требуется калибровка группового времени запаздывания (ГВЗ) и фазовых сдвигов широкополосных навигационных сигналов, что приводит к необходимости минимизации погрешности параметров формируемых опорных сигналов. Нужно учесть все задержки, возникающие в приемных трактах, начиная от приемных антенн до блока цифровой обработки сигналов, с точностью до единиц градусов по фазе несущей частоты сигнала [1, 2].

Необходимо отметить, что межканальная калибровка устраняет аппаратную систематическую погрешность навигационного приемника и является достаточной в том случае, когда фазовые центры антенных элементов находятся в непосредственной близости друг к другу. Однако при построении ААР из большого количества антенных элементов или решении некоторых специфических задач измерения пространственной ориентации антенные элементы разнесены на достаточно большое расстояние друг от друга (более чем несколько длин волн полезного сигнала). В результате этого диаграмма направленности (ДН) ААР приобретает многолепестковый харак-

тер, обусловленный возникновением интерференционных максимумов и минимумов. Кроме того, возникает временная задержка распространения сигнала между антенными элементами, что уменьшает коэффициент корреляции помехи в приемных каналах (рис. 1).

Этот относительный временной сдвиг колебаний сигнала помехи на входах приемных каналов можно оценить по выражению

$$t_3 = (d \cos(\theta) / c) = \Delta D / c, \quad (1)$$

где d – расстояние между фазовыми центрами антенн.

Коэффициент подавления помехи одним компенсационным каналом с учетом временного сдвига помеховых колебаний принимает следующий вид:

$$K_{\Pi} = 1 / (1 - \rho^2) \approx 1 / (\sqrt{\pi} \Delta f_{\text{пр}} t_3), \quad (2)$$

где t_3 – время задержки помех между приемными антеннами; K_{Π} – коэффициент подавления помех; ρ – коэффициент корреляции помех; $\Delta f_{\text{пр}}$ – ширина полосы пропускания приемника.

На рис. 2 показана зависимость максимального достижимого коэффициента подавления помех от длины базы одноканального автокомпенсатора помех (два приемных канала) при максимальном времени задержки помехи (при $\theta = 0^\circ$ – наихудший вариант воздействия преднамеренных помех) между приемными антеннами.

Адаптация к помехам может быть реализована несколькими способами в зависимости от выбора целевой функции, критерия поиска, но все они сводятся (с точностью до постоянного множителя) к винеровскому решению [3–7]. Полный алгоритм работы ААР предусматривает нацеливание и удержание ДН ААР в пространстве в на-

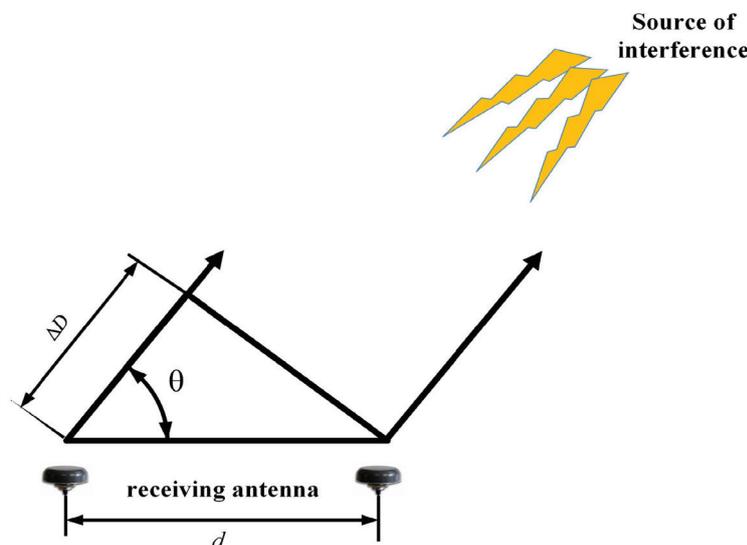


Рис. 1. Межканальная задержка сигналов приемных каналов

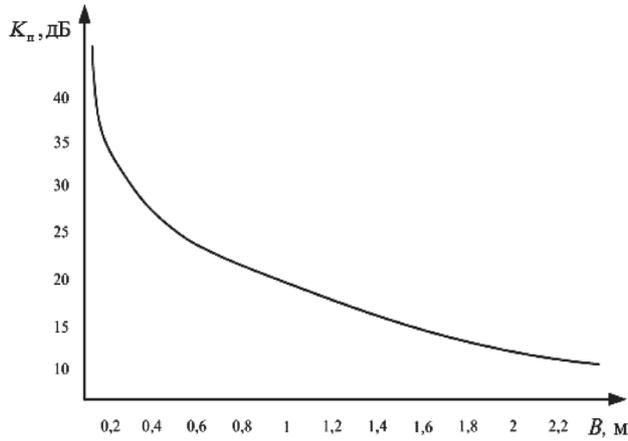


Рис. 2. Зависимость коэффициента подавления помех от длины базы однобазового автокомпенсатора

правлении прихода полезного сигнала при одновременном подавлении пространственных помех любой структуры (формирование нулей на помеху в диаграмме направленности ААР).

Эффективным и комплексным решением такой задачи является подход, основанный на совместной работе систем автокомпенсатора (АКП) с адаптивными корректорами частотных характеристик при условии, что адаптация АКП и кор-

рекция частотных характеристик осуществляются под общую целевую функцию. Например, в качестве критериев целевой функции может использоваться минимум мощности помех, максимум отношения сигнал/шум или минимум дисперсии шума на выходе АКП [8]. При этом во всех случаях значения оптимальных весовых коэффициентов будут зависеть не только от характеристик различного вида помех, пространственных направлений на источники полезных и помеховых сигналов, их динамики изменения, но и также от согласования геометрии расположения антенных элементов с волновым фронтом принимаемых помеховых колебаний.

Коррекция приемных каналов осуществляется при помощи канальных КИХ-фильтров, имеющих центральный отвод линии задержки (ЛЗ) и остальные отводы ЛЗ, расположенные по обе стороны от центрального (рис. 3).

Коррекцию частотных характеристик приемных каналов осуществляют при помощи градиентного алгоритма расчета весовых коэффициентов КИХ-фильтров $\mathbf{W}_{T(k,n)}(t_i)$ в соответствии с максимальной компенсацией различий частотных характеристик, времени задержек сигналов в полосе пропускания приемных каналов и пространственной компенсацией помех.

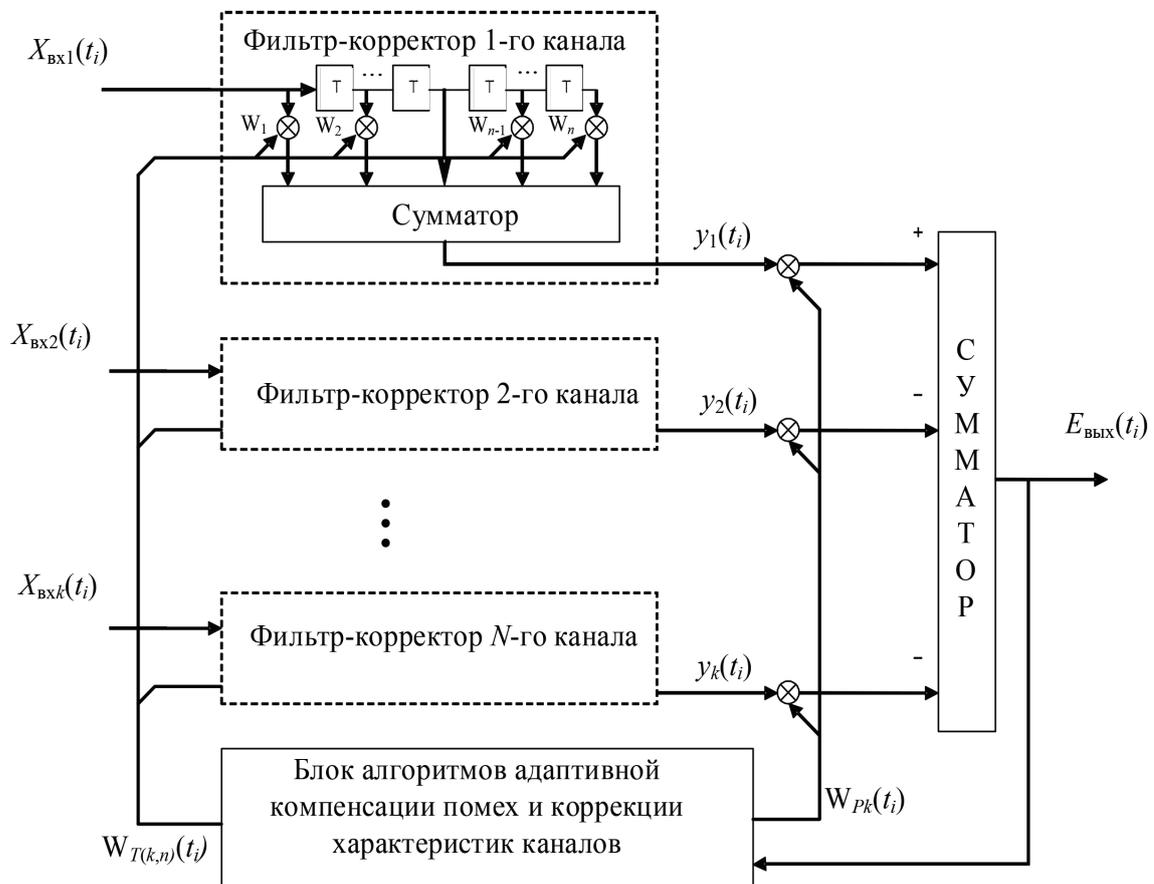


Рис. 3. Структурная схема адаптивного автокомпенсатора помех

Весь градиентный алгоритм коррекции частотных характеристик и пространственной фильтрации помех описывается следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{T(k,n)}(t_i) &= \\ &= \dot{W}_{T(k,n)}(t_i - 1) + \mu \mathbf{x}_k^*(t_i) \alpha_k(t_i), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\dot{W}_{T(k,n)}(t_i - 1)$ – весовой коэффициент КИХ-фильтра k -го компенсационного канала, рассчитанный на предыдущей итерации; n – номер дискретного отсчета линии задержки; μ – шаг адаптивного алгоритма сходимости; $\mathbf{x}_k(t_i)$ – вектор входных сигналов в k -м компенсационном канале; $\alpha_k(t_i)$ – ошибка оценивания процесса адаптации, которая описывается выражением:

$$\alpha_k(t_i) = d_k(t_i) - \dot{W}_k(t_i - 1) \mathbf{x}_k(t_i), \quad (4)$$

$d_k(t_i)$ – требуемый выходной сигнал.

Выходной сигнал КИХ-фильтра будет равен:

$$\mathbf{y}_k(t_i) = \sum_{n=1}^N \mathbf{x}_k(t_i) \dot{W}_{T(k,n)}(t_i) \quad (5)$$

После коррекции частотных характеристик компенсационных каналов для пространственной фильтрации помех определяют комплексные весовые коэффициенты $\dot{W}_{P(k)}(t_i)$ и далее, перемножая их с выходной выборкой сигналов КИХ-фильтров каждого канала, формируют «провалы» в результирующей ДН в направлении на постановщиков активных помех [8, 10], таким образом, реализуется градиентный алгоритм пространственной фильтрации помех:

$$\dot{W}_{P(k)}(t_i) = \dot{W}_{P(k)}(t_i - 1) + \mu \mathbf{y}_k^*(t_i) \alpha_k(t_i), \quad (6)$$

где $\dot{W}_{P(k)}(t_i - 1)$ – весовой коэффициент k -го компенсационного канала, рассчитанный на предыдущей итерации; μ – шаг адаптивного алгоритма сходимости; $\mathbf{y}_k(t_i)$ – вектор выходного сигнала КИХ-фильтра в k -м компенсационном канале; $\alpha_k(t_i)$ – ошибка оценивания процесса адаптации.

Выходной сигнал пространственного фильтра принимает вид

$$E_{\text{вых}}(t_i) = y_1(t_i) - \mathbf{y}_k(t_i) \dot{W}_{P(k)}(t_i). \quad (7)$$

Данное выражение является откликом пространственного фильтра помех.

Такое построение архитектуры адаптивного автокомпенсатора с основным выделенным каналом позволяет эффективно повысить пространственное подавление помех различной структуры

за счет предварительного умножения вычисленных весовых коэффициентов для каждого дискретного отсчета линии задержки корректирующих КИХ-фильтров на входные сигналы компенсационных каналов, таким образом осуществляя коррекцию характеристик компенсационных каналов и максимизацию межканального коэффициента корреляции помех.

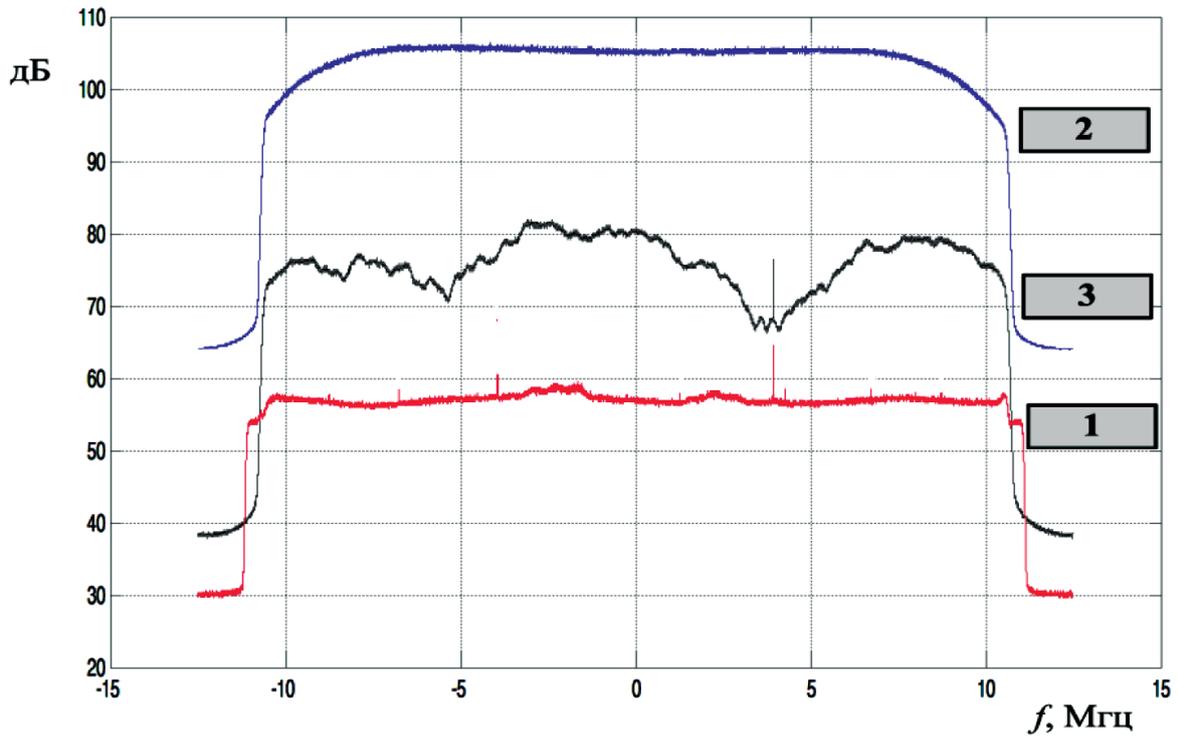
Моделирование пространственно-временной обработки сигналов

Экспериментальные исследования алгоритма адаптивной коррекции каналов с АКП производились на основании цифрового моделирования группы неидентичных каналов ААР с последующей коррекцией этих каналов. При моделировании для получения объективных данных, близких к реальным условиям, формировались помехи различной структуры (узкополосные, широкополосные) с разным набором параметров (число помех каждого вида, уровни мощности, полосы частот и т.п.). Наиболее сложными и эффективными являлись широкополосные шумоподобные помехи. Разброс характеристик каналов моделировался введением специальных модельных искажений для входной смеси каждого приемного канала. Модельные искажения формируются при помощи КИХ-фильтров первого порядка с изменяемыми (для разных каналов) комплексными коэффициентами. В результате фильтрации в таких КИХ-фильтрах изменяются АЧХ, ФЧХ и ГВЗ компенсационных приемных каналов во всей полосе частот.

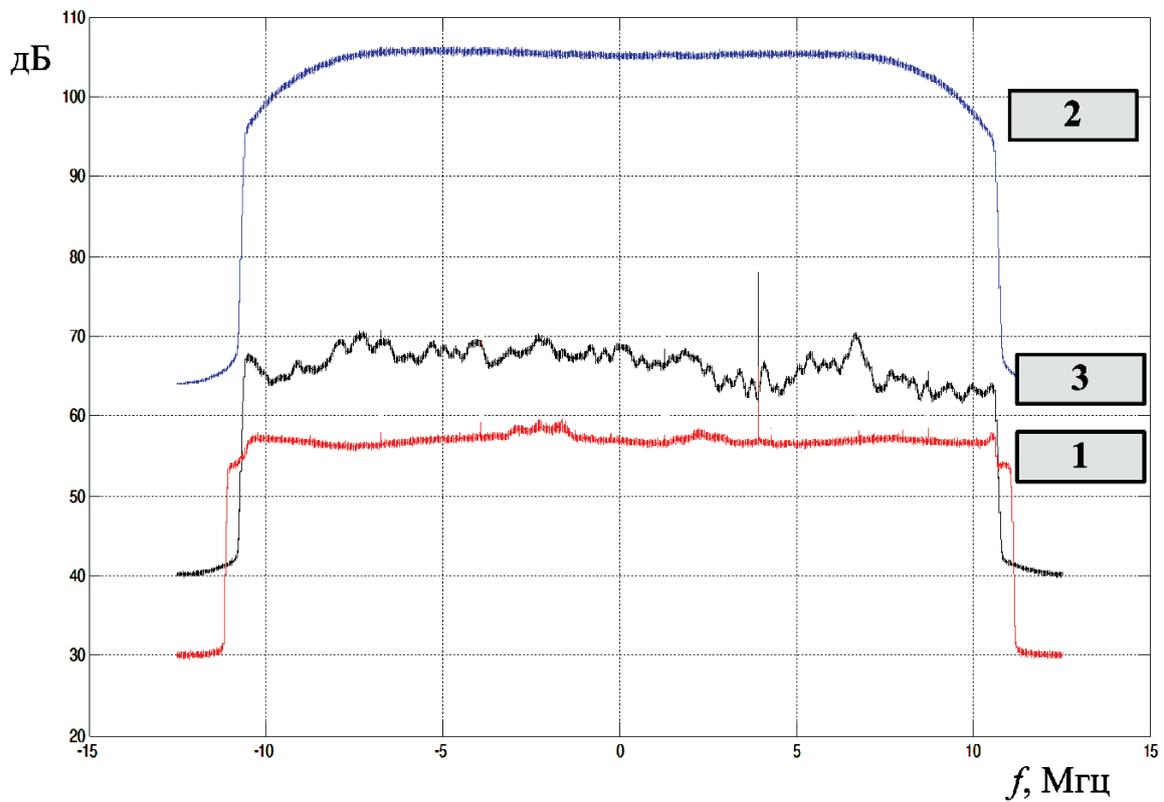
Подавление помех осуществлялось за счет подстройки пространственных коэффициентов, а коррекция характеристик компенсационных каналов реализовалась подстройкой коэффициентов временной части компенсатора. Обе петли корреляционных обратных связей подстройки коэффициентов реализуют минимизацию ошибки коррекции характеристик каналов и уровня действующих помех.

На рис. 4 показаны спектры широкополосной помехи (2), имитируемого навигационного сигнала на 4 МГц (1) без помех и его спектр после подавления помех (3). Разброс значений коэффициента подавления помех в полосе частот навигационных сигналов объясняется различием частотных характеристик приемных каналов, различным временем задержки распространения помехового колебания между разнесенными приемными каналами (рис. 4а). Коэффициент подавления составил в среднем 20–25 дБ.

Из анализа выходных сигналов адаптивного автокомпенсатора помех видно, что в автокомпенсаторе без коррекции частотных характери-



а) 1 – спектр сигнала 1-го канала без помех; 2 – спектр помехи; 3 – спектр пространственной обработки помехи



б) 1 – спектр сигнала 1-го канала без помех; 2 – спектр помехи; 3 – спектр пространственной обработки помехи с коррекцией частотных характеристик приемных каналов

Рис. 4. Спектры пространственно-временной обработки сигналов

стик компенсационных приемных каналов остат- ки от помех выше, чем в случае с коррекцией характеристик, и степень подавления помех уве- личивается по мере уменьшения рассогласования АЧХ/ФЧХ компенсационных каналов по отноше- нию к основному приемному каналу на 10–15 дБ (рис. 4б), при этом в результате коррекции частот- ных характеристик компенсационных каналов время адаптации к помеховой обстановке возраст- ает в 2–3 раза.

Рассмотрим формирование ДН многоэле- ментной ААР при пространственном подавлении помех путем моделирования в среде Matlab.

Созданная модель позволяет формировать ААР произвольной конфигурации с распо- ложением антенных элементов на плоскости и на произвольных пространственных кривых или по- верхностях. В зависимости от выбора конфигу- рации, которая определяет общий раскрыв ААР, межэлементного расстояния, количества антен- ных элементов и их расположения в самой ААР, возможно сформировать заданную ДН ААР, удов- летворяющую требованиям по точности навига- ционных измерений и уровню помехоустойчи- вости навигационного приемника. Вместе с тем для устранения интерференционных эффектов многоэлементной ААР, необходимо учитывать следующие свойства:

- 1) необходимое число элементов главным обра- зом зависит от уровня и количества боковых лепестков (оно обычно намного меньше того, которое требуется при эквидистантном распо- ложении элементов);
- 2) разрешающая способность в основном опреде- ляется размерами апертуры ААР и изменением пространственно-временного сигнала в самой апертуре;
- 3) коэффициент направленного действия форми- руемых лучей, направленных на источники по- лезных сигналов ААР, пропорционален числу используемых элементов;
- 4) результирующая ДН ААР во многом зависит от выбора и использования ДН одиночного антен- ного элемента.

В модели приняты следующие ограничения: главный максимум ДН ориентирован на источник сигнала. Фронт волны, идущей от источника по- лезного сигнала и широкополосной помехи, счи- таем плоским. В качестве помехового сигнала ис- пользована широкополосная помеха.

На рис. 5 представлена плоская 12-эле- ментная ААР, а на рис. 6 диаграмма направлен- ности одиночного элемента ААР. При таком расположении элементов со сравнительно боль- шим (в несколько длин волн) средним межэле- ментным расстоянием, когда эффекты взаимного влияния элементов пренебрежимо малы, можно получить требуемую ДН ААР с узким главным

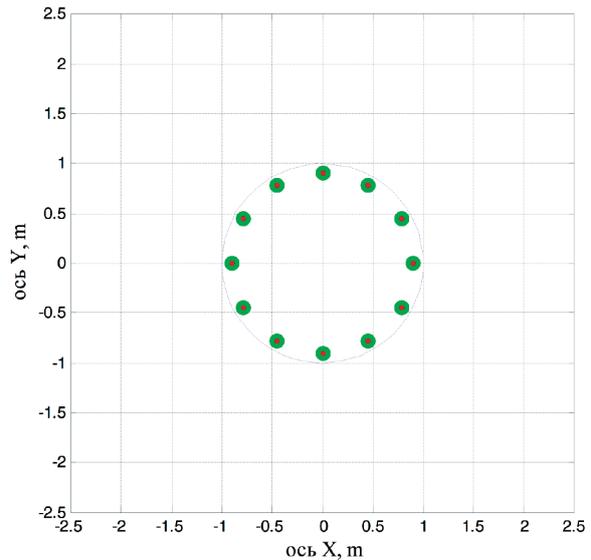


Рис. 5. Конфигурация 12-элементной адаптивной антенной решетки

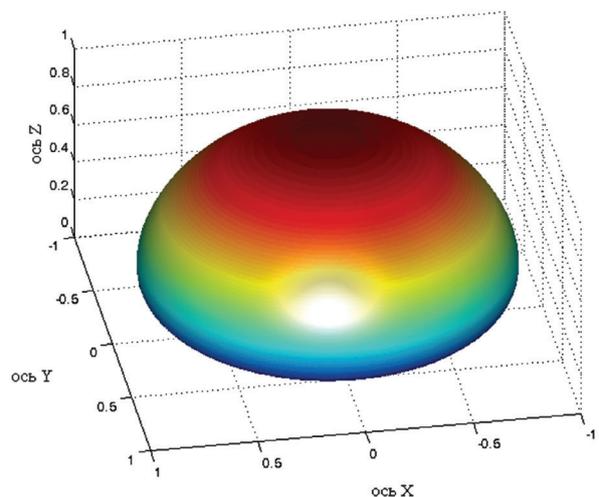


Рис. 6. Диаграмма направленности одиночного элемента адаптивной антенной решетки

лепестком и достаточно невысоким уровнем бо- ковых лепестков.

ДН меняется в соответствии с условиями функционирования – пространственно-времен- ными характеристиками источников принимае- мых сигналов и помех. Формирование ДН ААР осуществляется за счет изменения амплитудно- фазового распределения, а именно значений ве- совых коэффициентов приемных каналов. Таким образом, осуществляется образование «провалов» в результирующей ДН в направлении на источник помех и формирование лучей в направлении на источник полезного сигнала (рис. 7).

Важно заметить, что формирование макси- мумов ДН обеспечивает прием навигационных сигналов и очень эффективно снижает влияние

многолучевости в сложных условиях отражений от земной поверхности, зданий, строений и прочих объектов.

Заключение

Таким образом, применение коррекции частотных характеристик компенсационных каналов компенсирует межканальную задержку принимаемых сигналов ААР и согласовывает геометрию расположения антенных элементов с плоским волновым фронтом принимаемых помеховых колебаний, повышает степень межканальной корреляции помех, что в целом улучшает эффективность подавления различного вида помех.

По результатам исследований компенсация межканальной задержки сигналов в многоканальном навигационном приемнике при помощи коррекции характеристик приемных каналов позволяет увеличить коэффициент подавления помех на 15–20 дБ. Необходимо отметить, что увеличение порядка КИХ-фильтра (более 10) не дает большого прироста коэффициента подавления, однако при этом существенно возрастают вычислительные затраты.

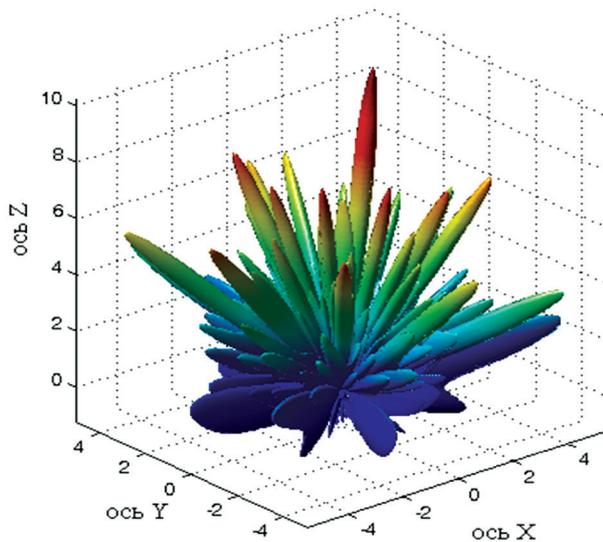


Рис. 7. Результирующая диаграмма направленности при адаптации к помехам

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10089).

Список литературы

1. Space-time processing of signals in angle measurement navigation receivers. // V. N. Tyapkin, V. N. Ratushnyak, D. D. Dmitriev, V. G. Konnov. International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 – Proceedings 2016. P. 7491671.
2. Monzingo R. A., Miller T. U. Adaptive antenna arrays. Introduction to the theory: Trans. From the English. M. : Radio and communication, 1986.
3. Widrow B., Steinsaltz S. Adaptive signal processing. Trans. With the English. M. : Radio and Communication, 1989. 440 p.
4. Jigan V. I. Adaptive filtering of signals. Theory and algorithms. M. : Technosphere, 2013. 528 p.
5. Возможные варианты построения помехозащищенной навигационной аппаратуры, способной определять пространственную ориентацию объекта / В. Н. Тяпкин, Ю. Л. Фатеев, Д. Д. Дмитриев, Е. Н. Гарин, В. Н. Ратушняк // Радионавигационные технологии. 2015. С. 48–53.
6. Синтез алгоритма защиты от помех в восьмиэлементной фазированной антенной решетке / Ю. Л. Фатеев, Д. Д. Дмитриев, В. Н. Тяпкин, В. Н. Ратушняк // Радиотехника. 2014. № 1. С. 29–34.
7. Компенсация межканальных временных задержек в помехоустойчивой угломерной навигационной аппаратуре потребителей / В. Н. Тяпкин, В. Н. Ратушняк, Д. Д. Дмитриев, Ю. Л. Фатеев // Научные технологии. 2015. № 3. С. 82–85.
8. Create a noiseless navigation receivers capable of measuring the spatial orientation of objects / С. N. Tyapkin, Y. L. Fateev, D. D. Dmitriev, E. N. Garin, V. N. Ratushnyak // Successes of modern electronics. 2014. No. 5. P. 61–65.
9. Клименко М. Подавление узкополосных помех в сигналах ГНСС с помощью КИХ-фильтров. Электроника: Наука, технология, бизнес. 2016. № 2. С. 112–119.
10. Characteristics of optimal spatial-temporal estimation of signal parameters / С. S. Efimenko, V. N. Kharisov // Radiotekhnika. 2009. No. 7. P. 28–32.

История статьи

Поступила в редакцию 14 марта 2018 г.

Принята к публикации 5 апреля 2018 г.

INCREASE OF NOISE SUPPRESSION EFFICIENCY DUE TO CORRECTION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF RECEIVING CHANNELS IN THE NAVIGATION EQUIPMENT OF CONSUMERS

V. N. Tyapkin, V. N. Ratushnyak, D. D. Dmitriev, A. B. Gladyshev

Military Engineering Institute of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Space-time signal processing in adaptive electronic systems, including navigation, remains the subject of intensive research, as it allows to improve the efficiency of receiving useful signals under the influence of natural or intentional interference. The bibliography on this subject is very extensive and includes a large number of articles of scientific and applied nature, dissertations, monographs, patent materials. Much of this work has references to monographs by R. Monzingo and B. Widrow, which set out the basic principles, criteria and algorithms of spatial-temporal signal processing. To date, the development of space-time signal processing is largely constrained by the imperfection of the element base. The use of modern navigation equipment consumers high-speed signal processors that implement advanced methods and algorithms of digital signal processing, provides the ability of digital methods to form the desired beam pattern of the antenna system and to adjust the frequency characteristics of the reception channels, to implement complex algorithms for optimal processing of useful signals, operative to control the main operation modes of equipment. One of the most important applications of space-time signal processing is noise suppression, and its effectiveness depends on the degree of inter-channel correlation of these signals received by antenna elements of the adaptive antenna array. To maximize the coefficient of interference suppression required the adoption of measures on alignment of frequency and phase characteristics of the receiving circuits, and high precision computation of weighting coefficients.

The article considers the questions of spatial filtering of the interference when adaptive interference compensator adjusted frequency characteristics of the receiving channels, and means of satellite navigation. Gradient algorithm of spatial compensation of noise, and also influence of adaptive correction of frequency characteristics of receiving channels on quality of suppression of noise is presented. The formation of a directional diagram of a multi-element adaptive antenna array with spatial noise suppression is demonstrated by modeling in the Matlab environment.

Keywords: adaptive compensators, adaptive corrector of frequency characteristics, noise immunity of GNSS receiver, a noise suppression device.

References

1. Tyapkin V. N., Ratushnyak V. N., Dmitriev D. D., Konnov V. G. Spatial-temporal signal processing in receivers of navigation measurements. International Siberian conference on control and communications, SIBKON 2016 – proceedings. 2016. P. 7491671.
2. Monzingo R. A., Miller T. W. Adaptive antenna arrays. Introduction to the theory. English TRANS. Moscow, Radio and communication Publ., 1986.
3. Widrow B., Stirnza S. adaptive signal processing. Transport. with the British. Moscow, Radio and communication Publ., 1989. 440 p.
4. Djigan V. I. adaptive signal filtering. Theory and algorithms. Moscow, Technosphere Publ., 2013. 528 p.
5. Tyapkin V. N., Fateev Yu. L., Dmitriev D. D., Garin E. N., Ratushnyak V. N. *Vozmozhnye varianty postroeniya pomekhozashchishchennoj navigacionnoj apparatury, sposobnoj opredelyat' prostranstvennyuyu orientaciyu ob'ekta* [Possible variants of the construction of noise-protected navigation equipment capable of determining the spatial orientation of the object]. Radio navigation technologies, 2015, pp. 48–53. (In Russian)
6. Fateev Yu. L., Dmitriev D. D., Tyapkin V. N., Ratushnyak V. N. *Sintez algoritma zashchity ot pomekh v vos'mielementnoj fazirovannoj antennoj reshetke* [The synthesis of algorithm of protection against harmful interference in a eight-element phased array antenna lattice]. Radiotekhnika, 2014, no. 1, p. 29–34. (In Russian)
7. Tyapkin V. N., Ratushnyak V. N., Dmitriev Dmitry D., Fateev Yu. I. *Kompensaciya mezhkanal'nyh vremennyh zaderzhek v pomekhoustojchivoj uglomernoj navigacionnoj apparature potrebitelej* [Compensation of interchannel time delays of noise proof goniometric navigation equipment]. High technologies, 2015, no. 3, pp. 82–85. (In Russian)
8. Tyapkin S. N., Fateev Yu. I., Dmitriev Dmitry D., Garin E. N., Ratushnyak B. N. The creation of silent navigation receivers capable of measuring spatial orientation of objects. Successes of modern electronics, 2014, no. 5, pp. 61–65.
9. Klimentenko M. *Podavlenie uzkopolosnyh pomekh v signalah GNSS s pomoshch'yu KIH-fil'trov* [Skopelos interference Suppression in GNSS signals using the key filters]. Electronics: Science, technology, business, 2016, no. 2. pp. 112–119. (In Russian)
10. Efimenko S. P., Kharisov V. N. Features optimal space-time estimation of parameters of signals. Radiotekhnika, 2009, no. 7, pp. 28–32.

Article history

Received 14 March 2018

Accepted 5 April 2018

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СИГНАЛА С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ КВАНТОВАТЕЛЯХ ФАЗЫ И НАПРЯЖЕНИЯ

Д. С. Викторов, Е. В. Пластинина

*Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова,
г. Тверь, Российская Федерация*

Важнейшей составной частью современных земных станций спутниковой связи являются цифровые синтезаторы сигналов. С их помощью формируются различные сложные сигналы, требуемые показатели качества. Интерес разработчиков к использованию в создаваемых и перспективных земных станциях спутниковой связи цифровых синтезаторов сигналов обусловлен рядом объективных причин:

- цифровые синтезаторы сигналов по сравнению с аналоговыми имеют высокую стабильность параметров формируемых сигналов и низкий уровень фазовых шумов;
- сочетание широких функциональных возможностей с высокой скоростью переключения и малым шагом перестройки по частоте (доли герц) позволяет с использованием одного и того же устройства формировать сигналы различной частоты с высокой точностью установки и скоростью переключения;
- быстроедействие современной элементной базы позволяет формировать гетеродинные сигналы в широком рабочем диапазоне частот, составляющем сотни мегагерц.

Исследованию методов и устройств цифрового формирования различных видов сигналов посвящено достаточное количество научных работ. Цифровые же синтезаторы сигналов с угловой модуляцией рассматриваются в них недостаточно полно, как правило, отдельно друг от друга, без выявления общих для них закономерностей и особенностей анализа. Анализ преобразований цифрового сигнала с угловой модуляцией в цифровых синтезаторах сигналов, представленного функцией нескольких переменных, как правило, основан на численных методах. Для его проведения необходимо получить математическое описание преобразований сигналов с угловой модуляцией в аналитическом виде. В статье представлены функциональные зависимости, описывающие преобразования сигналов с угловой модуляцией в последовательно соединенных квантователях фазы и напряжения с использованием метода отображения сигналов и метода контурных интегралов. Полученные зависимости позволяют оценить искажения формируемого сигнала с помощью спектрального и корреляционного анализа.

Ключевые слова: сигнал с угловой модуляцией, квантователь фазы и напряжения, метод отображения, метод контурных интегралов.

Для формирования сигналов с угловой модуляцией (УМ) используют цифровые синтезаторы сигналов (ЦСС). В зависимости от типа ЦСС с УМ используется как раздельное, так и совместное квантование фазы и напряжения [1–3]. При квантовании могут использоваться два способа: округление и усечение [4–6]. На рис. 1, а–б изображены передаточные характеристики квантования, соответствующие операции округления, а на рис. 1, в – операции усечения.

Рассмотрим функциональные преобразования сигнала с УМ в квантователе напряжения с передаточной характеристикой, соответствующей операциям усечения и округления первого и второго типов.

Ступенчатая функция $H(x)$, описывающая нелинейную передаточную характеристику квантователя, имеет точки разрыва 1-го рода. Для её аппроксимации аналитическими функциями можно использовать метод, в основе которого лежит представление нелинейной функции в виде контурного интеграла [7]

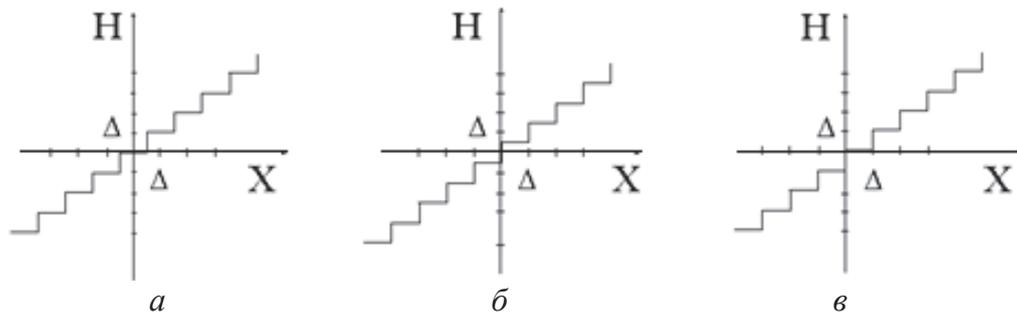


Рис. 1

$$H(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{\ell} F(js) e^{jxs} ds, \quad (1)$$

где

$$F(js) = \int_{-\infty}^{\infty} H(x) e^{-jxs} dx. \quad (2)$$

Решение задачи можно упростить, сводя интегральные преобразования (1) и (2) к ряду Фурье. При этом передаточные характеристики квантователей трех рассматриваемых вариантов, соответствующих операциям округления первого, второго типов и операции усечения, можно представить соответственно в виде:

$$H(x) = x + \frac{\Delta}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m} \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta} mx\right); \quad (3)$$

$$H(x) = x + \frac{\Delta}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta} mx\right); \quad (4)$$

$$H(x) = x - \frac{\Delta}{2} + \frac{\Delta}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta} mx\right), \quad (5)$$

где Δ – шаг квантования.

Математическое описание сигнала с квантованной фазой и напряжением можно получить с помощью операторов квантователей фазы H_{φ} и напряжения H_u :

$$U_{\varphi u}(t) = H_u \left\langle U_0 \cos \left\{ H_{\varphi} [\varphi(t)] \right\} \right\rangle. \quad (6)$$

Оператор квантования напряжения, соответствующий операции округления первого типа (3), имеет вид

$$H_u(U) = U + \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\ell}}{\ell} \sin\left(\ell \frac{2\pi}{\Delta_u} U\right), \quad (7)$$

где $\Delta_u = 2U_0 / (L-1)$ – шаг квантования напряжения; U_0 – амплитуда исходного сигнала с УМ; L – количество уровней квантования напряжения.

Тогда выражение (6) можно преобразовать к виду

$$U_{\varphi u}(t) = U_0 \cos \left\{ H_{\varphi} [\varphi(t)] \right\} + \frac{2U_0}{\pi(L-1)} \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{-1^{\ell}}{\ell} \sin \left\langle \ell \pi (L-1) \cos \left\{ H_{\varphi} [\varphi(t)] \right\} \right\rangle. \quad (8)$$

В свою очередь, с помощью оператора квантования фазы, соответствующего операции усечения,

$$U_{\varphi}(t) = U_0 \frac{\sin \pi / M}{\pi / M} \cos [\varphi(t) - \pi / M] + \sum_{m=1}^{\infty} U_0 \frac{\sin \pi (mM \pm 1) / M}{\pi (mM \pm 1) / M} \times \cos \left\{ (mM \pm 1) [\varphi(t) - \pi / M] \right\}, \quad (9)$$

из выражения (8) получим

$$U_{\varphi u}(t) = U_0 \frac{\sin \pi / M}{\pi / M} \cos [\varphi(t) + \pi / M] + U_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \pi (mM \pm 1) / M}{\pi (mM \pm 1) / M} \times \cos \left\{ (mM \pm 1) [\varphi(t) - \pi / M] \right\} + \frac{2U_0}{\pi(L-1)} \times \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{-1^{\ell}}{\ell} \sin \left\langle \ell \pi (L-1) \cos \left\{ H_{\varphi} [\varphi(t)] \right\} \right\rangle. \quad (10)$$

Первое слагаемое в (10) описывает основную составляющую сигнала с квантованной фазой и напряжением, второе слагаемое – дополнительные составляющие, обусловленные квантованием сигнала с УМ по фазе, а третье слагаемое – составляющие, обусловленные квантованием по напряжению сигнала с квантованной фазой. Однако

получить запись третьего слагаемого в (10) в явном аналитическом виде в данном случае затруднительно. Выражения, близкие по структуре к (10), имеют место и в случае, когда передаточная характеристика квантователя фазы соответствует операции усечения, а передаточная характеристика квантователя напряжения соответствует операциям округления второго типа и усечения [8, 9]. Для преодоления этих трудностей напрямую воспользуемся методом отображения сигналов, сущность которого состоит в следующем [10]. Неравномерно дискретизированный сигнал с УМ из области определения отображается в область изображений таким образом, что в ней уже имела место равномерная дискретизация сигнала с УМ. После этого исследуют функциональные преобразования сигнала с УМ и квантовой фазой, используя для этого известные результаты, полученные для равномерной дискретизации и интерполяции, а затем осуществляется обратное отображение.

Тогда получим отображение сигнала с квантованной фазой и напряжением φ

$$U_{\varphi u}(t) \rightarrow U_{\varphi u}(\psi) / \varphi'(\psi).$$

В соответствии с отношением эквивалентности

$$f[\varphi(t)] \sim f(\psi) / \varphi'(\psi) \quad (11)$$

образ сигнала (6) имеет вид

$$U_{\varphi u}(\psi) = U'_{\varphi u}(\psi) / \varphi'(\psi), \quad (12)$$

где

$$U'_{\varphi u}(\psi) = H_u \left\{ \cos \left[H_\varphi(\psi) \right] \right\}, \quad (13)$$

и представляет собой косинусоидальную функцию с квантованной фазой и напряжением.

Процесс квантования фазы и напряжения гармонического сигнала в области изображения представлен графически на рис. 2. Поскольку фаза такого сигнала $\varphi(\psi)$ изменяется по линейному закону, то длительность всех ступенек квантованного сигнала одинакова. Поэтому сигнал $U_{\varphi u}(\psi)$ можно рассматривать как результат последовательно проводимых операций: дискретизации сигнала $U_0 \cos \psi$ эквидистантной последовательностью дельта-функций

$$y(\psi) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} \delta(\psi - r\Delta_\varphi),$$

квантования амплитуды дискретных отсчетов и ступенчатой интерполяции.

Дискретизированный и квантованный гармонический сигнал можно описать выражением

$$U_{\text{дк}}(\psi) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} U_r \delta(\psi - r\Delta_\varphi), \quad (14)$$

где амплитуда отсчетов U_r в зависимости от способа квантования напряжения определяется:

– при использовании операции округления первого типа (рис. 1, а)

$$U_r = \frac{2U_0}{L-1} \left\{ \text{ent} \left[\frac{L-1}{2} \cos(r\Delta_\varphi) + 0,5 \right] \right\}; \quad (15)$$

– при использовании операции округления второго типа (рис. 1, б)

$$U_r = \frac{2U_0}{L-1} \left\{ \text{ent} \left[\frac{L-1}{2} \cos(r\Delta_\varphi) \right] + 0,5 \right\}; \quad (16)$$

при использовании операции усечения (рис. 1, в)

$$U_r = \frac{2U_0}{L-1} \left\{ \text{ent} \left[\frac{L-1}{2} \cos(r\Delta_\varphi) \right] + 0,5 \right\} - \frac{\Delta_u}{2}, \quad (17)$$

где $\text{ent}(x)$ – операция выделения целой части числа.

Сигнал $U_{\text{дк}}(\psi)$ является периодическим с периодом повторения $\psi_0 = M\Delta_\varphi$. В связи с этим спектр его также представляет собой дискретную периодическую функцию, интервал между соседними спектральными линиями которой $\zeta_1 = 2\pi/\psi_0 = 1$, а период повторения по оси ζ равен $\zeta_0 = 2\pi/\psi_0 = M$. Значения коэффициентов дискретного преобразования Фурье (ДПФ) определяются из выражения

$$\dot{C}_k = \frac{1}{2\pi} \sum_{r=0}^{M-1} U_r e^{-j\frac{2\pi}{M}kr}. \quad (18)$$

Ступенчатую интерполяцию сигнала $U_{\text{дк}}(\psi)$ можно представить в виде свертки $U_{\text{дк}}(\psi) \otimes g_0(\psi)$, где $g_0(\psi)$ для квантователя фазы с передаточной характеристикой, соответствующей операции усечения, представляет собой прямоугольный импульс вида

$$g_0(\psi) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \psi < \Delta_\varphi; \\ 0, & \psi < 0, \psi \geq \Delta_\varphi, \end{cases}$$

спектральная плотность которого определяется выражением

$$\dot{G}_0(\zeta) = \frac{\sin \zeta \Delta_\varphi / 2}{\zeta / 2} e^{-j\zeta \Delta_\varphi / 2}.$$

В этом случае коэффициенты \dot{C}_k сигнала $U_{\varphi u}(\psi)$ можно определить из произведения

$$\dot{C}_k = \left\{ \frac{\sin(\pi k / M)}{\pi k / M} e^{-j\pi k / M} \right\} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{r=0}^{M-1} U_r e^{-j\frac{2\pi}{M}kr} \right\}. \quad (19)$$

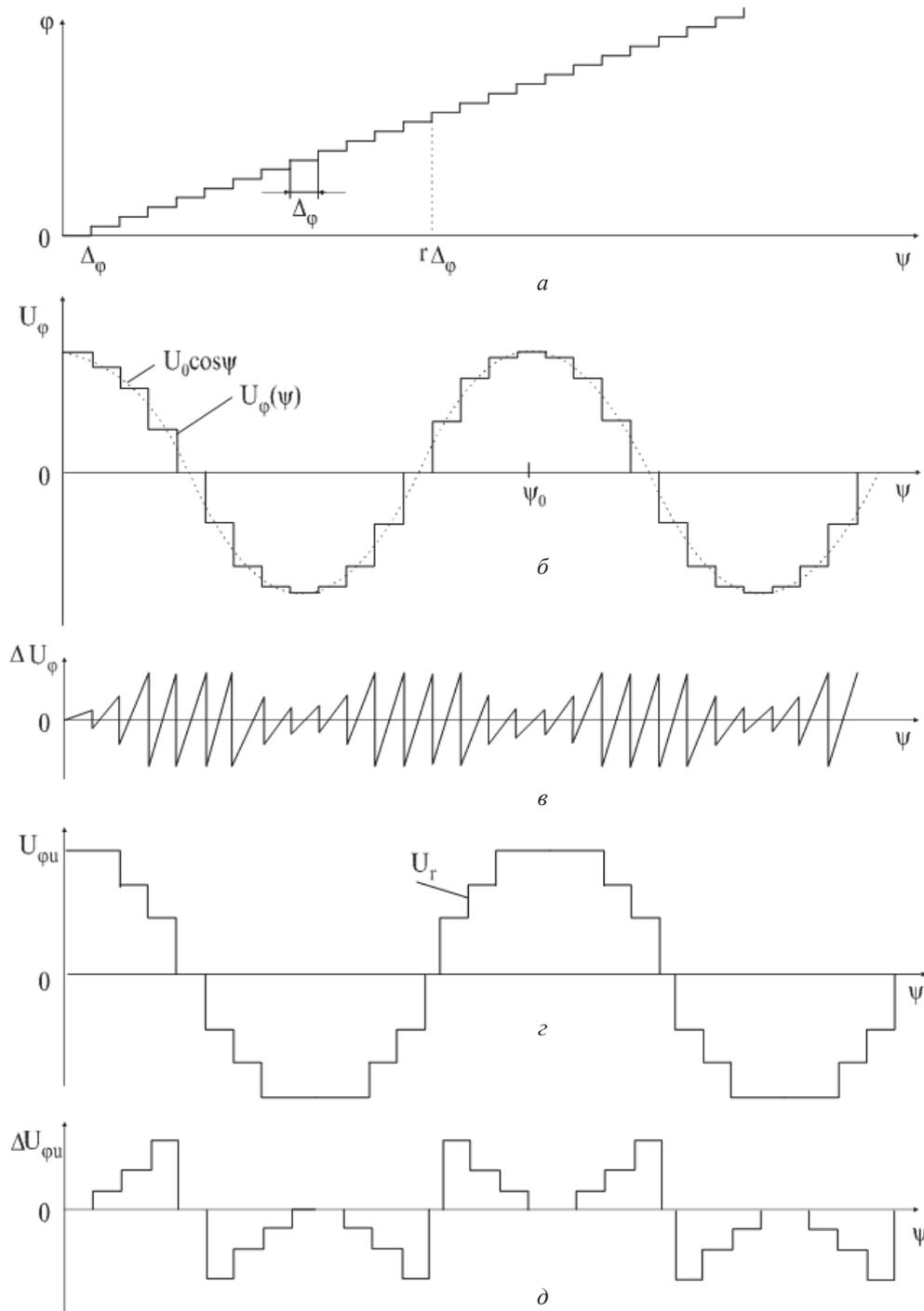


Рис. 2

Сначала рассмотрим ситуацию, когда передаточная характеристика квантователя напряжения соответствует операции округления первого и второго типов. В этом случае, как видно из (15) и (16), амплитуды r -го и $(r + M/2)$ -го дискретных отсчетов U_r одинаковы, а их полярности разные. Поэтому по аналогии со спектром сигнала с УМ, квантованного по напряжению, спектр сиг-

нала $U_{\phi u}'(\psi)$ содержит только нечетные составляющие

$$\begin{aligned} \dot{C}_{2k-1} = & \frac{\sin[\pi(2k-1)/M]}{\pi(2k-1)/M} e^{-j\pi(2k-1)/M} \times \\ & \times \frac{1}{M} \sum_{r=0}^{M-1} U_r e^{-j\frac{2\pi}{M}\pi(2k-1)r}. \end{aligned} \quad (20)$$

Тогда сигнал $U'_{\phi u}(\psi)$ можно представить рядом Фурье:

$$U'_{\phi u}(\psi) = \sum_{k=1}^{\infty} U_{2k-1} \cos[(2k-1)\psi - \pi(2k-1)/M], \quad (21)$$

где $U_{2k-1} = 2|\dot{C}_{2k-1}|$.

Подставляя (21) в (12) и осуществляя обратное отображение $\Theta: U(\psi) \rightarrow U(t)$ в соответствии с отношением эквивалентности (11), получим

$$U_{\phi u}(t) = U_1 \cos[\varphi(t) - \pi/M] + \sum_{k=2}^{\infty} U_{2k-1} \cos[(2k-1)\varphi(t) - \pi(2k-1)/M]. \quad (22)$$

В выражении (22) первое слагаемое описывает основную составляющую сигнала с квантованной фазой и напряжением, которая имеет такую же фазовую структуру, что и исходный сигнал с УМ. Второе слагаемое описывает дополнительные нечетные составляющие сигнала с квантованной фазой и напряжением. Их полный фазовый угол в $(2k-1)$ раз больше, чем полный фазовый угол $\varphi(t)$ исходного сигнала с УМ. Поскольку при квантовании фазы используется операция усечения, то сигнал с квантованной фазой и напряжением имеет постоянный фазовый сдвиг, пропорциональный номеру составляющей $\pi(2k-1)/M$.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда передаточные характеристики квантователя напряжения, как и квантователя фазы, соответствуют операции усечения. В этом случае для коэффициентов ДПФ сигнала $U'_{\phi u}(\psi)$, учитывая (17) и (18), получим следующее выражение:

$$\dot{C}_k = \left\{ \frac{\sin(\pi k/M)}{\pi k/M} e^{-j\pi k/M} \right\} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{r=0}^{M-1} U_r e^{-j\frac{2\pi}{M}kr} \right\} - \left\{ \frac{\sin(\pi k/M)}{\pi k/M} e^{-j\pi k/M} \right\} \left\{ \frac{\Delta_{\varphi}}{2M} \sum_{r=0}^{M-1} e^{-j\frac{2\pi}{M}kr} \right\}. \quad (23)$$

Первое слагаемое в (23) аналогично выражению (19), а второе слагаемое равно $\Delta_{\varphi}/2$ при $k=0$ и равно нулю при остальных значениях k . Тогда, учитывая (23) и производя преобразования, аналогичные используемым при выводе выражения (22), для последнего рассматриваемого случая получим:

$$U_{\phi u}(t) = U_1 \cos[\varphi(t) - \pi/M] + \sum_{k=2}^{\infty} U_{2k-1} \cos[(2k-1)\varphi(t) - \pi(2k-1)/M] - \frac{\Delta_{\varphi}}{2}, \quad (24)$$

где $U_{2k-1} = 2|\dot{C}_{2k-1}|$, а коэффициенты ДПФ C_{2k-1} определяются из (20) и (16).

На рис. 3 в логарифмическом масштабе изображены нормированные значения амплитуд нечетных составляющих сигнала с квантованной фазой и напряжением U_{2k-1}/U_0 в зависимости от значения k , рассчитанные в соответствии с выражениями (20) и (15), для различных числа разрядов квантования фазы R_{φ} и напряжения R_u .

На рис. 4 приведены аналогичные зависимости, рассчитанные в соответствии с выражениями (20) и (16), также указаны нормированные значения амплитуды основной составляющей сигнала с УМ с квантованной фазой и напряжением U_1/U_0 .

Сопоставляя выражения (24) и (22), с учетом (16), (19), (20) и (23) нетрудно убедиться, что при использовании операции усечения для квантования фазы и напряжения аналогичные графики будут отличаться от графиков, изображенных на рис. 3, только постоянной составляющей, равной $\Delta_{\varphi}/2$. Как следует из (10) и (22), (24) и наглядно видно на рис. 3 и 4, дополнительные составляющие сигнала с УМ с квантованной фазой и напряжением можно разделить на два вида. Первые из них, имеющие индекс $mM \pm 1$, представляют собой дополнительные составляющие, обусловленные квантованием фазы сигнала с УМ. Их полный фазовый угол в $mM \pm 1$ раз больше, чем у исходного сигнала с УМ, а амплитуда пропорциональна значению

$$\sin[\pi(mM \pm 1)/M] / [\pi(mM \pm 1)/M].$$

Вторые из них, имеющие индекс $2k-1$, обусловлены квантованием напряжения сигнала с УМ с квантованной фазой. Эти составляющие, как видно из (20), в зависимости от их номера имеют амплитудную модуляцию в виде

$$\sin[\pi(2k-1)/M] / [\pi(2k-1)/M].$$

Максимальное значение этих составляющих не превышает половины шага квантования напряжения.

Резюмируя все вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

- полученные аналитические выражения описывают функциональные преобразования сигналов с УМ в последовательно соединенных квантователях напряжения и фазы с использованием методов контурного интеграла и отображения сигналов;
- полученные математические модели функциональных преобразований сигналов с УМ в последовательно соединенных квантователях фазы и напряжения позволяют использовать их для анализа структуры спектров и для аналитических расчетов искажений спектров и корреляционных функций этих сигналов.

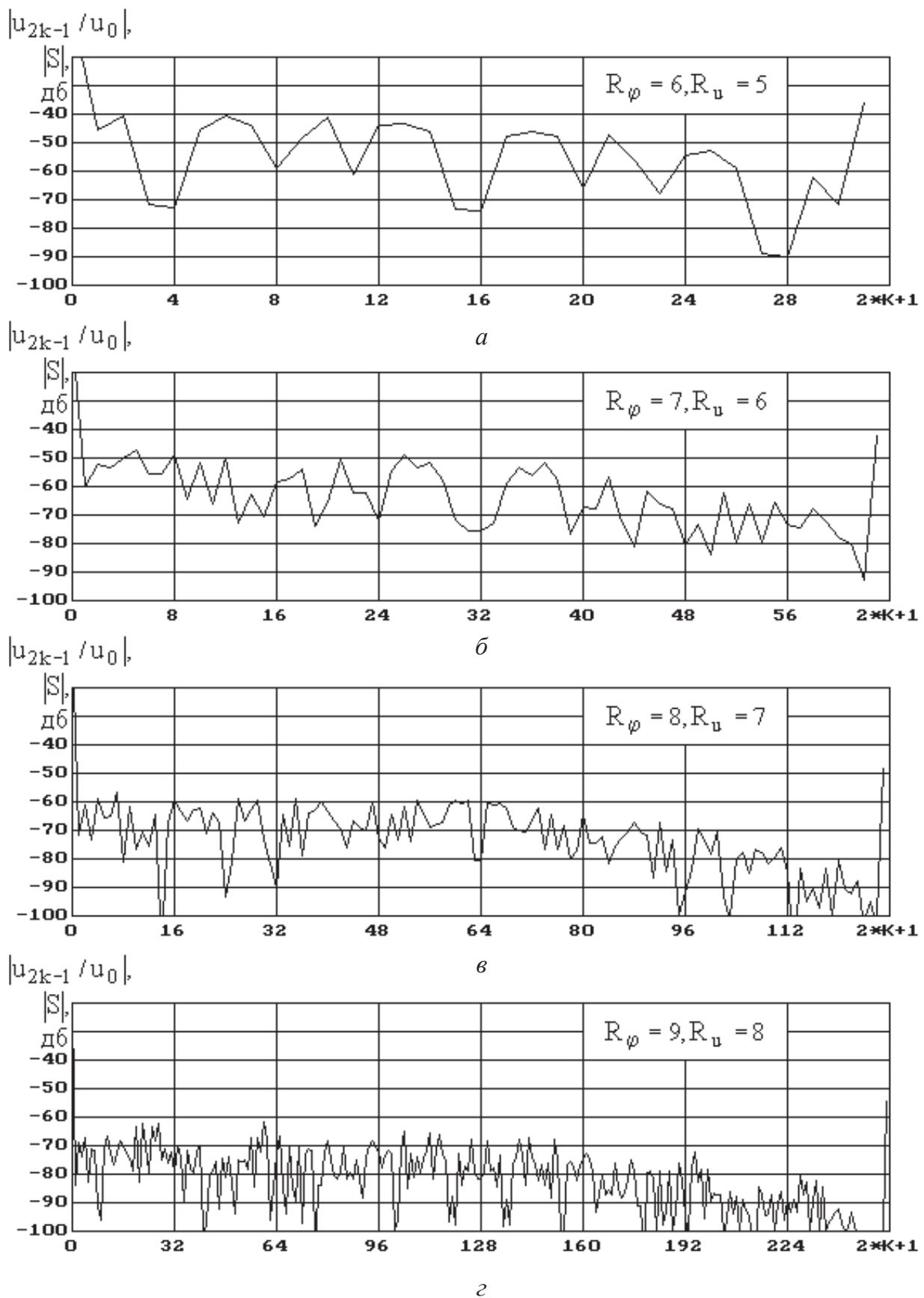
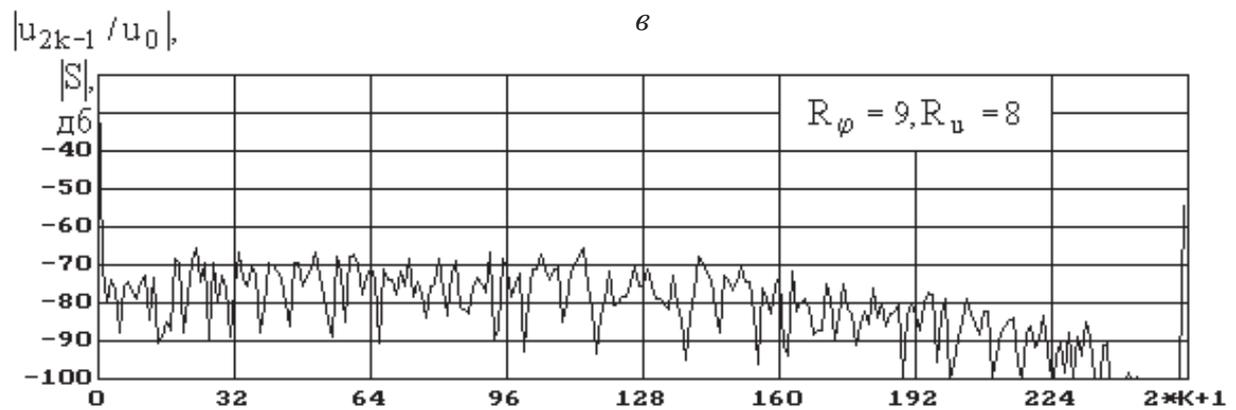
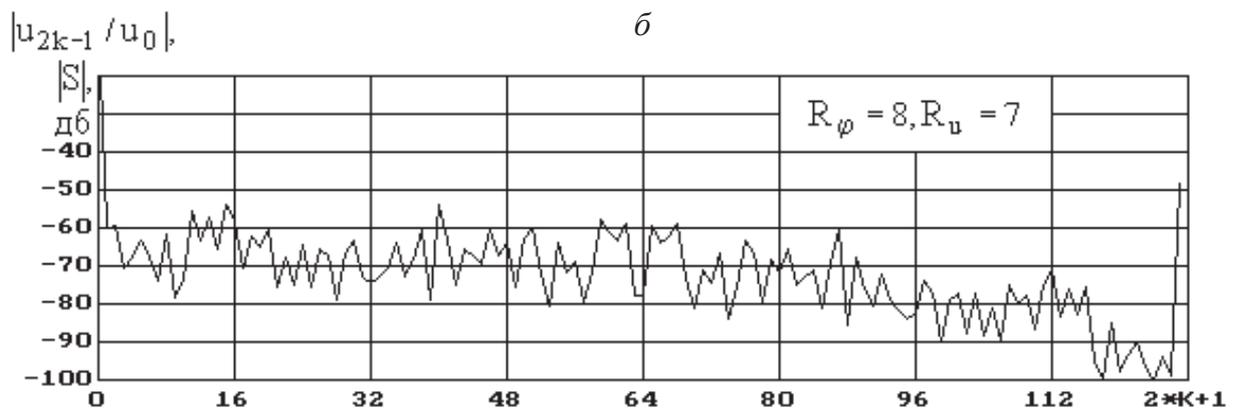
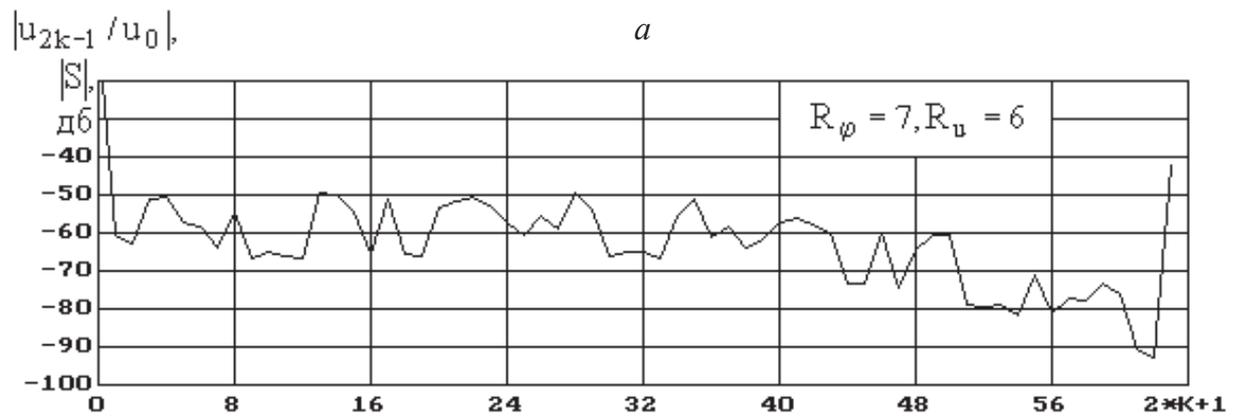
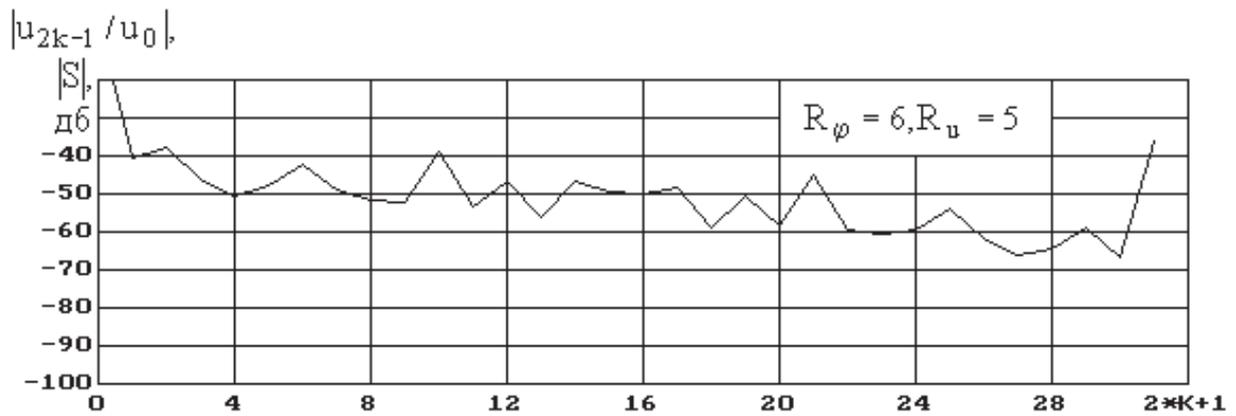


Рис. 3



г

Рис. 4

Список литературы

1. Гомозов В. И. Формирование сложных радиолокационных СВЧ-сигналов с высокой скоростью угловой модуляции : дис. ... д-ра техн. наук. 1982. 485 с.
2. Цифровые фильтры и устройства обработки сигналов на интегральных микросхемах : справ. пособие / под ред. Б. Ф. Высоцкого. М. : Радио и связь, 1984. 216 с.
3. Варакин Л. Е. Цифровая обработка сигналов // Радиотехника. 1984. № 3. С. 6–10.
4. Гольденберг Л. М., Матюшин Б. Д., Поляк М. Н. Цифровая обработка сигналов : справочник. М. : Радио и связь, 1985. 312 с.
5. Цикин И. А. Дискретно-аналоговая обработка сигналов. М. : Радио и связь, 1982. 160 с.
6. Пестряков В. Б., Белецкий А. К., Журавлев В. И., Сердюков П. Н. Дискретные сигналы с непрерывной фазой: Теория и практика // Зарубежная радиоэлектроника. 1988. № 4. С. 16–37.
7. Маркюс Ж. Дискретизация и квантование / пер. с фр. под ред. А. В. Шилейко. М. : Энергия, 1989. 144 с.
8. Семенов О. Б. Нелинейные искажения генератора цифрового гармонического сигнала // Радиотехника. 1987. № 4. С. 49–51.
9. АС № 272536 (СССР). Цифровой синтезатор ЛЧМ-сигналов / Бондарь Л. В., Гомозов В. И., Кандырин Н. П., Михайлов Н. А., Романов Ю. М. – заявл. 11.05.87.
10. Викторов Д. С., Гарин Е. Н., Пластинина Е. В., Лютиков И. В. Метод компенсации искажений сигналов с угловой модуляцией в цифровых синтезаторах сигналов // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 12. С. 85–88.

История статьи

Поступила в редакцию 16 марта 2018 г.

Принята к публикации 5 апреля 2018 г.

THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE FUNCTIONAL TRANSFORMATIONS OF A SIGNAL WITH ANGULAR MODULATION IN SEQUENTIALLY THE CONNECTED QUANTIZERS OF A PHASE AND TENSION

D. S. Viktorov, E. V. Plastinina

Military Aerospace Defense Academy, Tver, Russian Federation

The most important constituent of the modern terrestrial stations of satellite communication are digital synthesizers of signals. With their help various composite signals indicators. The interest of developers in use in the created and perspective terrestrial stations of satellite communication of digital synthesizers of signals is caused by a number of the objective reasons:

- *digital synthesizers of signals, in comparison with analog, have high stability of parameters of the formed signals and low level of phase noise;*
- *the combination of broad functionality to high speed of switching and a small step of reorganization on the frequency (a share of hertz) allows to form with use of the same device signals of various frequency with a high precision of installation and speed of switching;*
- *the quick action of the modern element base allows to form heterodyne signals in the wide working range of frequencies making hundreds of megacycles.*

Enough scientific works is devoted to a research of methods and devices of digital formation of different types of signals. Digital synthesizers of signals with angular modulation are considered in them insufficiently fully, as a rule, separately from each other, without identification of common for them regularities and features of the analysis. The analysis of transformations of the digital signal with angular modulation in digital synthesizers of signals presented by function of several variables, as a rule, is based on numerical methods. For its carrying out it is necessary to receive the mathematical description of transformations of signals with angular modulation in an analytical look. The functional dependences describing transformations of signals with angular modulation in sequentially the connected quantizers of a phase and tension with use of a method of display of signals and a method of planimetric integrals are presented in article. The received dependences allow to estimate distortions of the formed signal by means of spectral and correlation analysis.

Keywords: angle modulation signal, phase and voltage quantizer, signal display method, contour integration method.

References

1. Gomozov V. I. *Formirovanie slozhnykh radiolokatsionnykh SVCh signalov s vysokoi skorost'iu uglovoi moduliatsii. Dokt. Diss.* [Formation of difficult radar very high frequencies of signals with a high speed of angle modulation. Dokt. Diss.]. VIRTA Publ., 1982. 485 p.
2. *Tsifrovye fil'try i ustroistva obrabotki signalov na integral'nykh mikroskhemakh* [Digital filters and processing devices of signals on integral chips: handbook] (under edition B.F. Vysotskogo). Moscow, Radio i Svjaz Publ., 1984. 216 p.
3. Varakin L. E. *Tsifrovaia obrabotka signalov. Spravochnik* [Digital signal processing]. Radiotekhnika, 1984, no. 3, pp. 6–10. (In Russian)
4. Gol'denberg L. M., Matiushin B. D., Poliak M. N. *Tsifrovaia obrabotka signalov.* [Digital processing of signals]. Moscow, Radio i Svjaz Publ., 1985. 312 p.
5. Tsikin I. A. *Diskretno-analogovaia obrabotka signalov* [Discrete and analog signal processing]. Moscow, Radio i Svjaz Publ., 1982. 160 p.
6. Pestriakov V. B., Beletskii A. K., Zhuravlev V. I., Serdiukov P. N. *Diskretnye signaly s nepreryvnoi fazoi: Teoriia i praktika* [Discrete signals with the continuous phase: Theory and practice]. Zarubezhnaia radioelektronika, 1988, no. 4, pp. 16–37. (In Russian)
7. Markus I. Echantillonnage et quantification. RuMoRGB, 1989. 144 p.
8. Semenov O. B. *Nelineinye iskazheniia generatora tsifrovogo garmonicheskogo signala* [Nonlinear distortions of the generator of a digital harmonic signal]. Radiotekhnika, 1987, no. 4, pp. 49–51. (In Russian).
9. Bondar' L.V., Gomozov V. I., Kandyrin N. P., Mikhailov N. A., Romanov U.M. *Tsifrovoi sintezator LChM signalov* [Digital synthesizer of linear and frequency-modulated signals]. Patent USSR, no. 272536, 1987.
10. Viktorov D. S., Garin E. N., Platinina E. V., Lyutikov I. V. *Metod kompensacii iskazhenii signalov s uglovoi moduliatsiey v tsifrovih sintesatorah signalov* [Method of compensation og distortions of signals with angle modulation in digital synthesizers of signals]. Uspehi sovremennoi radioelektroniki, 2012, no. 12, pp. 85–88. (In Russian)

Article history

Received 16 March 2018

Accepted 5 April 2018

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КОЛИЧЕСТВА НЕОБНАРУЖЕННЫХ ДЕФЕКТОВ ЕСТЕСТВЕННОЙ СЕМАНТИКИ ПРОГРАММЫ С ТРЕБУЕМОЙ СТЕПЕНЬЮ ДОВЕРИЯ ПРИ ВЕРИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д. С. Викторов, Е. Н. Жидков, Р. Е. Жидков

Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, г. Тверь, Российская Федерация

В рамках создания метода верификации программного обеспечения бортовых цифровых вычислительных комплексов космических аппаратов, удовлетворяющего задачам процесса верификации и разрабатываемого с целью снижения суммарных затрат на верификацию, представлена методика оценки количества не выявленных дефектов естественной семантики программы. Обнаружение данного типа дефектов производится путем статического анализа исходного кода программы и основывается на контроле соблюдения принципа размерной однородности выражений. Оценка количества дефектов выполняется по модели надежности Миллса, относящей к классу статистических моделей с преднамеренным внесением дефектов в программное обеспечение. Процедура внесения дефектов демонстрируется на теоретико-множественном представлении программы с учетом характерных для дефектов естественной семантики программы особенностей исходного кода, влияющих на адекватность проводимой процедуры. Требуемая степень доверия к результатам оценки необнаруженных дефектов достигается за счет вычисления математического ожидания количества обнаруживаемых «преднамеренных» дефектов по выборке требуемого размера, которая зависит от статистических характеристик, получаемых из начальной выборки и заданных значений доверительной вероятности и доверительного интервала. Полученная методика может быть использована при проведении испытаний исходного кода программ в рамках процесса верификации программного обеспечения бортовых цифровых вычислительных комплексов космических аппаратов, так как основана на общеизвестных математических соотношениях и соответствует требованиям нормативных документов в данной области.

Ключевые слова: программное обеспечение, бортовой цифровой вычислительный комплекс, космический аппарат, верификация, статический анализ, внесение дефектов, естественная семантика.

Постоянное повышение требований к разрабатываемым бортовым цифровым вычислительным комплексам космических аппаратов (БЦВС КА) вызвало рост сложности и размера программного обеспечения (ПО) как наиболее гибкого компонента, расширяющего функциональные возможности КА. Данный факт обусловил значительное увеличение трудозатрат на разработку ПО БЦВС КА как в абсолютном значении, так и в сравнении с трудозатратами на создание

технических средств. По некоторым оценкам, 15 % от общего количества затрат отводится на верификацию ПО, при этом наблюдается тенденция к увеличению этой доли. В условиях секвестра бюджета из-за сложной внешнеэкономической ситуации вокруг России важным является использование таких методов разработки ПО, в том числе методов верификации, которые позволяют экономить государственные средства [1, 2].

Основной путь снижения затрат на верификацию ПО – максимальная автоматизация процесса исследования программных продуктов.

Методом верификации, имеющим наибольшую степень автоматизации, служит статический анализ (СА). Главный недостаток СА – ограниченное множество типов обнаруживаемых дефектов ПО, расширение которого является основным направлением развития данной группы методов верификации ПО [3–5].

Для снижения трудозатрат на верификацию ПО предложен подход, основанный на СА программ на предмет обнаружения дефектов естественной семантики (ДЕС). Естественная семантика представляет собой размерность физических величин, интерпретируемых в идентификаторах исходного кода (ИК) программы. Для реализации контроля отсутствия ДЕС необходимо выполнить отображение множества идентификаторов на множество векторов, описывающих размерность, а также отобразить операции с идентификаторами на операции с векторами. Далее производятся вычисления с векторами в порядке, описываемом абстрактным синтаксическим деревом с контролем условий корректности.

Структура метода верификации ПО основывается на задачах, стоящих перед данным интегральным процессом разработки. Наравне с обнаружением и регистрацией программных дефектов в рамках верификации ПО встроенных систем необходимо доказать устранение дефектов с высокой степенью доверия, под которым предлагается понимать конкретные значения доверительно-го интервала $I_{\beta}^{TRЕБ}$ и доверительной вероятности $\beta_{TRЕБ}$ [6–8].

Для доказательства устранения дефектов ПО воспользуемся величиной, характеризующей количество необнаруженных дефектов:

$$N_{НЕОБЩ} = N_{ОБЩ} - N_{ОБН}, \quad (1)$$

где $N_{ОБЩ}$ – количество «собственных» дефектов программы до проведения верификации ПО; $N_{ОБН}$ – количество обнаруженных «собственных» дефектов программы.

На практике для оценки количества дефектов до начала верификации $N_{ОБЩ}$ применяются различные модели надежности: эвристическая, Джелински-Моранды, Миллса.

Простая эвристическая модель и модель Джелински-Моранды не могут применяться для оценки количества ДЕС, так как идеи, лежащие в их основе, противоречат сути СА, позволяющего по некоторой математической модели обнаруживать все возможные дефекты за один проход анализатора независимо от того, каким специалистом осуществляется исследование. При этом если рассматривать СА как контрольный пример в рамках тестирования, то интенсивность появления дефектов после его выполнения снизится сразу до нуля,

что не позволит анализировать временные интервалы между проявлениями дефектов [9, 10].

Учесть вероятностный характер выявления ДЕС в оценке их количества до начала верификации, обусловленный характеристиками ИК программы и неизвестным законом распределения дефектов по составляющим выражений кода, возможно с использованием статистических моделей надежности, основанных на преднамеренном внесении дефектов в ПО. К классу подобных моделей относится модель Миллса, в которой вероятности обнаружения «собственных» дефектов и преднамеренно внесенных считают равными, а выражение для количества дефектов в программе до начала испытаний, исходя из принципа максимального правдоподобия, имеет вид [10]

$$N_{ОБЩ} = \frac{N_{ОБЩ}^{ПР} N_{ОБН}}{N_{ОБН}^{ПР}}, \quad (2)$$

где $N_{ОБЩ}^{ПР}$ – количество преднамеренно внесенных дефектов в программу; $N_{ОБН}^{ПР}$ – количество обнаруженных дефектов программы из числа преднамеренно внесенных.

В модели надежности Миллса преднамеренное внесение дефектов производится до начала испытаний, что не может быть применено для оценки количества ДЕС в ПО, так как при этом существует вероятность взаимной компенсации с «собственными» дефектами программы. Свести риск подобной компенсации до нуля невозможно, однако минимальных значений для конкретного варианта ИК программы он достигнет при внесении дефектов после выявления «собственных». При этом $N_{ОБН}$ определяется методикой СА для поиска ДЕС программы и зависит от характеристик ИК программы, $N_{ОБЩ}^{ПР}$ обуславливается количеством операторов программы, содержащих операции с естественной семантикой, $N_{ОБН}^{ПР}$ в случае многократного проведения опытов будет иметь различные значения, что объясняется случайным попаданием преднамеренно вносимого ДЕС в одну из составляющих оператора (операцию или операнд). Закон распределения $N_{ОБН}^{ПР}$ неизвестен, поэтому в соотношении (2) предлагается использовать оценку математического ожидания (МОЖ) данной величины $\tilde{M}[N_{ОБН}^{ПР}]$:

$$N_{ОБЩ} = \frac{N_{ОБЩ}^{ПР} N_{ОБН}}{\tilde{M}[N_{ОБН}^{ПР}]}. \quad (3)$$

Конечное выражение для количества необнаруженных дефектов получается путем замены в выражении (1) $N_{ОБЩ}$ на соотношение (3):

$$N_{НЕОБН} = N_{ОБН} \left(\frac{N_{ОБЩ}^{ПР}}{\tilde{M}[N_{ОБН}^{ПР}]} - 1 \right). \quad (4)$$

Слабым местом моделей надежности, основанных на внесении дефектов, является процедура преднамеренного внесения, поскольку предполагается, что вероятности обнаружения «собственных» и преднамеренно внесённых дефектов равны [9]. Данная проблема возникает вследствие высокой сложности учета индивидуальных особенностей программистов (стиль, квалификация и т.п.) при выполнении прогноза возможной локализации «собственных» дефектов, который может быть использован в качестве множества потенциальных точек для искажения. Помимо своеобразия программистов необходимо уделять внимание и специфике характеристик ИК программы (для ДЕС это частота появления операндов), что является вполне формализуемой задачей.

Процесс внесения ДЭС предлагается рассматривать на представлении программы в виде мультимножества [11]:

$$SW = \{stmt_i \mid stmt_i \in STMT\}, i = \overline{1, I}, \quad (5)$$

где $stmt_i \in STMT$ – i -й оператор программы, принадлежащий множеству операторов программы $STMT$.

Если абстрагироваться от синтаксиса конкретного языка программирования (ЯП), то любой оператор из (5), указывающий ЭВМ на выполнение вычисления, является некоторой комбинацией множества операндов, представленных идентификаторами ИК программы, и операций, определенных в спецификации ЯП:

$$stmt_i = (OPR_i^A, opr_i^П, opr_i^C, OPRND_i), \quad (6)$$

где $OPR_i^A = \{opr_{ij}^A \mid opr_{ij}^A \in OPR_A, j = \overline{1, J}\}$ – мультимножество арифметических операций i -го оператора, порождаемое множеством арифметических операций ЯП OPR_A ; $J = |OPR_i^A|$ – величина, характеризующая количество арифметических операций i -го оператора; $opr_i^П \in OPR_П$ – операция присваивания i -го оператора, принадлежащая множеству операций присваивания ЯП; $opr_i^C \in OPR_C$ – операция сравнения i -го оператора, принадлежащая множеству операций сравнения ЯП; $OPRND_i = \{oprnd_{il} \mid oprnd_{il} \in OPRND, l = \overline{1, L}\}$ – мультимножество операндов i -го оператора, порождаемое множеством операндов программы $OPRND$; $L = |OPRND_i|$ – величина, характеризующая количество операндов i -го оператора.

Различные варианты структуры оператора программы, используемые для внесения ДЭС, описываются на основе выражения (6):

$stmt_i = (OPR_i^A, opr_i^П, \emptyset, OPRND_i)$ – оператор, содержащий арифметические операции и операцию присваивания;

$stmt_i = (\emptyset, opr_i^П, \emptyset, OPRND_i)$ – оператор, содержащий операцию присваивания;

$stmt_i = (\emptyset, \emptyset, opr_i^C, OPRND_i)$ – оператор, содержащий операцию сравнения.

Характеристиками ИК программы, оказывающими влияние на эффективность поиска ДЭС, являются частоты появления операндов, имеющих одинаковые семантики. Очевидно, что чем больше переменных одной семантики в программе, тем выше должна быть вероятность их появления в качестве искажающего воздействия. Реализация данной закономерности осуществляется на мультимножестве, состоящем из Q вхождений операндов в программу и порождаемом множеством уникальных операндов:

$$OPRND_{BX} = \{oprnd_q \mid oprnd_q \in OPRND, q = \overline{1, Q}\}. \quad (7)$$

Для выполнения выбора элемента set из множества SET по закону равномерной плотности распределения используется функция $rnd : SET \rightarrow set$. Реализация функции следующая:

$$rnd(SET) = set, \text{ при } P_{\text{выб}}(set) = (|SET|)^{-1}. \quad (8)$$

Применяя функцию (8) к множеству (7), получаем элемент $oprnd$ с учетом частоты появления операндов данной семантики в программе.

Процедура внесения ДЭС в программу рассматривается в рамках следующих допущений:

- внесение ДЭС осуществляется для каждого оператора программы только единожды с целью исключения компенсации дефектов;
- внесение ДЭС производится для любого одного элемента оператора (операции или операнда) с одинаковой вероятностью;
- внесение ДЭС выполняется безотносительно к порядку выполнения операций с операндами.

Порядок выполнения процедур методики оценки количества необнаруженных ДЭС программы с требуемой степенью доверия при верификации ПО представлен на рисунке.

Входными данными для методики являются: ИК программа (sw); количество «собственных» ДЭС, обнаруженных при верификации ($N_{\text{обн}}$), доверительная вероятность требуемая ($\beta_{\text{ТРЕБ}}$), доверительный интервал требуемый ($I_{\beta}^{\text{ТРЕБ}}$), размер начальной выборки (K).

Процедура 1 – получение статистики.

Данная процедура разбивается на три шага: внесение ДЭС в программу, поиск ДЭС и возврат программы в исходное состояние.

Первый шаг начинается с внесения ДЭС в оператор программы $stmt_i$. Для чего выполняется поиск точки преднамеренного внесения

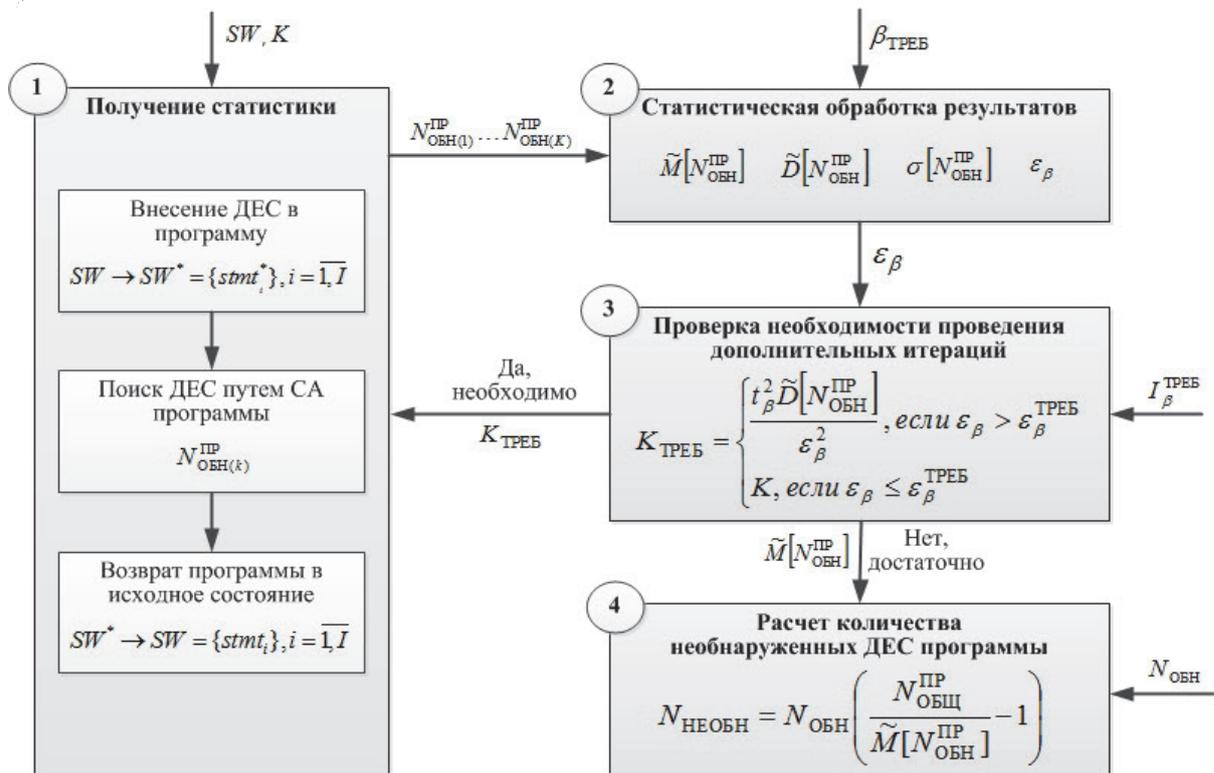


Рис. 1

дефекта pnt_i , которая выбирается из множества возможных точек для данного оператора

$$PNT_i = OPR_i^A \cup opr_i^B \cup opr_i^C \cup OPRND_i : \\ pnt_i = rnd(PNT_i).$$

Далее в зависимости от принадлежности pnt_i к одному из множеств

$$(OPR_A, OPR_B, OPR_C, OPRND_{BX})$$

выбирается один из элементов соответствующего множества, за исключением pnt_i , и используется в качестве дефекта: $def_i = rnd(SET \setminus pnt_i)$.

В результате вместо исходного оператора программы $stmt_i$ имеется $stmt_i^*$, у которого в одном из элементов описывающего его кортежа в точке pnt_i существует дефект def_i : $stmt_i \rightarrow stmt_i^*$. Выполнив внесение ДЕС для каждого оператора, получаем программу, в каждом операторе которой имеется дефект операции или операнда, распределённый равномерно:

$$SW \rightarrow SW^* = \{stmt_i^*, i = \overline{1, I}\}.$$

На втором шаге производится обнаружение ДЕС с помощью методики СА для их поиска $N_{OBN}^{IP(k)}$.

Третий шаг заключается в возвращении программы в исходное состояние

$$SW^* \rightarrow SW = \{stmt_i, i = \overline{1, I}\}.$$

Шаги процедуры 1 выполняются K раз согласно заданному размеру начальной выборки.

Процедура 2 – статистическая обработка результатов.

Выполняется расчет следующих статистических характеристик [8]:

$$\tilde{M}[N_{OBN}^{IP}] = K^{-1} \sum_{k=1}^K N_{OBN}^{IP(k)} - \text{оценка МОЖ}$$

количества обнаруженных дефектов в серии из K итераций внесения дефектов;

$$\tilde{D}[N_{OBN}^{IP}] = (K-1)^{-1} \sum_{k=1}^K (N_{OBN}^{IP(k)} - \tilde{M}[N_{OBN}^{IP}])^2$$

– оценка дисперсии количества обнаруженных дефектов в серии из K итераций внесения дефектов;

$$\sigma[N_{OBN}^{IP}] = K^{-1} \sqrt{\tilde{D}[N_{OBN}^{IP}]} - \text{среднее ква-}$$

дратическое отклонение оценки МОЖ количества обнаруженных дефектов в серии из K итераций внесения дефектов.

При допущении о нормальном распределении N_{OBN}^{IP} ($K \geq 20 \dots 30$) по таблице из [8] определяется значение величины t_β , соответствующее требуемому значению доверительной вероятности $\beta_{ТРЕБ}$.

Рассчитывается величина половины длины доверительного интервала для МОЖ количества

обнаруженных дефектов в серии из K итераций внесения дефектов: $\varepsilon_\beta = t_\beta \sigma [N_{\text{ОБН}}^{\text{ПР}}]$.

Процедура 3 – проверка необходимости проведения дополнительных итераций внесения дефектов.

Осуществляется сравнение значения ε_β с требуемым значением $\varepsilon_\beta^{\text{ТРЕБ}} = I_\beta^{\text{ТРЕБ}} / 2$.

Если $\varepsilon_\beta \leq \varepsilon_\beta^{\text{ТРЕБ}}$, то рассчитанная оценка МОЖ количества обнаруженных «преднамеренных» дефектов считается совместной с данными, полученными в серии из K итераций внесения дефектов, согласно размеру начальной выборки.

Если $\varepsilon_\beta > \varepsilon_\beta^{\text{ТРЕБ}}$, то получен доверительный интервал для оценки МОЖ количества обнаруженных «преднамеренных» дефектов больше требуемого, что говорит о недостаточной репрезентативности рассматриваемой статистики дефектов и необходимости проведения дополнительных итераций внесения дефектов.

Для получения выборки требуемого размера $K_{\text{ТРЕБ}}$ используется система соотношений:

$$K_{\text{ТРЕБ}} = \begin{cases} t_\beta^2 (\varepsilon_\beta^2)^{-1} \tilde{D} [N_{\text{ОБН}}^{\text{ПР}}], & \text{если } \varepsilon_\beta > \varepsilon_\beta^{\text{ТРЕБ}} \\ K, & \text{если } \varepsilon_\beta \leq \varepsilon_\beta^{\text{ТРЕБ}} \end{cases}.$$

Количество дополнительных итераций внесения дефектов рассчитывается по следующему соотношению: $K_{\text{ДОП}} = K_{\text{ТРЕБ}} - K$.

Если $K_{\text{ДОП}} > 0$, то необходимо вернуться к процедуре 1. Выполняется $K_{\text{ДОП}}$ итераций внесения дефектов и обрабатывается полученная статистика величиной $K_{\text{ТРЕБ}}$.

Процедура 4 – расчет количества необнаруженных ДЕС программы с требуемой степенью доверия.

Используя полученную оценку МОЖ количества обнаруженных «преднамеренных» дефектов для выборки требуемого размера $K_{\text{ТРЕБ}}$, при условии, что $N_{\text{ОБЩ}}^{\text{ПР}} = |SW|$, рассчитывается количество необнаруженных ДЕС программы по соотношению (4).

Представленный методический подход к оценке количества необнаруженных ДЕС программы с требуемой степенью доверия при верификации ПО БЦВС КА разработан с целью приведения в соответствие нормативным документам создаваемого метода верификации ПО и позволяет выполнять доказательство отсутствия дефектов рассматриваемого типа после выполнения их поиска путем СА с требуемой степенью доверия в рамках испытаний ИК программ.

Список литературы

1. Липаев В. В. Техничко-экономическое обоснование проектов сложных программных средств. М. : СИНТЕГ, 2004. 284 с.
2. Мякишев Д. В. Принципы и методы создания надежного программного обеспечения АСУТП : метод. пособие. М. : Инфра – Инженерия, 2017. 114 с.
3. Кулямин В. В. Методы верификации программного обеспечения. М. : Институт системного программирования РАН, 2008. 117 с.
4. Карпов Ю. Г. Model checking. Верификация параллельных и распределённых программных систем. СПб. : БХВ-Петербург, 2010. 560 с. : ил.
5. Кларк Э. М., Грамберг О., Пелед Д. Верификация моделей программ : Model checking : пер. с англ. ; под ред. Р. Смолянского. М. : МЦНМО, 2002. 416 с. : ил.
6. ГОСТ Р 51904-2002. Программное обеспечение встроенных систем. Общие требования к разработке и документированию. М. : Госстандарт России, 2002. 94 с.
7. КТ-178. Квалификационные требования. Требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем сертификации авиационной техники. М. : Межгосударственный авиационный комитет, Авиационный регистр, 1996. 37 с.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учебник для студ. вузов. 9-е изд., стер. М. : Издательский центр «Академия», 2003. 576 с.
9. Гуров Д. В., Гуров В. В., Иванов М. А. Использование моделей надежности программного обеспечения для оценки защищенности программного комплекса // Безопасность информационных технологий. 2012. № 1. С. 88–91.
10. Черников Б. В., Поклонов Б. Е. Оценка качества программного обеспечения: практикум : учеб. пособие ; под ред. Б. В. Черникова. М. : «ФОРУМ» ИНФРА-М, 2012. 400 с. : ил. (Высшее образование).
11. Петровский А. Б. Пространства множеств и мультимножеств. М. : Едиториал УРСС, 2003. 248 с.

История статьи

Поступила в редакцию 6 марта 2018 г.

Принята к публикации 5 апреля 2018 г.

METHODICAL APPROACH FOR EVALUATION OF THE NUMBER UNDETECTED NATURAL SEMANTICS DEFECTS WITH THE REQUIRED DEGREE OF CONFIDENCE IN THE VERIFICATION OF SPACE VEHICLES ON-BOARD COMPUTER SYSTEMS SOFTWARE

D. S. Viktorov, E. N. Zhidkov, R. E. Zhidkov

Military Aerospace Defense Academy, Tver, Russian Federation

The approach for evaluation the number of undetected natural semantics defects in the program is developed and presented in the framework of creating software verification method for space vehicles on-board computer systems. Method is created to reduce the total cost of verification that satisfied the tasks of the verification process. Detection of this defects type is performed within the static analysis of the program source code. It is based on monitoring compliance with the principle of dimensional uniformity of expressions. The estimation of the defects number is performed according by the Mills reliability model, which belongs to the statistical models class with deliberate injection of defects into the software. The defects injection procedure is demonstrated on the representation of the program via sets, taking into account the specific natural semantics defects characteristic of the source code, which affect the adequacy of the procedure performed. The required evaluation degree of confidence of undetected defects is achieved by calculating the number of detectable injected defects expected value. This statistic characteristic received from the selection of the required size, which depends on the statistical characteristics obtained from the initial selection and the given values of the confidence probability and the confidence interval. The obtained approach can be used in research of the programs source code within the process of software verification for space vehicles on-board computer systems, since it is based on well-known mathematical relationships and meets the requirements of normative documents in this field.

Keywords: software, space vehicle, on-board computer system, verification, static analysis, defects injections, natural semantics.

References

1. Lipaev V. V. *Tehniko-jekonomicheskoe obosnovanie proektov slozhnyh programmnyh sredstv* [Feasibility study of complex software projects]. Moscow, SINTEG Publ., 2004. 284 p.
2. Mjakishev D. V. *Principy i metody sozdaniya nadezhnogo programmnoho obespechenija ASUTP* [Principles and methods of creating reliable software for the automated process control system]. Moscow, Infra – Inzhenerija Publ., 2017. 114 p.
3. Kuljainin V. V. *Metody verifikacii programmnoho obespechenija* [Methods of software verification]. Moscow, Institut sistemnogo programmirovaniya RAN Publ., 2008. 117 p.
4. Karpov U. G. *Model checking. Verifikacija parallel'nyh i raspredelennyh programmnyh sistem* [Model checking. Verification of parallel and distributed software systems]. Saint Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2010. 560 p.
5. Clark E. M. *Verifikacija modelei programm* [Model checking verification]. Moscow, MCNMO, 2002. 416 p.
6. State standard 51904-2002. Software of embedded systems. General requirements for development and documentation. Moscow, Gosstandart Rossii Publ., 2002. 94 p.
7. Standard KT-178. Qualification requirements. Requirements for software on-board equipment and aviation equipment certification systems. Moscow, Mezhgosudarstvennyj aviacionnyj komitet, Aviacionnyj registr Publ., 1996. 37 p.
8. Ventcel' E. S. *Teorija verojatnostej* [Probability theory]. Moscow, Izdatel'skij centr "Akademija" Publ., 2003. 576 p.
9. Gurov D. V., Gurov V. V., Ivanov M. A. *Ispol'zovanie modelej nadezhnosti programmnoho obespecheniya dlya ocenki zashchishchennosti programmnoho kompleksa* [Use of software reliability models to assess the security of the software package]. *Bezopasnost' informacionnyh tehnologij* [Information Security], 2012, no. 1, pp. 88–91. (In Russian)
10. Chernikov B. V., Poklonov B. V. *Ocenka kachestva programmnoho obespechenija* [Software Quality Assessment]. Moscow, «FORUM» INFRA-M Publ., 2012. 400 p.
11. Petrovskij A.B. *Prostranstva mnozhestv i mul'timnozhestv* [Spaces of sets and multisets]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003. 248 p.

Article history

Received 6 March 2018

Accepted 5 April 2018

ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ О ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИХ ГРУППОВЫХ ОБЪЕКТАХ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

С. А. Семенов, В. С. Семенов, В. В. Поддубский, Е. Н. Жидков

*Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова,
г. Тверь, Российская Федерация*

В условиях наличия большого числа объектов в зоне ответственности информационной системы возможно возникновение информационной перегрузки. В работе на основе формализации процесса отображения обстановки в зоне ответственности информационной системы рассмотрен подход и на его основе предложены метод и алгоритм агрегирования данных о воздушно-космических групповых объектах в информационной системе с ограниченными ресурсами. Показано, что для анализа процессов, происходящих при отображении отношений между объектами в группе в информационной системе в условиях временных и ресурсных ограничений, целесообразно использовать аппарат теории нечетких множеств. Приводится структура разработанного метода, требуемые для его реализации вычислительные ресурсы и предлагается усеченный вариант алгоритма, реализующего предложенный метод, а также приводятся результаты оценки качества функционирования разработанного усеченного алгоритма. Расчёты показывают, что разработанный алгоритм обеспечивает существенное снижение потерь информации и повышает информационные возможности системы в условиях перегрузки в несколько раз. Основная цель работы – предложить способ минимизации потерь информации реального масштаба времени в условиях информационной перегрузки сложной иерархической системы с ограниченными возможностями на основе агрегирования данных об объектах, действующих компактными группами.

Ключевые слова: агрегирование, информационная система с ограниченными возможностями, воздушно-космические групповые объекты, отображение данных.

Пусть имеется сложная иерархическая информационная система S , осуществляющая отображение данных о воздушно-космических групповых объектах, действующих в зоне ее ответственности. Система включает технические и эргатические элементы. Совокупность технических элементов представлена измерительными элементами, каналами обмена информацией и средствами ее обработки:

$$S = \bigcup_N S_n,$$

где $n = [1, N]$ – n -й элемент системы.

Пусть X – универсальное множество объектов, действующих в границах зоны ответственности информационной системы. Элементом этого множества является отдельный объект $x \in X$, который характеризуется векторами параметров v , определяющих его положение в пространстве

параметров на момент времени $t = [0, T]$ и признаков p , т. е. $x = x_i(v, p, t)$.

Тогда

$$X = \bigcup_I x_i(v, p, t),$$

где I – количество объектов, находящихся в границах зоны ответственности информационной системы, или мощность универсального множества X , $\text{card } X = I$.

Осуществляя отображение обстановки в зоне ответственности, система воздействует на нее оператором R_S , который в соответствии с [1] представляет собой системный оператор

$$R_S \supseteq R^s \times S,$$

где $R^s = \left\{ \left\langle a_n^s, p_{nq}^{sTp}, p_{nq}^s \right\rangle \in A^s \times P^{sTp} \times P^s : \left\{ g_{nq}^{sTp} = 1, \chi_{nq}^s = 1 \right\}, \forall n = [1, N], q \in Q \right\}$ – оператор отображения обстановки на s_n -м элементе системы.

Элементами кортежей, входящих во множество R^s , являются:

- алгоритм $a_n^s \in A^s$, принадлежащий подмножеству реализованных на элементе системы алгоритмов;
- потребные для его реализации вычислительные ресурсы по типам ресурсов p_{nq}^{sTP} ;
- наличные ресурсы по типам ресурсов p_{nq}^s .

Результатом воздействия оператора является множество X_R , описывающее информацию об обстановке в зоне ответственности и представляющее собой отображение прообраза множества X :

$$\begin{aligned} X_R &= R_S(\{X\}) = R_S(\{\bigcup_I x_i(v, p, t)\}) = \\ &= \bigcup_k x_{Rk}(v_R, p_R, t_R), x_{Rk} \in X_R, I \rightarrow K, X \Leftrightarrow X_R, \\ &x_i(v, p, t) \rightarrow x_{Rk}(v_R, p_R, t_R), \end{aligned}$$

где $\text{card } X_R = K$ – мощность подмножества отображенных системой объектов, т.е. множество отметок от объектов, информация о которых отображается в системе сбора и обработки; $k = [1, K]$ – номер объекта; $x_{Rk}(v_R, p_R, t_R) \in X_R$ – информация о k -м объекте, отображаемая в системе сбора и обработки.

В связи с тем, что элементы информационной системы обладают вполне определенными наличными ресурсами P^s и характеризуются соответствующей производительностью N'_s , в определенных условиях на различных уровнях системы возникает ситуация информационной перегрузки, когда количество объектов, информация о которых имеется на входах соответствующих элементов системы и потребителей информации превышает их возможности по обработке, т.е. $\text{card } X_R = K \geq N'_s$.

В условиях информационной перегрузки в системе происходят потери информации, т.е. данные о части объектов не поступают в систему сбора и обработки или определенному потребителю, увеличиваются задержки информации, она «стареет», ухудшается ее качество и соответствующим образом снижается эффективность информационной системы.

Цель исследования – предложить подход к минимизации потерь информации реального масштаба времени в условиях информационной перегрузки сложной иерархической системы с ограниченными возможностями на основе агрегирования данных об объектах, действующих компактными группами.

Пусть в зоне ответственности системы находится X множество объектов, действующих J компактными группами и решающих общую задачу Z . Общую задачу можно декомпозировать на совокупность частных задач, каждая из которых z_j решается группой или одиночным объектом:

$$Z = \bigcup_J z_j, \quad j = [1, J].$$

Множество объектов $X = \{x_i\}, x_i \in X$ распределяется по J группам в соответствии с частными задачами:

$$x_{ij} \in X_j, \quad X_j \subseteq X, \quad X \Leftrightarrow Z, \quad X_j \Leftrightarrow z_j, \quad z_j \in Z.$$

Можно утверждать, что отдельные объекты в группе находятся между собой в определенном отношении, которое характеризует степень участия каждого из составляющих группу в решении общей ее задачи и взаимное отношение при ее решении между составляющими группу.

При выполнении задач множество объектов подвергается воздействию совокупности факторов Q (предсказуемых и непредсказуемых), изменяющих исходное их распределение по задачам и группам:

$$X \times Q = X_Q, \quad \{X_i\} \times \{q_i\} = X_Q, \quad X_Q \subseteq X, \quad q = [1, Q].$$

Пусть $\varphi: X_Q \rightarrow X_{R_s}$ – заданное отображение, получаемое при воздействии оператора обработки R_s , а X_R – подмножество отметок от объектов, являющееся результатом обработки, т.е. обнаружения и оценки их кинематических параметров и признаков.

Тогда

$$\left\{ \bigcup x_{kjR_s} \right\} \rightarrow \bigcup_i z_{jR_s}, \quad k = [1, K], \quad j = [1, J].$$

$X_R \rightarrow Z_R \subset Z$, т.е.

Рассмотрим, как отношение между объектами в группе отображается информационной системой.

Процесс отображения данных об обстановке связан с актуализацией целого ряда неопределенностей, имеющих различную природу. Процесс и результат отображения базируются на применении формальных и логических методов, специальных технических «языков», в которых используются системы цифровых кодов, бинарная логика, соответствующий алфавит символов и т.п., описывающих в информационной системе внешние воздействия. Этим языкам свойственна так называемая «омонимическая» или семантическая неопределенность. Поэтому одной из составляющих неопределенности является неопределенность, носящая лингвистический характер. Отображение отношения между объектами в группе и представление их в системе осуществляются с использованием «технического языка». В этом случае лингвистическая неопределенность доминирует в «свертке» неопределенностей, влияющих на результат отображения. В условиях временных ресурсных ограничений, отсутствия возможности точного определения решаемой группой задачи и ограничений, свойственных собственно использу-

емым «языкам», их «алфавиту», неопределенность такого рода носит характер нечеткости. Поэтому для анализа процессов, происходящих при отображении отношений между объектами в группе в информационной системе в условиях временных и ресурсных ограничений, целесообразно использовать аппарат теории нечетких множеств.

Пусть X_j – некоторое подмножество (группа объектов) множества X , находящееся в определенном отношении, которое характеризуется функцией принадлежности $\mu(x)$. В соответствии с принципом обобщения [2, 3, 4] образ X_j при отображении φ определяется как нечеткое подмножество множества X_{jRs} , представляющее собой совокупность пар вида

$$X_{jRs} = \left\{ \left(x_{Rs}, \mu_j(x_{Rs}) \right) \right\},$$

$$(x_{Rs}, \mu_j(x_{Rs})) = (\varphi(x), \mu(x)), x \in X,$$

где $\mu_j: X_{jRs} \rightarrow [0, 1]$ – функция принадлежности образа.

Функцию принадлежности μ_k можно записать в виде

$$\mu_k(x_R) = \sup_{x \in \varphi^{-1}(x_R)} \mu(x), x_R \in X_{kR},$$

где множество $\varphi^{-1}(x_R)$ для любого фиксированного $x_R \in X_R$ имеет вид

$$\varphi^{-1}(x_R) = \{x \in X / \varphi(x) = x_R\},$$

т. е. представляет собой множество всех элементов $x \in X$, образом каждого из которых при отображении φ является элемент x_R .

В случае нечеткого отображения

$$\varphi: X \overset{n}{\rightarrow} X_R.$$

Описывается нечеткое отображение функций вида

$$\mu_R: X \times X_R \rightarrow [0, 1],$$

нечетким отношением R , причем значение $\mu_R(x, x_R)$ определяет отношение отображения объекта x .

Функция $\mu_R(x, x_R)$ есть функция принадлежности нечеткого множества отображения в подмножество X_R , представляющего собой нечеткий образ объекта x (т.е. нечеткое подмножество) при данном отображении.

То есть в ходе отображения информации в системе могут возникать ошибки, приводящие к дублированию, размножению данных и появлению ложной информации. Это, в свою очередь, также создает предпосылки для информационной перегрузки и увеличению потерь информации в системе.

Несмотря на возникающие при отображении ошибки, необходимо, чтобы отображение

было адекватным или влияние ошибок и потерь информации при отображении в условиях временных и ресурсных ограничений было несущественным, т. е.

$$Z_{Rs} \Leftrightarrow Z.$$

По множеству отображаемых реальных и ложных отметок от объектов на различных уровнях информационной системы осуществляется оценка обстановки, определение совокупности решаемых объектами и их группами задач $\bigcup_{z_{iRs}} \subset Z_{Rs}$, формирование и выдача соответствующей информации потребителю для реализации своевременных и точных воздействий по объектам. Причем от адекватности, т. е. от полноты, точности и достоверности отображения, зависит степень достижения цели функционирования системы и надсистем, ею обеспечиваемых, или их качество и эффективность.

Если K – показатель качества или адекватности отображения обстановки в зоне ответственности системы, то в соответствии с целевым предназначением информационной системы показатель эффективности системы можно представить следующим образом:

$$\mathfrak{E} = f(K).$$

В условиях временных и ресурсных ограничений из-за информационной перегрузки и возникающих ошибок, потерь информации при отображении эффективность системы снижается.

Потери информации в системе сбора и обработки можно определить следующим образом: $a = (1 - K)$.

Основными направлениями, обеспечивающими сохранение требуемой эффективности системы в условиях информационной перегрузки и возникающих при этом потерь информации, являются:

- повышение информационных возможностей системы за счет увеличения вычислительных возможностей технических средств;
- повышение информационных возможностей системы за счет реализации соответствующих алгоритмов обработки информации, обеспечивающих эффективное функционирование системы в условиях информационной перегрузки.

Наиболее привлекательным с экономической точки зрения [5, 6] является второе направление, в рамках которого один из возможных путей, снижающих остроту проблемы перегрузки, состоит в разработке и реализации в системе методов и алгоритмов обработки агрегирования, учитывающих групповые действия объектов при удовлетворении требований потребителей информации к ее качеству.

В формализованном виде это означает, что если множество X можно разбить на J непересекающихся подмножеств:

$$X = \bigcup_j X_j \cap X_j = \emptyset, \quad X_j = \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{lj}\},$$

то представление каждого подмножества $X_j \subset X$ одним показателем

$$x_{lj} = \varphi_j(X_j), \quad (j = 1, J)$$

и есть агрегирование информации.

Таким образом, для повышения эффективности системы в условиях информационной перегрузки множество методов агрегирования и обработки агрегированной информации A_Θ , реализуемых в системе, должно обеспечить минимизацию потерь информации при удовлетворении требований к методу и потребителей информации к ее качеству:

$$A^0 = \underset{A \in A_\Theta}{\text{Arg min}} \alpha(A) = \{A \in A_\Theta \mid \alpha(A) = \min_{A \in A_\Theta} \alpha(A')\},$$

$$a(A) = F(A, \sigma_S, \Delta_S, N_1, X_R, \Theta),$$

где Θ – множество требований к алгоритмам обработки информации; A_Θ – множество методов, удовлетворяющих требованиям потребителей информации; $a(A) = 1 - K^A$ – потери информации в системе при выбранном множестве методов и алгоритмов агрегирования A ; σ_S, Δ_S, N_1 – точность, разрешающая способность и пропускная способность системы сбора и обработки информации о воздушной обстановке.

Для агрегирования информации при обеспечении минимизации ее потерь необходимо выделить некий агрегированный признак, характеризующий группы отметок – отображений объектов. Таким признаком для отдельной группы отметок может быть признак, характеризующий боевой порядок или взаимное расположение отметок в пространстве. Для его выделения необходимо формально описать боевой порядок группы отметок. Это можно сделать путем составления отношения, описывающего связи между объектами, характеризующие общность решаемых задач, в данном случае связи между отметками в группе.

Отношение является самой общей формой описания связей между объектами. Отношением, построенным на множестве объектов и групп объектов, можно характеризовать их распределение в пространстве параметров и признаков.

Обозначим это отношение символом R_2 и рассмотрим его на множестве X_R .

Отношением R_2 на множестве отображенных отметок от объектов X_R представляет собой подмножество декартова произведения $X_R \times X_R$. Задать отношение на множестве X_R означает указать все пары элементов $x, y \in X_R$, такие, что x и y связаны отношением R_2 , т. е. $xR_2 y$.

Отношение, характеризующее группы отметок от объектов в рамках подхода формализации нечеткости, базирующегося на обобщении понятия элемента подмножеству группы объектов, можно представить в виде нечеткого отношения сходства

$$R = \{(x, y) \mid (x, y) \in X \times X, \mu(x, y) = [0, 1]\},$$

$$x = x(v_n, t_n, p_n), y = y(v_n, t_n, p_n), x, y \in X,$$

где $n = [1, N]$ – номер объекта.

В соответствии с требованиями потребителей представление определенной группы отметок от объектов должно осуществляться в виде конечного счетного множества. Поэтому удобно воспользоваться понятием множества уровня на нечетком отношении принадлежности (второй подход к формализации нечеткости):

$$R_\beta = \{(x, y) \mid (x, y) \in X \times X, \mu(x, y) \geq \beta\},$$

$$\beta = [0, 1],$$

где β – уровень значимости множества R_β на нечетком отношении сходства группы отметок.

Допустим, что агрегирование данных проведено без потерь. В сложной иерархической информационной системе осуществляется обработка этих данных на каждом из уровней иерархии. В ходе обработки возникают ошибки и в результате соответствующие потери информации. Определим требования к методу агрегирования с точки зрения минимизации потерь информации в системе при преобразовании и обработке агрегированных данных, т. е. требования к методу, обеспечивающему минимизацию мощности множества ошибок O , возникающих при обработке агрегированной информации.

В общем случае обработка информации в системе состоит в объединении данных, поступающих в различные моменты времени. Пусть в m_1 и $m_1 + 1$ моменты в систему обработки поступает информация о j -м агрегированном групповом объекте, которая представлена в виде пространственно протяженных объектов и описывается подмножествами X_{RjAm_1} и X_{RjAm_1+1} (рис. 1).

В результате обработки формируется объединенная информация о j -м пространственно протяженном групповом воздушно-космическом объекте X_{RAj}^* :

$$X_{RAj}^* = \bigcup_{j,m} \{X_{RAjm}\} = \{\bar{X}_{RAjm1} \cap X_{RAjm1+1}\} \cup \{X_{RAjm1} \cap \bar{X}_{RAjm1+1}\} \cup \{X_{RAjm1} \cap X_{RAjm1+1}\}.$$

Из выражения видно, что подмножество ошибки, возникающей при объединении информации о k -м агрегированном воздушно-космическом объекте, поступающей в различные моменты времени, является подмножеством пересечения

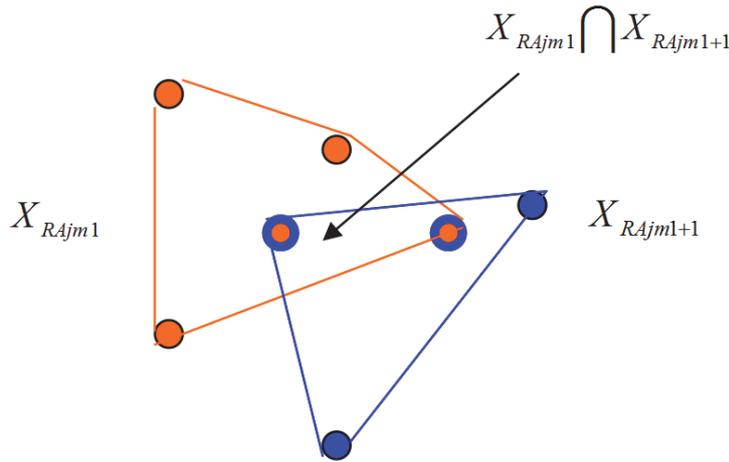


Рис. 1

множеств агрегированных данных о воздушно-космических объектах:

$$O_j \subseteq \left\{ X_{RAjm1} \cap X_{RAjm1+1} \right\} = \bigcap_m X_{RAjm},$$

$$m = [m_1, m_1 + 1].$$

Пусть в систему обработки на m -м периоде обработки поступают агрегированные данные по j -му групповому объекту. Для всех M_1 сообщений о j -м объекте на m -м периоде обработки

$$O_m \subseteq \bigcap_{M_1} X_{RAjm1}, m_1 = [0, M_1].$$

Очевидно, что когда пересечение множеств является пустым – ошибка минимальна, т. е.

$$\bigcap_{M_1} X_{RAjm1} \supseteq O_m = \emptyset \rightarrow \text{card } O_m = 0.$$

Допустим, что в разные моменты времени на m -м периоде обработки в систему обработки поступают агрегированные данные о $J \subseteq N_1$ воздушно-космическом объекте. Тогда

$$\bigcap_J \left\{ \bigcap_{M_1} X_{RAkm1} \right\} = \bigcap_{M_1} \left\{ \bigcap_J X_{RAjm1} \right\}.$$

Если

$$\bigcap_{M_1} \left\{ \bigcap_J X_{RAjm1} \right\} = \emptyset, O = \emptyset \rightarrow \text{card } O = 0.$$

То есть ошибки при объединении отсутствуют, когда множество пересечения агрегированных подмножеств групп отметок является пустым.

Пусть X – универсальное множество альтернатив, т.е. универсальная совокупность всевозможных вариантов агрегирования. Нечеткой целью в X является нечеткое подмножество, которое будем обозначать X_j^B , т.е. нечеткое подмножество близких по координатам отметок.

Опишем нечеткую цель функцией принадлежности $\mu_{Bj}: X \rightarrow [0, 1]$. Ограничения определяют множество допустимых альтернатив и также описываются подмножествами множества X .

В качестве подмножеств ограничений определим подмножество ограничений по скорости передвижения объектов и подмножество непротиворечивых с точки зрения объединения отметок в группы признаков.

Подмножество ограничений по скорости является нечетким и описывается функцией принадлежности $\mu_v: X \rightarrow [0, 1]$.

Подмножество непротиворечивых признаков является четким и описывается функцией принадлежности, принимающей только два значения: $\mu_p: X \rightarrow 0$, если признаки противоречивы, и $\mu_p: X \rightarrow 1$, если признаки непротиворечивы с точки зрения объединения объектов в одну группу.

Множество допустимых альтернатив определяется с использованием четкого ограничения по непротиворечивости признаков и ограничения по скорости. На нем строится соответствующее отношение сходства

$$R_M^B = \{(x_B, y_B) / (x_B, y_B) \in X_B \times X_B,$$

$$\mu_B(x_B, y_B) = [0, 1]\}.$$

С точки зрения объединения отметок от объектов в одну группу известную совокупность признаков можно разделить на следующие классы:

- противоречивые признаки;
- непротиворечивые признаки;
- признаки, запрещающие объединение объекта в группу.

С учетом проведенной классификации выражение для расчета функции принадлежности четкого подмножества ограничений по признаковой информации выглядит следующим образом:

$$\mu_P(x_B, y_B) = \min \{ \mu_3(x_B), \mu_3(y_B), \mu_H(x_B, y_B) \},$$

где $\mu_3(x_B)$, $\mu_3(y_B)$ – функция принадлежности четкого ограничения по признакам, запрещающим объединение данных об объектах x_B , y_B в группу соответственно; $\mu_H(x_B, y_B)$ – функция принадлежности четкого ограничения по непротиворечивости остальных признаков.

С учетом признаковой информации подмножество допустимых альтернатив выглядит следующим образом:

$$\mu_B(x_B, y_B) = \min\{\mu_{Bk}(x_B, y_B), \mu_{Pv}(x_B, y_B)\}.$$

При этом на множестве всех отметок от воздушно-космического объекта проведено формирование групп отметок по координатам и признаковой информации, т. е. выделены классы сходства отметок. Для окончательной классификации, т. е. для выделения стабильных во времени групп отметок, необходимо учесть ограничение по скорости.

Прежде чем это осуществить, необходимо представить агрегированную информацию в виде подмножества непересекающихся классов и определить эталон для каждого. Для чего преобразуем построенное отношение сходства в нечеткое отношение строгого предпочтения и выделим на нем четко недоминируемые альтернативы:

$$\mu_B^H(x_B) = 1 - \sup_{x_B, y_B \in X_B} [\mu_B(y_B, x_B) - \mu_B(x_B, y_B)].$$

Уточнение полученной классификации проведем с учетом нечеткого ограничения по скорости:

$$\mu_B(x_B, y_B) = \min\{\mu_B^H(x_B, y_B), \mu_V(x_B, y_B)\}.$$

Таким образом, метод агрегирования информации о воздушно-космической обстановке, обеспечивающий минимизацию ее потерь в условиях информационной перегрузки, при удовлетворении требований потребителей информации к ее качеству состоит:

- в формировании нечеткого отношения сходства на множестве отметок трасс воздушно-космических объектов;
- в определении множеств нечетко определенной цели при нечетких множествах ограничений нечетких подмножеств групп;
- в преобразовании матрицы нечеткого отношения сходства с выделенными на нем подмножествами групп в нечеткое отношение строгого предпочтения и выделения на нем четко недоминируемых альтернатив;
- в уточнении сформированных групп с учетом нечеткого ограничения по скорости.

В дальнейшем в зависимости от ограничений в информационных возможностях системы (например, по производительности) и требований потребителей данные о сформированной группе объектов могут быть представлены:

- эталонами – наиболее связанными в пространстве параметров и признаков объектами с остальными составляющими группу и косвенно характеризующими боевой порядок и обобщенными данными об остальных составляющих группу;
- эталонами и данными о составляющих группу в относительной системе координат группы с началом отсчета, совмещенным с координатами эталона без изменения масштаба относительной системы координат или с измененным масштабом.

Одним из основных требований к алгоритму с точки зрения реализации является требование, связанное с минимизацией потребных для реализации алгоритма вычислительных ресурсов и функционирования в реальном масштабе времени, что позволяет минимизировать задержки информации при обработке и соответственно ее потери за счет ухудшения качества.

Проведенные предварительные оценки показали, что алгоритм, полностью реализующий разработанный метод, может потребовать вычислительный комплекс с быстродействием, превышающим 10 млрд операций в секунду. Средний современный процессор имеет производительность на уровне 1–3 млрд операций в секунду, поэтому очевидна проблематичность реализации полного алгоритма. В связи с этим при разработке алгоритма потребуется рационализация, «усечение», упрощение метода, что является оправданным, особенно если алгоритм должен обеспечить снижение влияния неопределенности в условиях перегрузки системы.

Упрощение метода осуществлялось путем замены ресурсоемкой операции транзитивного замыкания на совокупность близких по результату операций, обеспечивающих хорошую сходимость и приемлемую точность, но являющейся значительно более экономичной [7, 8].

Проведенные оценки показали, что реализация подобных операций потребует значительно меньше ресурсов по сравнению с существующими в системе классическими алгоритмами и на несколько порядков меньше, чем операция транзитивного замыкания.

Результаты оценки качества функционирования разработанного усеченного алгоритма приведены на рис. 2. В ходе математического эксперимента оценивались информационные потери a и агрегированность (сжатость) информации. Агрегированность информации оценивалась двумя показателями – вероятностью (или частотой) правильного агрегирования $P_{пр}$ и коэффициентом сжатия информации $K_{сж}$.

Результаты оценки разработанного алгоритма показывают, что [9, 10]:

- алгоритм обладает высокой устойчивостью к влиянию ошибок оценки координат объектов

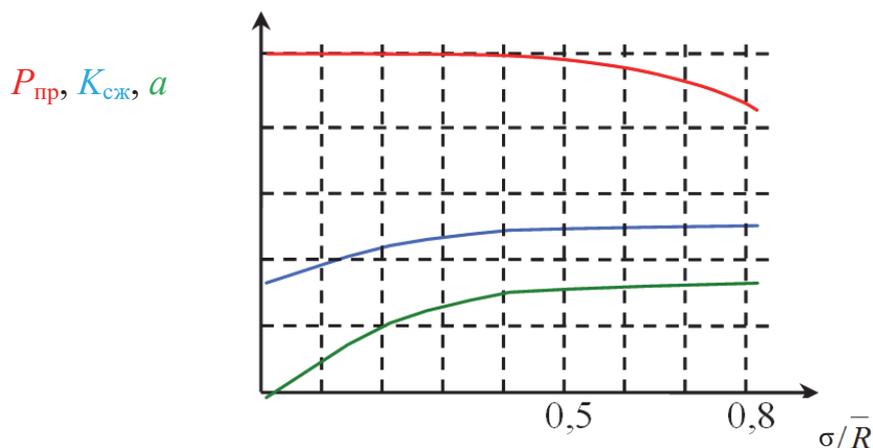


Рис. 2. Результаты работы усеченного алгоритма

и наличие ложной информации. Качество его функционирования снижается, когда ошибки становятся соизмеримыми с расстояниями между группами объектов. Ложная информация при обработке не возникает из-за формирования непересекающихся групп, а возникшая до агрегирования не участвует в формировании траекторий движения объектов, а влияет только на обобщенные характеристики агрегированных объектов, не расходуя вычислительные ресурсы;

– алгоритм обеспечивает достаточно высокую вероятность правильного агрегирования и сжатие информации в количество раз, соответствующее

соотношению числа неагрегированных и агрегированных объектов.

Таким образом, предлагаемый подход и разработанный метод позволяют обеспечить обработку данных о воздушно-космических групповых объектах в информационной системе с ограниченными ресурсами. Разработанный на основе предложенного метода усеченный алгоритм агрегирования обеспечивает достаточное качество агрегирования в широком диапазоне изменения ошибок оценки координат воздушно-космических объектов и повышает возможности системы в условиях информационной перегрузки в несколько раз.

Список литературы

1. Семенов С. А., Новоселов П. В., Бреслер И. Б. Методический подход к оценке эффективности автоматизированной системы, создаваемой на основе разнородных компонентов // Журнал в журнале «Конфликтно-устойчивые радиоэлектронные системы». М. : Радиотехника, 2005. № 5.
2. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М. : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1981.
3. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / пер. с фр. В. Б. Кузьмина ; под ред. С. И. Травкина. М. : Радио и связь, 1982.
4. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М. : Мир, 1976.
5. Остапенко С. М. и др. Методы технико-экономического обоснования ЗУР : науч.-метод. пособие. М. : Воениздат, 2001.
6. Смитниекс А. Групповой полет – полет особый // Авиация и космонавтика. 1989. № 5.
7. Турбович И. Т. Об оптимальном методе опознавания образов при взаимно коррелированных признаках // Опознавание образов. М. : Наука, 1965.
8. Богданчук В. З. Оценивание и классификация параметров объектов в условиях неопределенности. Рига : Зинанте, 1987.
9. Семенов С. А., Новоселов П. В., Пильщиков Д. Е. Метод формирования траекторий групп воздушных объектов // Журнал в журнале «Конфликтно-устойчивые радиоэлектронные системы». М. : Радиотехника, 2005. № 5.
10. Кореньков В. М., Мойсеенко П. Г., Семенов С. А. Время нового подхода. Агрегирование информации – эффективный способ борьбы с информационными перегрузками // Воздушно-космическая оборона. 2006. № 3 (28).

История статьи

Поступила в редакцию 20 марта 2018 г.

Принята к публикации 5 апреля 2018 г.

THE APPROACH TO PROCESSING AEROSPASE
GROUP OBJECTS DATA INTO INFORMATION SYSTEM
WITH LIMITED CAPABILITIES

S. A. Semenov, V. S. Semenov, V. V. Poddubsky, E. N. Zhidkov

Military Aerospace Defense Academy, Tver, Russian Federation

In the presence of a large number of objects in the area of responsibility of the information system, information overload may arise. In the work on the basis of the formalization of the process of mapping the situation in the area of responsibility of the information system, an approach is considered and on its basis a method and algorithm for aggregating data on aerospace group objects in an information system with limited resources is proposed. It is shown that for the analysis of processes occurring when mapping relations between objects in a group in an information system under conditions of time and resource constraints, it is expedient to use the apparatus of the theory of fuzzy sets. The structure of the developed method is described, the computational resources required for its implementation are proposed and a truncated version of the algorithm realizing the proposed method is proposed, as well as the results of the estimation of the quality of the functioning of the developed truncated algorithm. Calculations show that the developed algorithm provides a significant reduction in information losses and increases information capabilities of the system under conditions of overload several times. The main goal of the work is to propose a way to minimize the loss of real-time information in conditions of information overload of a complex hierarchical system with limited capabilities on the basis of aggregation of data on objects operating in compact groups.

Keywords: aggregation, information system with limited capabilities, aerospace group objects, reflection of data.

References

1. Semenov S. A., Novoselov P. V., Bresler I. B. *Metodicheskiy podhod k ocenke effektivnosti avtomatizirovannoy sistemy, sozdavaemoj na osnove raznorodnykh komponentov* [A methodical approach to assessing the effectiveness of an automated system based on heterogeneous components]. Zhurnal v zhurnale «Konfliktno-ustojchivye radioelektronnyye sistemy». Moscow, Radiotekhnika Publ., no. 5, 2005. (In Russian)
2. Orlovskiy S. A. *Problemy prinjatija reshenij pri nechetkoj ishodnoj informacii* [Decision-making problems with fuzzy source information]. Moscow, Nauka. Glavred. fizmat. lit. Publ., 1981.
3. Kofman A. *Vvedenie v teoriyu nechetkih mnozhestv* [Introduction to the theory of fuzzy sets]. Moscow, Radio i sviaz Publ., 1982.
4. Zade L. A. *Ponyatiye lingvisticheskoi peremennoi I ego primenenie k prinyatiyu priblizhennih reshenii* [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions]. Moscow, Mir Publ., 1976.
5. Ostapenko S. M. *Metody tehniko-jekonomicheskogo obosnovaniya ZUR* [Methods of feasibility study of SAM]. Moscow, Voenizdat Publ., 2001.
6. Smilnieks A. *Gruppovoi polet – polet osobii* [Group flight - a special flight]. Aviatsiya i kosmonavtika, 1989, no. 5. (In Russian)
7. Turbovich I. T. *Ob optimal'nom metode opoznavaniya obrazov pri vzaimnokorellirovannykh priznakah* [On the optimal method of pattern recognition for mutually correlated characters]. V sb. «Opoznavanie obrazov». Moscow, Nauka Publ., 1965. (In Russian)
8. Bogdanchuk V. Z. *Ocenivanie I klassifikaciya pparametrov ob'ektov v usloviyah neopredelennosti* [Estimation and classification of parameters of objects in conditions of uncertainty]. Riga, Zinante Publ., 1987.
9. Semenov S. A., Novoselov P. V., Pil'shhikov D. E. *Metod formirovaniya traektorij grupp vozdushnyh ob"ektov* [The method of forming trajectories of groups of air objects]. Zhurnal v zhurnale «Konfliktno-ustojchivye radioelektronnyye sistemy», Moscow, Radiotekhnika, 2005, no. 5. (In Russian)
10. Korenkov V. M., Moiseenko P. G., Semenov S. A. *Vremya novogo podhoda. Agregirovanie informacii – effektivnii sposob borbi s informacionnimi peregruzkami* [Time for a new approach. Aggregation of information is an effective way to combat information overloads]. Vozdushno-kosmicheskaya oborona, 2006, no. 3 (28). (In Russian)

Article history

Received 20 March 2018

Accepted 5 April 2018

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ, СОЗДАВАЕМОЙ ПО ГОСУДАРСТВЕННЫМ КОНТРАКТАМ

Л. П. Ивлева

ФГУП «Организация «Агат», г. Москва, Российская Федерация

Предложен методический подход к оценке интеллектуальной собственности, создаваемой по государственным контрактам на выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ. Создание интеллектуальной собственности – неотъемлемая часть деятельности организаций ракетно-космической отрасли, являющейся высокотехнологичной и ориентированной на создание инноваций. При оценке интеллектуальной собственности возникают сложности из-за неприменимости рыночного и сравнительного подходов в чистом виде к расчету стоимости, применение затратного подхода также не всегда дает объективную картину. В статье обосновано, что результаты интеллектуальной деятельности следует оценивать комплексно, совмещая разные подходы, учитывая не только затраты на разработку объекта интеллектуальной собственности, но и его качественные характеристики и роль в процессе создания инноваций. Предложено стоимостную оценку корректировать с учетом сути объекта, его значимости для решения технических задач и достижения экономических показателей, т.е. дополняя ее качественной оценкой, а значимость результата – определять посредством применения метода анализа иерархий (двухуровневой модели). Такой подход позволяет приблизить стоимость объекта интеллектуальной собственности к рыночной, в том случае если традиционный сравнительный подход определения стоимости нельзя применить из-за специфичности и оригинального характера оцениваемых результатов интеллектуальной деятельности.

Ключевые слова: оценка, интеллектуальная собственность, результат интеллектуальной деятельности, НИОКР.

С развитием рыночной экономики нематериальные активы приобрели большое значение, в частности для организаций высокотехнологичных отраслей промышленности, к которым относится ракетно-космическая [1]. Но отсутствие единых адаптированных под отрасль методик оценки интеллектуальной собственности затрудняет использование этого актива [2, 3].

Для оценки интеллектуальной собственности (охраняемых результатов интеллектуальной деятельности (РИД)) [4, 5] существует множество подходов [3, 6–10]. В статье предлагается методический подход, основанный на использовании оценки значимости объектов, которая применима для коррекции стоимостной оценки, базирующейся на затратном подходе, так как доходный и рыночные подходы в РКО применить затруднительно из-за специфики создаваемых РИД.

Использование затратного подхода и значимости РИД с наименьшими временными потерями

дает возможность получить стоимостную оценку созданной интеллектуальной собственности, которая будет приближена к стоимости, определенной с использованием сравнительного подхода.

Значимость РИД определяется путем учета разнообразных по весу и сущности свойств [6, 11], характеризующих созданную интеллектуальную собственность и влияющих на результат стоимостной оценки конкретного РИД. Значимость РИД можно определить, применив методы экспертных оценок. Автором предложено применение метода анализа иерархий для определения уровня значимости РИД. Разработка метода основана на универсальном подходе, предложенном Т. Саати для принятия решений в условиях многокритериальности [12].

Алгоритм использования метода анализа иерархий следующий. Первоначально выполняется структуризация задач, определяются альтернативы решений, критерии, влияющие факторы. Далее проводится построение иерархической модели для принятия решений. На верхнем, нулевом уровне находится основная цель при принятии решения, на

первом уровне – критерии для оценки элементов второго уровня. Оценки элементов нижнего уровня определяются относительно критериев верхнего уровня, затем рассчитываются глобальные оценки критериев каждого уровня и оценки альтернативных решений относительно главной цели. После этого альтернативы ранжируются и выбираются оптимальные. Вершиной иерархии, или основной целью, является определение значимости РИД, критериями первого уровня – базовые факторы, определяющие уровень значимости, критериями второго уровня – характеристики для определения факторов первого уровня. Для различных видов РИД базовые факторы являются общими, универсальными.

В качестве базовых факторов (критериев оценки РИД) выделены следующие: новизна (K^1_1) – отличие от существующих технических решений; техническая сложность (K^1_2) – количество алгоритмов, технологических процессов, механизмов и пр., с помощью которых решена техническая задача; потенциальная конкурентоспособность (K^1_3) – способность выхода созданной интеллектуальной собственности на рынок и удержание на нем; применимость оцениваемого объекта в других НИОКР организации (K^1_4). Значения этих критериев могут быть определены следующими характеристиками оцениваемого объекта, являющимися критериями второго уровня: количество новых технологических, конструктивных и общетехнических решений, входящих в один оцениваемый объект (K^2_1); количество существующих на рынке аналогов или заменителей данного объекта (K^2_2); количество новых технических (конструктивных и технологических) параметров и характеристик, полученных с помощью оцениваемой интеллектуальной собственности (K^2_3); количество объектов, в которых возможно применение оцениваемого объекта (K^2_4). Взаимосвязи критериев изображены на рисунке.

Преимуществом перечисленных критериев РИД является возможность определения реальных количественных оценок, непосредственно связанных с эффективностью данного РИД. Полученные значения параметров новизны, технической сложности и потенциальной конкурентоспособности, а также применимости оцениваемого объекта в

других НИОКР организации позволяют сравнивать оцениваемые РИД по их значимости для организации.

В соответствии с предлагаемым автором подходом цена объекта может быть в укрупненном виде представлена произведением его стоимости, рассчитанной затратным методом, и значимости объекта с учетом минимальной значимости среди исследуемой группы объектов. Минимально при расчете учитывают затраты только на патентование: к ним относят оплату пошлин регистрации в Роспатенте и заработную плату сотрудников патентного отдела, взятую пропорционально трудоемкости на оформление данного объекта, иногда включают затраты на ведение делопроизводства по заявке, а также стоимость проведения патентных исследований и сумму выплат единовременного авторского вознаграждения.

Итак, предлагаемый методический подход к оценке стоимости РИД сводится на первом этапе к ее расчету затратным методом (по первоначальным затратам). На втором этапе определяется значимость РИД с учетом его характеристик посредством применения экспертных методов, в частности метода иерархий. Выбор характеристик для сравнения и весомость каждой могут меняться в зависимости от вида сравниваемых РИД. Оценка значимости РИД на основе метода иерархий позволяет учесть весомость численных характеристик РИД ($K^1_1, K^1_2, K^1_3, K^1_4, K^2_1, K^2_2, K^2_3, K^2_4$) и провести сравнение нескольких объектов. Значимость РИД служит повышающим стоимость коэффициентом – она выступает корректирующей величиной. Первоначально оцененные в одинаковые суммы, РИД в зависимости от их значимости, рассчитанной по предлагаемой методике, будут отличаться на разницу между значением конкретного объекта и минимальным значением для оцененной группы объектов.

Использование сочетания стоимостной и качественной (по значимости) оценок РИД позволяет в первом приближении вывести рыночную стоимость объекта в тех случаях, когда традиционный сравнительный подход неприменим из-за оригинального характера оцениваемых РИД.



Рис. Модель иерархии оценки значимости РИД, созданного в рамках НИОКР

Список литературы

1. Ивлева Л. П., Кангезова Е. А. Учет и оценка интеллектуальной собственности при проведении анализа финансово-хозяйственной деятельности предприятия // Экономические системы. 2016. № 2. С. 36–39.
2. Положение по бухгалтерскому учету «Учет нематериальных активов» (ПБУ 14/2007), утвержденное приказом Минфина России от 27 декабря 2007 г. № 153н.
3. Оценка нематериальных активов и интеллектуальной собственности (ФСО № 11). Утвержден приказом Минэкономразвития России от 22.06.2015 № 385.
4. Гражданский кодекс Российской Федерации. Часть четвертая. URL: <http://www.consultant.ru/popular/gkrf4/>
5. ГОСТ Р 55386 — 2012. Интеллектуальная собственность. Термины и определения. Издание официальное. Москва : Стандартинформ, 2014.
6. Черняева Н. В. Интеллектуальная собственность: методологический подход стоимостной оценки на основе методов многокритериального анализа // Век качества. 2010. № 4. С. 20–23.
7. Кроп Р. А. Модель и алгоритм оценки объекта интеллектуальной собственности методом «плавающих коэффициентов» // Экономические науки. 2010. Т. 64, № 3. С. 199–204.
8. Ганичева А. В. Математические модели и методы оценки бизнеса, имущества, интеллектуальной собственности : учеб. пособие. Тверь : ЦНИОТ, 2016. 166 с.
9. Краюхин Г. А., Быстров В. Ф., Жгулев Е. В. Трансфер инновационных технологий : учебник. СПб. : Изд-во СПбГЭУ, 2016. 259 с.
10. Арабян К. К. Методика оценки интеллектуальных активов: монография. М. : Юнити-Дана, 2015.
11. Кудашов В. И., Нечепуренко Ю. В., Синяк Н. Г. Оценка научно-технической и экономической значимости объектов интеллектуальной собственности // Труды БГТУ. № 7 (189). Экономика и управление, 2016. С. 25–32.
12. Кашеварова Н. А. Применение метода анализа иерархий для оценки значимости технических ноу-хау // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 4 (28) [Электронный ресурс]. URL: EngJournal.ru/articles/1214/1214.pdf (дата обращения 01.09.2017).

История статьи

Поступила в редакцию 24 ноября 2017 г.

Принята к публикации 14 февраля 2018 г.

DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGICAL APPROACH TO ESTIMATION OF INTELLECTUAL PROPERTY, CREATED BY STATE CONTRACTS

L. P. Ivleva

FSUE «Organization «Agat», Moscow, Russian Federation

The methodical approach to the intellectual property evaluation of created under the state contracts on performance of research, developmental and technological works evaluation is offered. The creation of intellectual property is an integral part of the activities of space industry organizations. It is high-tech and innovation-oriented. The intellectual property evaluation is complicated by the inapplicability of the market and comparative approach in its pure form. Apply the cost-based approach to evaluation, but not always it gives an objective picture. It is reasonable to evaluate the results of intellectual activity comprehensively, combining different approaches. Take into account not only the costs of the intellectual property development, but also its qualitative characteristics, the role in the creating innovation process. A cost estimate was proposed to adjust by the object nature and its importance for the solution of technical problems and the achievement of economic indicators. It is necessary to supplement the cost estimate with a qualitative assessment.

The significance of the intellectual activity result is proposed to determine using the Hierarchies method (two-level model). The proposed approach allows us to bring the value of intellectual property to market value, if the traditional comparative approach of determining the value can not be applied due to the specificity and originality of the evaluated intellectual activity result results.

Keywords: evaluation, intellectual property, the result of intellectual activity, R&D.

References

1. Ivleva L. P., Kangezova E. A. Accounting and valuation of intellectual property in the analysis of enterprises financial-economic activity. *Jekonomicheskie sistemy*. 2016. no. 2. pp. 36–39. (In Russian)
2. Provision on accounting «Accounting of intangible assets» (14/2007), approved by the Russia Finance Ministry 27.12.2007 no. 153n. (In Russian)
3. Valuation of intangible assets and intellectual property (Federal valuation standard. (FSO No. 11)). Approved by the Russian Federation economic development Ministry, 22.06.15, no. 385. (In Russian)
4. *Grazhdanskiy kodeks Rossiiskoi Federatsii* [Russian Civil Code], Part 4 Section VII: The right to products of intellectual activity and means of individualization. Available at: <http://www.consultant.ru/popular/gkrf4/> (accessed 01.09.2017)/ (In Russian)
5. *GOST R 55386 – 2012. Intellektual'naja sobstvennost'. Terminy i opredelenija*. [State Standard R 55386 – 2012. Intellectual property. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 67 p.
6. Chernyaeva N. V. Intellectual property: the methodological approach of valuation based on the multi-criteria analysis methods. *Vekkachestva*. 2010. no. 4. pp. 20-23. (In Russian)
7. Krop R. A. Model and estimation algorithm intellectual property by the method of «floating factors». *Jekonomicheskie nauki*. 2010. T. 64. no. 3. pp. 199-204. (In Russian)
8. Ganicheva A. V. *Matematicheskie modeli i metody otsenki biznesa, imushchestva, intellektual'noi sobstvennosti* [Mathematical models and methods for assessing business, property, intellectual property], Tver, Center of Scientific and Educational Technology, LLC, 2016, 166 p. (In Russian)
9. Kraiukhin G. A., Bystrov V. F., Zhgulev E. V. *Transfer innovatsionnykh tekhnologii* [Transfer of innovative technologies], St.Petersburg, SPbSEU, 2016, 259 p. (In Russian)
10. Arabian K.K. *Metodika otsenki intellektual'nykh aktivov* [Technique of assessment of intellectual assets], Moscow, Iuniti-Dana, 2015. (In Russian)
11. Kudashov V. I., Nechepurenko Ju. V., Sinjak N. G. *Ocenka nauchno-tehnicheskoy i jekonomicheskoy znachimosti objektov intellektual'noj sobstvennosti* [Assessment of scientific, technical and economic intellectual property objects significance]. *Trudy BGTU. Ekonomika i upravlenie* [Proceedings of BSTU. Economics and managements], 2016, Vol/ 189, №7, pp. 25-32. (In Russian)
12. Kashevarova N.A. Application of the analytic hierarchy process for evaluating the technical know-how significance // *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii*. 2014. no. 4(28) at.: [EngJournal.ru>articles/1214/1214.pdf](http://EngJournal.ru/articles/1214/1214.pdf) (accessed 01.09.2017). (In Russian)

Article history

Received 24 November 2017

Accepted 14 February 2018

Сведения об авторах

Андрианов Антон Сергеевич – адъюнкт кафедры системного анализа и математического обеспечения АСУ (войсками) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.

E-mail: meteo62250-1@mail.ru

Викторов Дмитрий Сергеевич – профессор кафедры основ построения радиоэлектронных средств и систем Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (г. Тверь), доктор технических наук, доцент. Окончил Харьковское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск в 1990 году. Область научных интересов: теоретические основы, системотехника и технология проектирования отказоустойчивых бортовых вычислительных систем.

E-mail: viktorov.dmitry@yandex.ru

Волков Валерий Федорович – профессор кафедры системного анализа и математического обеспечения АСУ (войсками) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, доктор военных наук, профессор. Область научных интересов: теория эффективности, исследование операций, системный анализ.

E-mail: the_lexys@bk.ru

Гладышев Андрей Борисович – доцент Военно-инженерного института Сибирского федерального университета.

E-mail: a-glonass@ya.ru

Дмитриев Дмитрий Дмитриевич – доцент Военно-инженерного института Сибирского федерального университета, кандидат технических наук, доцент.

E-mail: dmitriev121074@mail.ru

Жидков Евгений Николаевич – начальник кафедры Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (г. Тверь), кандидат технических наук. Окончил Военный университет противовоздушной обороны (г. Тверь) в 1995 году. Область научных интересов: системный анализ, оценка эффективности радиолокационных систем, алгоритмы цифровой обработки радиолокационной информации, схемотехника.

E-mail: eng1964@mail.ru

Жидков Роман Евгеньевич – адъюнкт Военной академии воздушно-космической обороны (г. Тверь). Окончил Военную академию воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (г. Тверь) в 2012 году. Область научных интересов: методы верификации программного обеспечения бортовых вычислительных комплексов.

E-mail: r-zhidkov@rambler.ru

Ивлева Лидия Петровна – кандидат технических наук (МГУПИ, ныне ФГБОУ ВО МИРЭА) с 2013 года. Окончила Московский государственный горный университет (ныне НИТУ «МИСИС») в 2005 году, Область научных интересов: интеллектуальная собственность, ее оценка, состояние инновационной и изобретательской деятельности в РКО. Место работы: ФГУП «Организация «Агат».

*E-mail: ivlevaLP@agat-roscosmos.ru,
lid_iv@mail.ru*

Керножицкий Владимир Андреевич – профессор кафедры систем управления и компьютерных технологий Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, кандидат технических наук, доцент, почетный изобретатель Российской Федерации. Окончил Рижское Краснознаменное высшее инженерно-авиационное военное училище им. Ленинского комсомола в 1960 году. Область научных интересов: ракетно-космическая и авиационная техника.

E-mail: vakern@mail.ru

Колычев Алексей Васильевич – старший преподаватель, старший научный сотрудник Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, кандидат технических наук, окончил Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 2009 году. Область научных интересов: ракетно-космическая и авиационная техника.

E-mail: vakern@mail.ru

Левихин Артем Анатольевич – заведующий кафедрой А8 «Двигатели и энергоустановки ЛА», кандидат технических наук. Окончил Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 2004 году. Область научных интересов: двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Пластинина Екатерина Владимировна – доцент кафедры основ построения радиоэлектронных средств и систем Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (г. Тверь), кандидат технических наук, доцент. Окончила Сыктывкарский Коми государственный педагогический институт в 1999 году. Область научных интересов: математические методы моделирования процессов.

E-mail: plastinina77@yandex.ru

Поддубский Виктор Владимирович – преподаватель Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова

(г. Тверь), кандидат технических наук. Окончил Московский военный институт радиоэлектроники Космических войск в 2008 году. Область научных интересов: системный анализ, оценка эффективности радиолокационных систем.

E-mail: vavkotver@yandex.ru

Прохоров Михаил Александрович – адъюнкт кафедры системного анализа и математического обеспечения АСУ (войсками) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского.

E-mail: Mihan78@mail.ru

Ратушняк Василий Николаевич – доцент Военно-инженерного института Сибирского федерального университета, кандидат технических наук, доцент.

E-mail: oborona-81@ya.ru

Самоволина Елена Валерьевна – преподаватель кафедры основ построения радиоэлектронных средств и систем Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (г. Тверь). Окончила Тверской государственный университет в 2012 году. Область научных интересов: методы оценки качества и надежности программно-аппаратных комплексов.

Семенов Владимир Сергеевич – преподаватель Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (г. Тверь), кандидат технических наук. Окончил Военную академию воздушно-космической обороны в 2001 году. Область научных интересов: системный анализ, оценка эффективности радиолокационных систем.

E-mail: vavkotver@yandex.ru

Семенов Сергей Александрович – преподаватель Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (г. Тверь), доктор технических наук, старший научный сотрудник. Окончил Военную инженерную радиотехническую академию имени Маршала Советского Союза Л. А. Говорова в 1982 году. Область научных интересов: системный анализ, оценка эффективности радиолокационных систем.

E-mail: vavkotver@yandex.ru

Толмачев Алексей Александрович – преподаватель кафедры основ построения радиоэлектронных средств и систем Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова, кандидат военных наук. Область научных интересов: теория эффективности, исследование операций, системный анализ.

E-mail: the_lexys@bk.ru

Тяпкин Валерий Николаевич – профессор Военно-инженерного института Сибирского федерального университета, кандидат технических наук, доцент. Окончил Военную инженерную радиотехническую академию имени Маршала Советского Союза Л. А. Говорова в 1992 году. Область научных интересов: радиолокация и радионавигация.

E-mail: tyapkin58@mail.ru

Юнаков Леонид Павлович – декан факультета Факультет «А» Ракетно-космической техники, кандидат технических наук, профессор. Окончил в 1988 году Ленинградский механический институт (Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова). Область научных интересов: энергетические и двигательные установки.

E-mail: yunakovlp@mail.ru

Требования к оформлению статей для опубликования в журнале «Космические аппараты и технологии»

Редакция принимает в журнал статьи, соответствующие следующим темам:

- ◀ ракетно-космическая техника
- ◀ новые материалы и технологии в космической технике
- ◀ космическое приборостроение
- ◀ космические услуги
- ◀ инновации и экономика космической отрасли

Статья должна быть подготовлена в формате Документ Word 97–2003 и направлена на электронную почту редакции isercit@gmail.com.

Вместе со статьёй необходимо предоставить акт экспертного заключения с печатью и заключение комиссии экспортного контроля (КЭК) о возможности опубликования или, в случае отсутствия КЭК в организации, письмо за подписью руководителя организации с печатью, что данные сведения не подлежат экспортному контролю.

После принятия материалов автору будет выслан лицензионный договор и акт на право использования редакцией научной статьи при размещении в журнале и электронных базах данных.

Подписанный автором лицензионный договор и акт, а также оригиналы акта экспертного заключения и заключение КЭК должны быть высланы почтой на адрес редакции: 662972, а/я 57, Красноярский край, ЗАТО г. Железногорск. Ассоциация «ТП «НИСС».

При подготовке статьи авторы должны следовать этическим принципам, принятым в научном сообществе и редакцией журнала.

Авторы должны руководствоваться приведёнными ниже правилами. Статьи, оформленные без соблюдения этих правил, могут быть возвращены авторам на доработку.

Требования к составу и расположению элементов оформления научной статьи:

- ◀ Индекс УДК располагают отдельной строкой слева.
- ◀ На следующей строке размещается заголовок, который центрируют и набирают строчными буквами (как в предложении, начиная с прописной). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, начертание – полужирное. Перенос слов в заголовке недопустим.
- ◀ Под заголовком по центру указываются фамилия и инициалы автора(ов). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- ◀ Под ФИО автора(ов) по центру указываются: полное название учреждения (место работы), в котором выполнена работа (в именительном падеже), затем город (населённый пункт), область (край), страна. Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- ◀ Аннотация к статье.
- ◀ Ключевые слова (4–7 слов или словосочетаний).
- ◀ Текст, оформленный в соответствии с нижеприведенными требованиями.
- ◀ Пристатейный библиографический список, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008.
- ◀ Следом необходимо привести заголовок, ФИО автора(ов), организацию, аннотацию, ключевые слова и библиографический список на английском языке.
- ◀ В конце документа необходимо привести сведения о каждом авторе (должность и место работы, научные степень и звание, что и когда окончил, область научных интересов, e-mail).

Требования к представляемому тексту, иллюстрациям и приставительному библиографическому списку:

- ◀ Объём статьи, включая иллюстрации и список литературы, 8–20 страниц формата А4 (210 x 297 мм).
- ◀ Поля – 2,5 см.
- ◀ Шрифт Times New Roman, 14 кегль, полуторный интервал, красная строка 1,27 см.
- ◀ Заголовок и аннотация статьи не должны содержать нерасшифрованных сокращений (аббревиатур) и ссылок на литературу. Объём аннотации: 200–250 слов (равнение на английский вариант аннотации).
- ◀ При использовании в тексте сокращённых названий необходимо давать их расшифровку, следует ограничиваться общепринятыми сокращениями и избегать новых без достаточных на то оснований.
- ◀ Для использования переносов в словах необходимо пользоваться командой «автоматическая расстановка переносов». Для форматирования текста не использовать пробелы (нигде в тексте не должно быть рядом стоящих двух пробелов).
- ◀ Для набора сложных математических формул и выражений используется MathType, дробные выражения в формулах рекомендуется по возможности заменять выражениями с отрицательными степенями либо использовать косую черту. Размер шрифта в формулах установить по умолчанию (12).
- ◀ Допускаются рисунки и таблицы без заголовков, подписей и слов «Таблица» и «Рис.» в случае одной таблицы/рисунка. Если имеется несколько рисунков или таблиц, используются слова «Таблица» или «Рис.» с указанием номера таблицы или рисунка. Не рекомендуется загромождать рисунок ненужными деталями: надписи должны быть вынесены в подпись к рисунку, а на рисунке заменены цифрами или буквами. Желательно не перегружать текст графическим материалом. Размер шрифта в таблицах 12 кегль. Межстрочный интервал – одинарный. Схемы, рисунки и другие графические элементы должны быть представлены дополнительно отдельным файлом в графическом формате.
- ◀ В тексте ссылки на цитируемую литературу даются в квадратных скобках в конце предложения перед точкой (например: [1], [1, 2] или [1–3] и т.д.). Библиографический список следует оформлять в порядке ссылок на неё по тексту, в списке должны быть только те источники, на которые есть ссылки в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Для книг: фамилия и инициалы автора, полное название книги, место издания, издательство, год, том или выпуск, общее количество страниц. Для периодических изданий: фамилия и инициалы автора, название статьи, название журнала, год издания, том, номер, первая и последняя страницы статьи. Литература нумеруется арабскими цифрами без использования автоматической нумерации. Рекомендуется использование не менее 15 источников не старше 5 лет.

Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники», посвященная годовщине Дня радио

Уважаемые коллеги!

Начиная с 1998 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» проводится Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники». Конференция приурочена к Дню радио и проводится в первых числах мая. В 2018 году состоялась XXI конференция, посвященная 123-й годовщине Дня радио.



Статус всероссийской конференции подтверждается участием в ней докладчиков из различных регионов Российской Федерации, а также из других стран. Целью проведения конференции является укрепление и развитие научного обмена в среде специалистов и исследователей в области радиоэлектроники, предоставление площадки для передачи знаний и опыта ведущих научных специалистов творческой молодежи. В настоящее время конференция является одним из немногих мероприятий всероссийского уровня, предоставляющих возможность опубликования своих докладов молодым ученым, аспирантам и студентам без оплаты организационного взноса.

Основные направления работы конференции:

1. Радиотехнические системы;
2. Устройства обработки сигналов и навигационные системы;
3. Информационные спутниковые системы и технологии;
4. Приборостроение;
5. СВЧ технологии, антенны и устройства;
6. Полупроводниковая электроника и нанoeлектроника;
7. Конструирование и технология электронных средств;
8. Телекоммуникации, интеллектуальные сети;
9. Функциональные материалы микро- и нанoeлектроники.

Информационные партнеры:

Журнал «Космические аппараты и технологии»;
Журнал СФУ. Техника и технологии (SibFU Journal. Engineering and Technologies);
Журнал «Нано- и микросистемная техника» (выходит также на английском языке).

Более подробную информацию Вы можете узнать, перейдя по ссылке:
<http://efir.sfu-kras.ru/science/conference/>

Архив конференции (сборники трудов предыдущих лет) доступен по этой же ссылке.

Приглашаем Вас к участию в конференции!

Дорога в космос - университетский центр управления полётом «роем» малых космических аппаратов



www.road-to-space.ru

vk.com/spaceroute

okg2000@mail.ru

kartsan2003@mail.ru