

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

Журнал **H&ES Research** издается с 2009 года, освещает достижения и проблемы российских инфокоммуникаций, внедрение последних достижений отрасли в автоматизированных системах управления, развитие технологий в информационной безопасности, исследования космоса, развитие спутникового телевидения и навигации, исследование Арктики. Особое место в издании уделено результатам научных исследований молодых ученых в области создания новых средств и технологий космических исследований Земли.

Журнал H&ES Research входит в перечень изданий, публикации в которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ), в систему российского индекса научного цитирования (РИНЦ), а также включен в Международный классификатор периодических изданий.

Тематика публикуемых статей в соответствии с перечнем групп специальностей научных работников по Номенклатуре специальностей:

- 05.11.00 Авиационная и ракетно-космическая техника
- 05.12.00 Радиотехника и связь
- 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление.

ИНДЕКСИРОВАНИЕ ЖУРНАЛА H&ES RESEARCH

- NEICON • CyberLenika (Open Science) • Google Scholar • OCLC WorldCat • Ulrich's Periodicals Directory • Bielefeld Academic Search Engine (BASE) • eLIBRARY.RU • Registry of Open Access Repositories (ROAR)

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции. За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет. Материалы, опубликованные в журнале – собственность ООО «ИД Медиа Паблшер». Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя.

ПЛАТА С АСПИРАНТОВ ЗА ПУБЛИКАЦИЮ РУКОПИСИ НЕ ВЗИМАЕТСЯ

Всем авторам, желающим разместить научную статью в журнале, необходимо оформить ее согласно требованиям и направить материалы на электронную почту: HT-ESResearch@yandex.ru.

С требованиями можно ознакомиться на сайте: www.H-ES.ru. Все номера журнала находятся в свободном доступе на сайте.

Язык публикаций: русский, английский.
Периодичность выхода – 6 номеров в год.

© ООО «ИД Медиа Паблшер», 2018

HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

H&ES Research is published since 2009. The journal covers achievements and problems of the Russian infocommunication, introduction of the last achievements of branch in automated control systems, development of technologies in information security, space researches, development of satellite television and navigation, research of the Arctic. The special place in the edition is given to results of scientific researches of young scientists in the field of creation of new means and technologies of space researches of Earth.

The journal H&ES Research is included in the list of scientific publications, recommended Higher Attestation Commission Russian Ministry of Education for the publication of scientific works, which reflect the basic scientific content of candidate and doctoral theses. IF of the Russian Science Citation Index.

Subject of published articles according to the list of branches of science and groups of scientific specialties in accordance with the Nomenclature of specialties:

- 05.07.00 Aviation, space-rocket hardware
- 05.12.00 RF technology and communication
- 05.13.00 Informatics, computer engineering and control.

JOURNAL H&ES RESEARCH INDEXING

The opinions of the authors don't always coincide with the point of view of the publisher. For the content of ads, the editorial Board is not responsible. All articles and illustrations are copyright. All rights reserved. No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock company.

POSTGRADUATE STUDENTS FOR PUBLICATION OF THE MANUSCRIPT WILL NOT BE CHARGED

All authors wishing to post a scientific article in the journal, you must register it according to the requirements and send the materials to your email: HT-ESResearch@yandex.ru.

The requirements are available on the website: www.H-ES.ru. All issues of the journal are in a free access on a site.

Language of publications: Russian, English.
Periodicity – 6 issues per year.

© "Media Publisher", LLC 2018

Учредитель:

ООО «ИД Медиа Паблишер»

Издатель:

СВЕТЛАНА ДЫМКОВА

Главный редактор:

КОНСТАНТИН ЛЕГКОВ

Редакционная коллегия:

БОБРОВСКИЙ В.И., д.т.н., доцент;

БОРИСОВ В.В., д.т.н., профессор,

Действительный член академии

военных наук РФ;

БУДКО П.А., д.т.н., профессор;

БУДНИКОВ С.А., д.т.н., доцент,

Действительный член Академии

информатизации образования;

ВЕРХОВА Г.В., д.т.н., профессор;

ГОНЧАРОВСКИЙ В.С., д.т.н., профессор,

заслуженный деятель науки

и техники РФ;

КОМАШИНСКИЙ В.И., д.т.н., профессор;

КИРПАНЕВ А.В., д.т.н., доцент;

КУРНОСОВ В.И., д.т.н., профессор,

академик Международной академии

информатизации, Действительный

член Российской академии

естественных наук;

МАНУЙЛОВ Ю.С., д.т.н., профессор;

МОРОЗОВ А.В., д.т.н., профессор,

Действительный член Академии

военных наук РФ;

МОШАК Н.Н., д.т.н., доцент;

ПРОРОК В.Я., д.т.н., профессор;

СЕМЕНОВ С.С., д.т.н., доцент;

СЕНИЦЫН Е.А., д.т.н., профессор;

ШАТРАКОВ Ю.Г., д.т.н., профессор,

заслуженный деятель науки РФ.

H&ES Research зарегистрирован

Федеральной службой по надзору

за соблюдением законодательства в

сфере массовых коммуникаций и охране

культурного наследия.

Издательская лицензия

ПИ № ФС 77-60899.

Адрес издателя:

111024, Россия, Москва,

ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514.

Адрес редакции:

194044, Россия, Санкт-Петербург,

Лесной Проспект, 34-36, к. 1,

Тел.: +7(911) 194-12-42.

Дизайн и компьютерная верстка:

ОКСАНА ИВАНОВА

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Гончаревский В.С., Зиновьев С.В.

Управление зависанием космических аппаратов

в невращающейся относительной системе координат 4

Куимов А.В.

Методический аппарат обоснования рационального варианта

комплекса средств измерений, сбора и обработки измерительной информации

в соответствии с потребностями обеспечения летных испытаний изделий

ракетно-космической техники и ракетного вооружения 15

Морозов П.А., Круталевич Ю.А., Аношин Р.И., Зюзина А.Д.

Способ формирования предметно-графической объектной модели

отображаемых данных на автоматизированном рабочем месте

комплекса средств автоматизации Воздушно-космических сил 26

Мосин Д.А., Дуга В.В.

Методика оценки возможностей инфраструктуры испытательного космодрома

по запуску малых космических аппаратов с целью наращивания

возможностей национальной орбитальной группировки 37

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Кузнецов В.С., Волков А.С., Быков А.В.

Разработка и моделирование метода декодирования помехоустойчивого

блокового кода с применением второго алгоритма Чейза 46

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Буренин А.Н., Легков К.Е., Первов М.С.

Вероятностно-временные характеристики функционирования защищенной

агрегативной автоматизированной системы управления сложной

организационно-технической системой в условиях интенсивных кибератак 56

Нейдорф Р.А., Агаджанян А.Г.

Сравнительное исследование гибридного алгоритма оптимальной

тоновой аппроксимации монохромных изображений 64

Новиков В.А., Демихов Е.Н.

Подход к обоснованию управленческих решений

на основе априорной истинности информации 75

Шмелёв В.В., Каргин В.А., Попов Д.В.

Концептуальная модель интеллектуального мониторинга технических систем

на основе функционально-логических программ потоковых вычислений 81

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Колпин М.А., Проценко П.А.

Методика планирования задействования средств наземного

автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами 90

CONTENTS

AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

Goncharevskij V.S., Zinoviev S.V.
Control of hovering spacecraft in non-rotating relative coordinate system 4

Kuimov A.V.
Methodology for substantiating a rational alternative of a complex of devices of measuring, collecting and processing measurement information in accordance with the requirements of providing flight tests of rocket-space technics and rocket armament 15

Morozov P.A., Krutalevich Yu.A., Anoshin R.I., Zyuzina A.D.
A method of forming a subject-object model of the graphics data displayed on the automated workstation of the automation systems 26

Mosin D.A., Duga V.V.
Methods for assessing the capacity of the test spaceport infrastructure for launching small spacecraft in order to increase the capabilities of the national orbital constellation 37

RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

Kuznetsov V.S., Volkov A.S., Bykov A.V.
Development and modeling of decoding method of error correction block code using the second Chase algorithm 46

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Burenin A.N., Legkov K.E., Pervov M.S.
Probable time response characteristics of functioning of protected aggregate automated control system for difficult organizational and technical system in the conditions of intensive cyber attacks 56

Neydorf R.A., Aghajanyan A.G.
An investigation comparing the hybrid algorithm of optimal tone approximation of monochrome images 64

Novikov V.A., Demikhov E.N.
Approach to substantiation of management decisions based on a priori truth of information 75

Shmelev V.V., Kargin V.A., Popov D.V.
Conceptual model of intellectual monitoring of engineering systems on the basis of is functional-logic programs of stream scalings 81

PUBLICATIONS IN ENGLISH AVIATION, SPASE-ROCKET HARDWARE

Kolpin M.A., Protsenko P.A.
Method of scheduling deployment means of ground automated control complex of spacecraft 90

Founder:
"Media Publisher", LLC

Publisher:
SVETLANA DYMKOVA

Editor in chief:
KONSTANTIN LEGKOV

Editorial board:
BOBROWSKY V.I., PhD, Docent;
BORISOV V.V., PhD, Full Professor;
BUDKO P.A., PhD, Full Professor;
BUDNIKOV S.A., PhD, Docent,
Actual Member of the Academy of Education Informatization;
VERHOVA G.V., PhD, Full Professor;
GONCHAREVSKY V.S., PhD, Full Professor, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation;
KOMASHINSKIY V.I., PhD, Full Professor;
KIRPANEEV A.V., PhD, Docent;
KURNOSOV V.I., PhD, Full Professor, Academician of the International Academy of Informatization, law and order, Member of the Academy of Natural Sciences;
MANUILOV Y.S., PhD, Full Professor;
MOROZOV A.V., PhD, Full Professor, Actual Member of the Academy of Military Sciences;
MOSHAK N.N., PhD, Docent;
PROROK V.Y., PhD, Full Professor;
SEME NOV S.S., PhD, Docent;
SINICYN E.A., PhD, Full Professor;
SHATRAKOV Y.G., PhD, Full Professor; Honored Worker of Science of the Russian Federation.

Journal H&ES Research has been registered by the Federal service on supervision of legislation observance in sphere of mass communications and cultural heritage protection.
Publishing license
ПИ № ФС 77-60899.

Address of publisher:
111024, Russia, Moscow,
st. Aviamotornaya, 8, office 512-514;

Address of edition:
194044, Russia, St. Petersburg,
Lesnoy av., 34-36, h.1,
Phone: +7 (911) 194-12-42.

Design and computer imposition:
OKSANA IVANOVA

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10161

УПРАВЛЕНИЕ ЗАВИСанием КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В НЕВРАЩАЮЩЕЙСЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

ГОНЧАРЕВСКИЙ

Вилен Степанович¹

ЗИНОВЬЕВ

Сергей Валерьевич²

Сведения об авторах:

¹Заслуженный деятель науки и техники РФ, д.т.н., профессор, профессор кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, vilenstepan@yandex.ru

²к.т.н., доцент, начальник кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, Zinoviev_SV@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются методы управления зависанием активного космического аппарата относительно пассивного аппарата, строительные оси которого занимают в инерциальном пространстве неизменное положение. Это имеет место в том случае, когда в системе ориентации и угловой стабилизации пассивного аппарата в качестве опорной системы отсчета используется невращающаяся относительная система координат.

Зависание одного космического аппарата относительно другого является одной из разновидностей группового полета орбитальных объектов в космическом пространстве. Отличительной чертой зависания как разновидности группового полета является обеспечение в течение всего времени этого полета условия неизменности положения активного аппарата в относительной системе координат с началом в центре масс пассивного аппарата. Необходимость такого положения может возникнуть при решении задач опознавания космических объектов, осуществления стыковки с орбитальными станциями, оборудованными несколькими стыковочными узлами, спасения экипажей пилотируемых космических аппаратов в аварийных ситуациях и т.д. В работе найдены управляющие воздействия, необходимые для осуществления зависания активного аппарата в невращающейся относительной системе координат. Они представляют собой непрерывные функции времени, в которых координаты точки зависания играют роль параметров. Получены соотношения для оценки энергозатрат при реализации этих управляющих воздействий. Показано, что при заданном времени зависания для уменьшения энергозатрат желательно осуществлять его в точке, лежащей в относительной системе координат под углом, численно равным половине этого времени. Для обеспечения зависания строго в заданной точке при реализации найденных управляющих воздействий необходимы двигатели переменной тяги, работающие в непрерывном режиме. Это связано с повышенными энергозатратами. Так как во многих случаях нет необходимости жестко фиксировать положение активного аппарата в заданной точке зависания и можно допустить его барражирование относительно этой точки, то предложены методы, в которых данное управление осуществляется с помощью двигателей импульсной тяги, что позволяет снизить требуемые энергозатраты. Найдены управляющие воздействия для выполнения барражирования, а также определены зависимости размеров зоны барражирования от углового положения опорной точки и величины периода барражирования относительно этой точки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: групповой полет; зависание космического аппарата; методы управления зависанием; барражирование космического аппарата; относительная система координат.

Для цитирования: Гончаревский В.С., Зиновьев С.В. Управление зависанием космических аппаратов в невращающейся относительной системе координат // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 5. С. 4–14. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10161

Введение

Зависание одного космического аппарата (КА) относительно другого является одной из разновидностей группового полета (ГП) [1–16]. Под ГП понимается такое управляемое относительное движение (ОД) двух или более КА, в процессе которого относительное расстояние между ними либо не изменяется, либо изменяется по определенному закону в некоторых достаточно ограниченных пределах, и, кроме того, это расстояние остается значительно меньшим их расстояний до центра планеты. Отсюда следует, что основная цель управления ГП состоит в том, чтобы в процессе его осуществления вектор $\vec{q}(\tau)$ относительного состояния центров масс КА либо сохранял свое заданное начальное значение $\vec{q} = \vec{q}_0$, либо изменялся вполне определенным образом в пределах $\vec{q}_{\min} \leq \vec{q} \leq \vec{q}_{\max}$. Вектор $\vec{q}(\tau) = [\vec{R}(\tau), \vec{V}(\tau)]$, определяемый тремя компонентами вектора относительного положения $\vec{R}(\tau)$ и тремя компонентами относительной скорости $\vec{V}(\tau)$, полностью описывает в любой момент времени τ относительное положение и относительные скорости КА, участвующих в ГП. Будем полагать, что в его процессе аппарат, относительно которого нужно осуществить зависание, не изменяет траекторию центра масс, а управляемыми являются другие аппараты, участвующие в данной операции. Поэтому в дальнейшем первый из них называется пассивным аппаратом (ПА), а остальные — активными аппаратами (АА).

В зависимости от того, каким образом изменяются вектор положения и вектор скорости при осуществлении ГП, можно выделить несколько его разновидностей. Основными из них являются:

1. *Зависание.* Отличительной чертой этой разновидности является выполнение условия равенства вектора относительного положения своему начальному значению при нулевом значении вектора относительной скорости в течение всего времени ГП. Таким образом, при осуществлении данной разновидности обеспечивается неизменность относительного положения аппаратов, то есть АА как бы зависает относительно ПА в некоторой точке, отстоящей от ПА на постоянной начальной дальности и имеющей постоянные угловые координаты. Необходимость такого положения может возникнуть при решении задач опознавания и инспекции космических объектов неизвестного назначения, проведения ремонтных работ, спасения экипажей пилотируемых КА в аварийных ситуациях и т.д.

2. *Облет.* В процессе выполнения данной разновидности вектор относительного положения поворачивается в пространстве на заданный угол. Эта разновидность может потребоваться при осуществлении стыковки с орбитальными станциями и комплексами, оборудованными несколькими стыковочными узлами, при ремонте, при спасении экипажей КА, в процессе выполнения инспекции неизвестных космических объектов и др.

3. *Барражирование.* Здесь АА в процессе ГП совершает многократное циклическое перемещение в пределах некоторой зоны с заданными линейными или угловыми размерами. Необходимость в барражировании может возникнуть при решении таких же задач, как и в случае зависания.

Следует отметить, что все рассмотренные разновидности группового полета в зависимости от содержания и условий космической операции могут выполняться АА как по отдельности, так и в определенной совокупности и последовательности. Например, для осуществления стыковки с орбитальной станцией, оборудованной несколькими стыковочными узлами и при отсутствии на ней встречной ориентации, АА, роль которого выполняет транспортный корабль снабжения, после сближения со станцией должен сначала зависнуть около нее, затем совершить облет для выхода на направление оси заданного стыковочного узла, снова зависнуть и затем осуществить причаливание и стыковку.

Другими примерами могут служить операция опознавания неизвестных космических объектов с помощью КА-инспектора, базирующегося на многоцелевой орбитальной станции, или операция доставки с этой станции на другие КА различных грузов с помощью межорбитального космического буксира. В случае операции опознавания КА-инспектор стартует с борта орбитальной станции и после сближения с целью совершает групповой полет с ней (зависание, облет, барражирование), а затем возвращается на станцию. Примерно аналогично будет выглядеть операция доставки грузов на орбитальный комплекс с несколькими стыковочными узлами, когда роль АА выполняет межорбитальный космический буксир.

В течение всего группового полета расстояние между КА остается значительно меньшим расстояний до общего центра (центра планеты), вокруг которого происходит их абсолютное движение. Поэтому при исследовании динамики ГП удобнее рассматривать не абсолютное движение, а относительное движение в системе координат, связанной с одним из них. Начало такой относительной системы координат (ОСК) целесообразно совместить с ПА, так как характер его движения более прост по сравнению с движением АА и может быть заранее определен и спрогнозирован на достаточно продолжительное время. Ориентация осей ОСК может быть различной. Она определяет тип той или иной координатной системы. Наиболее широко используются следующие три типа ОСК [8]: вращающаяся система, невращающаяся система и визирная система. Помимо этих систем для исследования динамики ГП и управления им может использоваться ряд других ОСК. Среди них следует упомянуть сферическую ОСК и наклонную прямоугольную ОСК. Относительное положение АА в сферической системе определяется величиной вектора относительной дальности и двумя углами азимута и места, характеризующими направление этого вектора в ОСК. Наклонная ОСК совпадает с визирной в начальный момент ГП.

В последующие моменты времени оси наклонной ОСК сохраняют неизменным это начальное угловое положение во вращающейся или невращающейся ОСК. Таким образом, начальные отклонения по угловым координатам в наклонной ОСК всегда равны нулю. Из-за данного обстоятельства эту ОСК удобно использовать при исследовании динамики ГП в ряде методов управления.

Групповой полет и его отдельные разновидности в общем случае могут быть выполнены с помощью различных программных траекторий, каждой из которых соответствует своя определенная программа управления. Эта программа, а, следовательно, и соответствующая ей траектория ГП выбирается и рассчитывается таким образом, чтобы основные характеристики качества управления были наилучшими (оптимальными) в том или ином смысле. Поэтому эти характеристики одновременно являются и критериями оптимальности управления ГП. При разработке программного и корректирующего управлений ГП могут использоваться различные критерии оптимальности. Основные из них – критерии получения максимальной точности, наибольшего быстродействия и минимальных энергетических затрат (ЭЗ). Все они в зависимости от типа управления и от вида конкретной задачи, решаемой в процессе ГП, могут выдвигаться по отдельности или одновременно. Обычно при разработке корректирующего управления основным показателем качества является максимальная точность, а при разработке программного управления — максимальное быстродействие или минимальные ЭЗ. Точность выполнения заданной разновидности ГП определяется тремя основными факторами: точностью самого метода управления ГП, составом и точностью измерения параметров ОД, точностью отработки полученных управляющих воздействий. Требования к точности управления ГП зависят от характера решаемых им задач.

Наиболее удобным и простым показателем ЭЗ на выполнение заданной разновидности ГП является характеристическая скорость, представляющая собой сумму приращений модуля вектора относительной скорости за время ГП под действием управляющего ускорения. Время выполнения заданной разновидности группового полета T для ряда задач управления ГП является основным показателем. Величина T оказывает также большое влияние на величину ЭЗ, необходимых для управления ГД, и при правильном выборе T можно существенно снизить эти затраты. Данное обстоятельство должно обязательно учитываться при разработке программы управления ГП.

Методы управления зависанием космических аппаратов

Для реализации заданной разновидности ГП необходимо найти такой закон изменения во времени управляющего ускорения, который обеспечит бы требуемую программную траекторию, то есть заданный закон изменения

вектора относительного состояния в ОСК. Приступая к разработке такой программы, следует учесть ряд необходимых условий, которым должны удовлетворять закон изменения управляющего ускорения, соответствующий ей закон изменения вектора относительного состояния, а также сама динамическая модель ГП, которая будет использоваться при разработке. Эти условия делятся на краевые и ограничивающие. Первым из них должен удовлетворять вектор относительного состояния в начальной и конечной точках ГП. Значение этих условий зависит от выполняемой разновидности ГП.

Ограничивающие условия могут быть трех основных видов. Первый вид характеризует различные ограничения, накладываемые на динамическую модель ГП, которая используется при разработке программы управления. Эти ограничения могут быть обусловлены двумя основными причинами: стремлением упростить модель за счет пренебрежения второстепенными факторами, влияющими на ГП; невозможностью учета в модели некоторых факторов, в ряде случаев, оказывающих даже существенное влияние на ГП, из-за отсутствия информации о характере этого влияния.

Ко второму виду ограничивающих условий относятся ограничения по предельно допустимым значениям основных характеристик качества управления ГП, а также ограничения, накладываемые на компоненты вектора относительного состояния на программной траектории. Частным случаем последних являются ограничения на вид программной траектории ОД, с которыми приходится часто встречаться при разработке программ управления ГП. Например, при осуществлении облёта ПА на постоянной дальности траектория ОД должна представлять собой отрезок окружности.

Третий вид ограничивающих условий определяет принадлежность закона изменения управляющего ускорения к классу непрерывных, кусочно-непрерывных или импульсных функций времени. К этому виду ограничивающих условий относятся ограничения на возможное или допустимое число импульсов управления в случае использования импульсной или дискретной управляющей силы.

Закон изменения вектора относительного состояния и обеспечивающий его закон изменения управляющего ускорения, найденные таким образом, что они удовлетворяют выбранной динамической модели и заданным краевым и ограничивающим условиям, будем называть соответственно допустимой программной траекторией и допустимой программой управления ГП. Так как каждой задаче, выполняемой в процессе ГП, соответствуют различные краевые и ограничивающие условия, то для её решения могут быть использованы и различные методы программного управления, под которыми будем понимать выбранные допустимые законы ОД АА. В основу классификации этих методов могут быть положены различные признаки, но наиболее

удобно использовать в качестве них три вида ограничивающих условий, накладываемых на законы изменения управляющего ускорения и вектора относительного состояния, а, следовательно, и на метод программного управления.

В зависимости от типа ограничений, накладываемых на динамическую модель ГП, используемую при разработке программы управления, все возможные методы могут быть разделены на методы управления, учитывающие закономерности движения в гравитационном поле планеты и методы управления, не учитывающие эти закономерности.

В зависимости от типа ограничений, накладываемых на компоненты вектора \vec{q} на программной траектории, эти же методы можно подразделить на методы без ограничений и с ограничениями на вид программной траектории.

В зависимости от вида управляющих воздействий, используемых для осуществления ГП, все эти методы можно разделить на импульсные (дискретные), непрерывные, комбинированные. В импульсных (дискретных) методах управляющие воздействия дискретны во времени (имеют вид дельта-импульсов или импульсов достаточно малой по сравнению с временем ГП длительности), в непрерывных они являются непрерывными функциями времени, а в комбинированных методах используются оба вида управляющих функций.

Методы дискретного и непрерывного управления используются при отсутствии ограничений на вид траектории ОД. При наличии этих ограничений принципиально необходимо непрерывное управление. Однако здесь представляется целесообразным применение также и комбинированного управления. Это допустимо в тех случаях, когда ограничения относятся лишь к какой-либо одной составляющей (например, поперечной или продольной) полного ОД и, следовательно, для управления другой составляющей может быть использован дискретный вид управляющих воздействий.

Несколько особым признаком классификации методов ГП является тип ограничений по основным показателям качества управления маневром. При практической разработке программ управления ГП лишь в некоторых случаях краевые и ограничивающие условия задаются такими, что допустимые законы изменения управляющего ускорения и вектора относительного состояния определяются однозначно. В большинстве случаев эти условия определяют лишь принадлежность данных законов к целому классу допустимых функций. Следовательно, имеется возможность выбрать в этом классе такие законы изменения управляющего ускорения и вектора относительного состояния, которые оказались бы наиболее желательными с точки зрения тех или иных показателей качества управления ГП. Законы изменения вектора относительного состояния и управляющего ускорения, найденные таким образом, называются соответственно оптимальной программной траекторией и оптимальной программой управления, а показатели качества,

достигающие для этих функций экстремальных значений — критериями оптимальности. В зависимости от того, какой показатель качества должен принять экстремальное значение, можно выделить методы управления, оптимальные по ЭЗ, по быстродействию или по точности выполнения заданной разновидности ГП.

Отыскание оптимальных программ управления представляет собой весьма сложную проблему. Ее решение базируется на методах теории оптимального управления, фундамент которой составляют классическое вариационное исчисление, принцип максимума, динамическое программирование, а также современные алгоритмические методы численной оптимизации. Однако, несмотря на большие успехи, достигнутые в последние годы в области дальнейшей разработки и совершенствования этой теории, опыт практического решения задач управления движением КА показывает, что даже при наличии ряда существенных упрощений алгоритмы расчета оптимальных программ, как правило, оказываются очень сложными. Кроме того, сам вид оптимальной траектории зачастую получается сложным с точки зрения ее технической реализации. Тем не менее оптимальные методы управления имеют большую практическую ценность даже в тех случаях, когда не представляется возможность их реализовать. Она заключается в том, что определив оптимальную программу, можно дальнейшую работу проводить следующим образом: разработать ряд методов и соответствующих им программ управления, которые были бы наиболее просты с точки зрения их технической реализации, а затем уже из них выбрать такой метод и такую программу, которые окажутся наиболее близки по заданному показателю качества к оптимальному. Поэтому на практике обычно нет необходимости отыскивать абсолютно оптимальную программу ГП, а целесообразно стремиться разработать ее, близкой к оптимальной, но более простой в технической реализации.

Отличительной чертой зависания как разновидности ГП является выполнение условия $\vec{q} = \vec{q}_0$ в течение всего периода времени $T = \tau_k - \tau_0$, где τ_0 и τ_k — моменты начала и окончания ГП, причем $\vec{R} = \vec{R}_0$, а $\vec{V} = 0$. Таким образом, при осуществлении данной разновидности ГП обеспечивается неизменность относительного положения аппаратов, то есть АА как бы зависит относительно ПА в некоторой точке, отстоящей от ПА на расстоянии R_0 и имеющей постоянные угловые координаты α_0, β_0 . Необходимость такого положения может возникнуть при решении задач опознавания космических объектов, осуществления стыковки с орбитальными станциями, оборудованными несколькими стыковочными узлами, спасения экипажей пилотируемых КА в аварийных ситуациях и т.д. [6].

Исследование динамики движения КА при осуществлении зависания целесообразно проводить в относительной системе координат (ОСК), по осям

которой осуществляется ориентация строительных осей ПА. Довольно часто в качестве такой системы используется невращающаяся ОСК, направление осей которой связано с фиксированным направлением в инерциальном пространстве. Дифференциальные уравнения, описывающие динамику движения КА в этой ОСК, могут быть записаны в векторно-матричной форме в виде [6, 8]

$$d\vec{R}/d\tau = \vec{V}, \quad d\vec{V}/d\tau = A\vec{R} + B\vec{V} + \vec{U}, \quad (1)$$

где $\vec{U} = \vec{P}/m$ — управляющее ускорение, \vec{P} — управляющее воздействие, m — масса АА, $A = [a_{ij}]_{3 \times 3}$, $B = [b_{ij}]_{3 \times 3}$ — квадратные матрицы третьего порядка, вид которых определяется типом орбиты ПА.

Для осуществления зависания АА в заданной точке фазового пространства координат \vec{R}_0 необходимо обеспечить с помощью управляющих воздействий краевые условия $\vec{R}(\tau) = \vec{R}_0$, $\vec{V}(\tau) = 0$. Подставив эти условия в уравнения (1), получим вектор-функцию управления, обеспечивающую решение поставленной задачи

$$\vec{U}_T = -A\vec{R}_0. \quad (2)$$

Энергетические затраты (ЭЗ) на реализацию управления (2) будут определяться соотношением

$$V_p = \int_0^T |\vec{U}_T| d\tau \quad (3)$$

или

$$Y = \int_0^T U^2(\tau) d\tau. \quad (4)$$

В случае, когда орбита ПА, с которым связано начало ОСК, близка к круговой, а в качестве независимой переменной выбрано безразмерное время $\tau = \omega_n t$, где ω_n — угловая скорость обращения ПА вокруг центра планеты, а t — реальное время, то управляющие функции, обеспечивающие зависание в заданной точке невращающейся ОСК, определяются из общего соотношения (2), если подставить туда значения элементов матрицы А для данной ОСК [6]. В результате получим:

$$\begin{aligned} U_x &= [1 - 3 \cos^2 \alpha \sin^2(\tau - \beta)] x_0, \\ U_y &= [1 - 3 \cos^2(\tau - \beta)] x_0, \\ U_z &= -1,5 \sin 2\alpha \sin^2(\tau - \beta) x_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, управления здесь представляют собой непрерывные функции времени, в которых координаты точки зависания играют роль параметров. ЭЗ на осуществление зависания определяются в результате подстановки управлений (5) в соотношения (3, 4). Выполнив это, получим, что в компланарном случае расход характеристической

скорости определяется значением эллиптического интеграла $V_{p1} = x_0 \int_0^T [1 + 3 \sin^2(\tau - \beta)]^{1/2} d\tau$, который может быть приведен к линейной комбинации интеграла от элементарных функций и эллиптического интеграла второго рода $E(\gamma, k)$, имеющей вид

$$\begin{aligned} V_{p1} &= x_0 [2E(\gamma; 0,866) - \\ &- 3 \sin 2(\tau - \beta) / 2 \sqrt{1 + 3 \sin^2(\tau - \beta)}] \Big|_0^T, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\gamma = \arcsin [2 \sin(\tau - \beta) / \sqrt{1 + 3 \sin^2(\tau - \beta)}]$.

Квадратичный показатель ЭЗ согласно соотношению (4)

$$Y = x_0^2 [2,5T - 1,5 \sin T \cos(T - 2\beta)]. \quad (7)$$

Анализ соотношений (6, 7) показывает, что здесь ЭЗ растут с увеличением дальности и времени зависания. Оптимальное угловое положение точки зависания, найденное из условия $\partial Y / \partial \beta = 0$, $\beta_s = T/2 \pm k\pi/2$, ($k = 0 \dots 3$). Таким образом, если $T < 2\pi$, то при заданном времени зависания для уменьшения ЭЗ желательно осуществлять его в точке, лежащей под углом β , численно равным половине этого времени. ЭЗ при оптимальном угловом положении точки зависания

$$V_{ps} = x_0 [4E(\gamma_T; 0,866) - 3 \sin T / \sqrt{1 + 3 \sin^2 T/2}],$$

$$Y_s = 2,5T - 1,5 \sin T,$$

где $\gamma_T = \arcsin [2 \sin T/2 / \sqrt{1 + 3 \sin^2 T/2}]$. Из соотношений (6, 7) также следует, что при $T = k\pi$, где $k = 1, 2, \dots, n$, ЭЗ не зависят от углового положения точки зависания и составляют соответственно $V_{p1} = 8E(\pi/2; 0,866)x_0 \approx 9,68x_0$ и $Y = 5\pi x_0^2$ на один виток ПА, где $E(\pi/2; 0,866) \approx 1,211$ — полный эллиптический интеграл второго рода.

Таким образом, для обеспечения зависания АА строго в заданной точке с координатами \vec{R}_0 , в состав двигательной установки (ДУ) управления движением центра масс АА должны входить, если пренебречь изменением массы АА в процессе маневра, двигатели переменной тяги, работающие в непрерывном режиме. Такой режим, а также связанные с ним повышенные ЭЗ являются недостатком рассмотренного метода управления зависанием. Поэтому представляют интерес методы, в которых данное управление осуществляется с помощью двигателей, работающих в дискретном (импульсном) режиме, тем более что во многих случаях нет необходимости жестко фиксировать положение АА в заданной точке зависания.

Исследования показывают, что если ослабить эти ограничения, то есть допустить некоторую свободу

перемещения АА относительно данной точки, то это позволит использовать импульсное управление и снизить требуемые ЭЗ. При таком управлении необходимо удерживать АА в некоторой зоне относительно точки зависания, размеры которой ограничены и имеют достаточно малую величину. Реализовать это можно, если использовать для управления зависанием такую разновидность ГП как барражирование относительно заданной опорной точки. Характерной ее особенностью является то, что АА периодически через время T , называемое периодом барражирования, должен возвращаться в заданную опорную точку фазового пространства состояний, характеризуемую значением вектора \vec{q} . При небольших отклонениях АА такая разновидность барражирования может рассматриваться как разновидность зависания около данной опорной точки.

Зависание в невращающейся ОСК может рассматриваться как частный случай облета ПА в орбитальной (вращающейся) ОСК, когда облет происходит на постоянной дальности R_0 и с постоянной угловой скоростью $\dot{\beta} = -1$, равной по величине и противоположной по знаку угловой скорости обращения ПА вокруг планеты. Поэтому алгоритмы дискретного управления барражированием относительно опорной точки, заданной в невращающейся ОСК, могут быть получены из алгоритмов дискретного управления облетом [7], если принять там $B/n = -T$. В результате будем иметь следующие выражения для составляющих i -ого программного приращения скорости $\Delta \vec{V}_i$ в опорной точке

$$\Delta \dot{x}_i = -K \cos \beta_i, \quad \Delta \dot{y}_i = 2K \sin \beta_i, \quad (8)$$

где $K = \gamma_1 \gamma_2 / D$, $\gamma_1 = \sin T$, $\gamma_2 = 2(1 - \cos T)$, $D = 3T\gamma_1 - 4\gamma_2$.

Составляющие требуемой начальной скорости \vec{V}_{iT} в этой точке

$$\dot{x}_{iT} = a_{11} \cos \beta_i + a_{12} \sin \beta_i, \quad \dot{y}_{iT} = a_{21} \cos \beta_i + a_{22} \sin \beta_i,$$

где $a_{11} = -0,5\gamma_1 \gamma_2 / D$, $a_{12} = (\gamma_1^2 + 2D) / D$,

$$a_{21} = -1 - 0,5\gamma_2^2 / D, \quad a_{22} = -2a_{11}.$$

Законы изменения координат во вращающейся ОСК после приложения i -ого приращения скорости

$$x_i = x_{oi} + y_{oi} 6(\tau - \sin \tau) + \dot{x}_{iT} (4 \sin \tau - 3\tau) + 2\dot{y}_{iT} (1 - \cos \tau),$$

$$y_i = y_{oi} (4 - 3 \cos \tau) - 2\dot{x}_{iT} (1 - \cos \tau) + \dot{y}_{iT} \sin \tau,$$

где $x_{oi} = R_0 (\cos \beta_0 \cos iT + \sin \beta_0 \sin iT)$,

$$y_{oi} = R_0 (\sin \beta_0 \cos iT + \cos \beta_0 \sin iT).$$

Эти же законы в невращающейся ОСК имеют вид

$$x_{Hi} = x_i \cos \tau - y_i \sin \tau, \quad y_{Hi} = x_i \sin \tau + y_i \cos \tau.$$

Величина i -ого корректирующего импульса при полетном управлении

$$\Delta V_i = (\Delta \dot{x}_i^2 + \Delta \dot{y}_i^2)^{1/2} = R_0 \gamma_1 \gamma_2 [10 - 6 \cos 2(iT + \beta_0)]^{1/2} / 2D,$$

а его направление в невращающейся ОСК $\tan \beta_{\Delta i} = -2 \tan \beta_i$. ЭЗ на виток ПА

$$V_{\text{пв}} = R_0 \gamma_1 \gamma_2 \sum_{i=0}^n [10 - 6 \cos 2(iT + \beta_0)]^{1/2} / 2D.$$

Результаты расчета величины $V_{\text{пв}} \rightarrow \bar{V}_{\text{пв}} = V_{\text{пв}} / R_0$ показывают, что она практически не зависит от углового положения опорной точки и уменьшается, как это видно из рис. 1, с увеличением периода T .

При $T = \pi$ траектория барражирования в невращающейся ОСК превращается в неподвижную относительно начала ОСК окружность свободного движения, центр которой имеет координаты $x_{\text{ц0}} = 0,75x_0$, $y_{\text{ц0}} = 1,5y_0$, а радиус $r = 0,75(x_0^2 + 4y_0^2)^{1/2}$. Уравнение этой окружности в параметрическом задании имеет вид

$$\begin{aligned} x_{\text{H}} &= 0,5x_0(1 + \cos^2 \tau) + y_0 \sin \tau \cos \tau = x_{\text{ц0}} + r \cos \Psi, \\ y_{\text{H}} &= 0,5x_0 \sin \tau \cos \tau + y_0(1 + \sin^2 \tau) = y_{\text{ц0}} + r \sin \Psi, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Psi = \frac{3\pi}{2} + 2\tau + \arctan\left(\frac{x_0}{2y_0}\right)$ — угол, образованный подвижным радиусом r с положительным направлением оси x_{H} . Период движения изображающей точки по этой

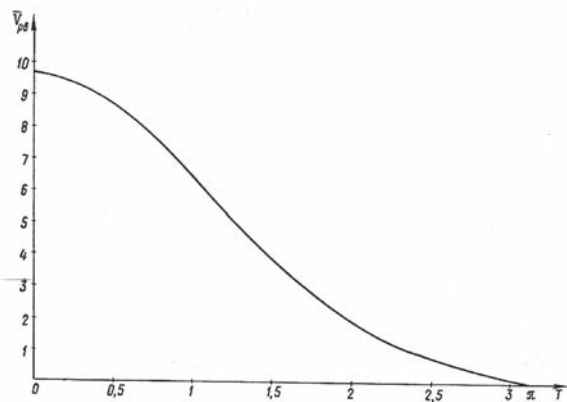


Рис. 1. Зависимость энергетических затрат на выполнение маневра от периода барражирования T

окружности равен половине периода обращения ПА, то есть $T = \pi$. Начальные скорости, требуемые для полета по траектории (9) $\dot{x}_{\text{НОТ}} = y_0, \dot{y}_{\text{НОТ}} = 0,5x_0$. Размеры зоны барражирования в полярных координатах $\Delta\beta = 2 \arcsin \frac{1}{3}$, $\Delta\bar{R} = \Delta R / R_0 = 0,5(1 + 3 \sin^2 \beta_0)^{1/2}$.

Таким образом, здесь для уменьшения ЭЗ желательнее увеличивать период T , но при этом нужно учитывать возрастание размеров зоны барражирования. На рис. 2, 3 изображена зависимость этих размеров в пределах одного цикла барражирования от периода T для различных углов β_0 , а на рис. 4-8 вид траекторий в невращающейся

ОСК за время одного оборота ПА для ряда значений T в диапазоне $\pi/4 \dots \pi$ при различном угловом положении опорной точки β_0 и неизменной дальности до нее R_0 . Цифрами 0,1,...,7 на рис. 4-8 обозначены траектории АА после приложения начального и всех последующих импульсов управления. Видно, что в отличие от траекторий барражирования во вращающейся ОСК, которые имеют неизменную ориентацию относительно осей данной ОСК, здесь ориентация траекторий за исключением случая $T = \pi$ изменяется от одного цикла барражирования к другому и зависит от углового положения опорной точки, а также от периода T .

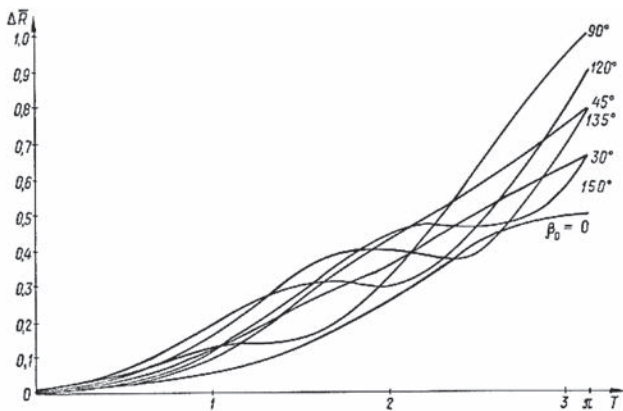


Рис. 2. Зависимость линейных размеров зоны барражирования от периода T

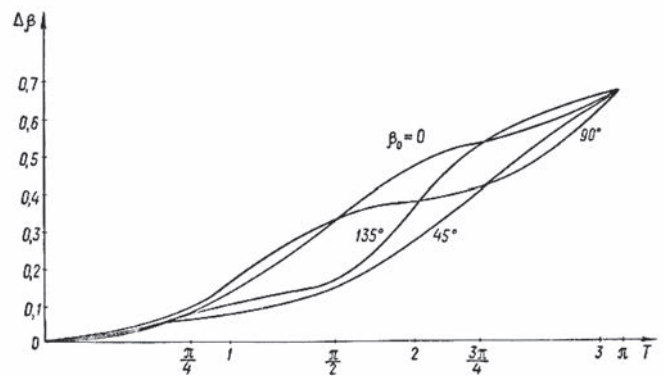


Рис. 3. Зависимость угловых размеров зоны барражирования от периода T

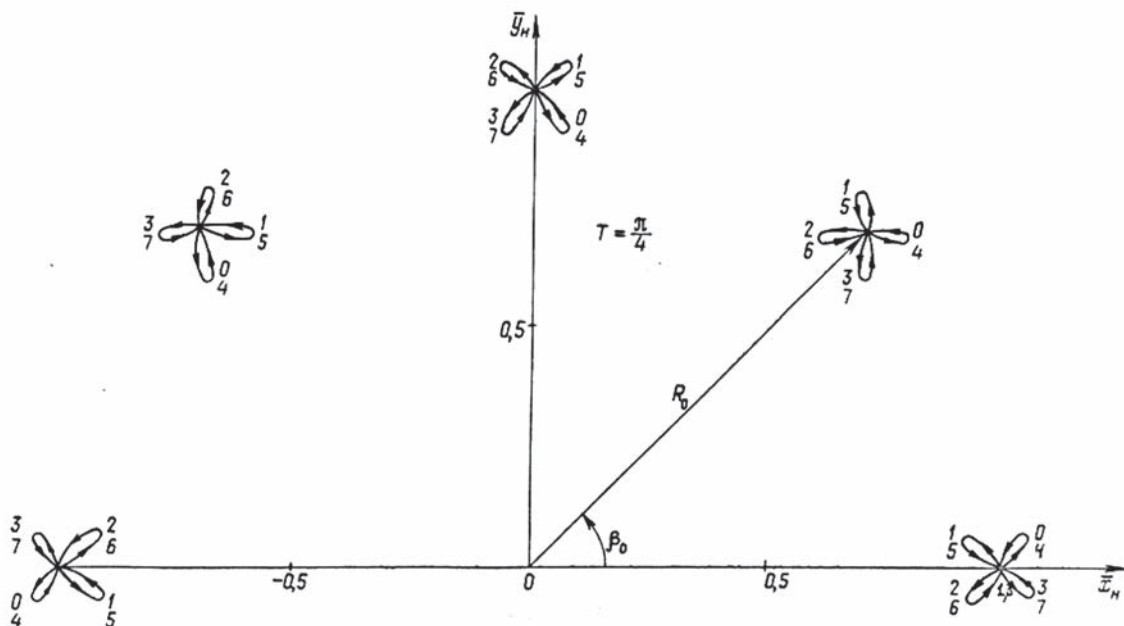


Рис. 4. Вид траекторий барражирования при $T = \pi/4$

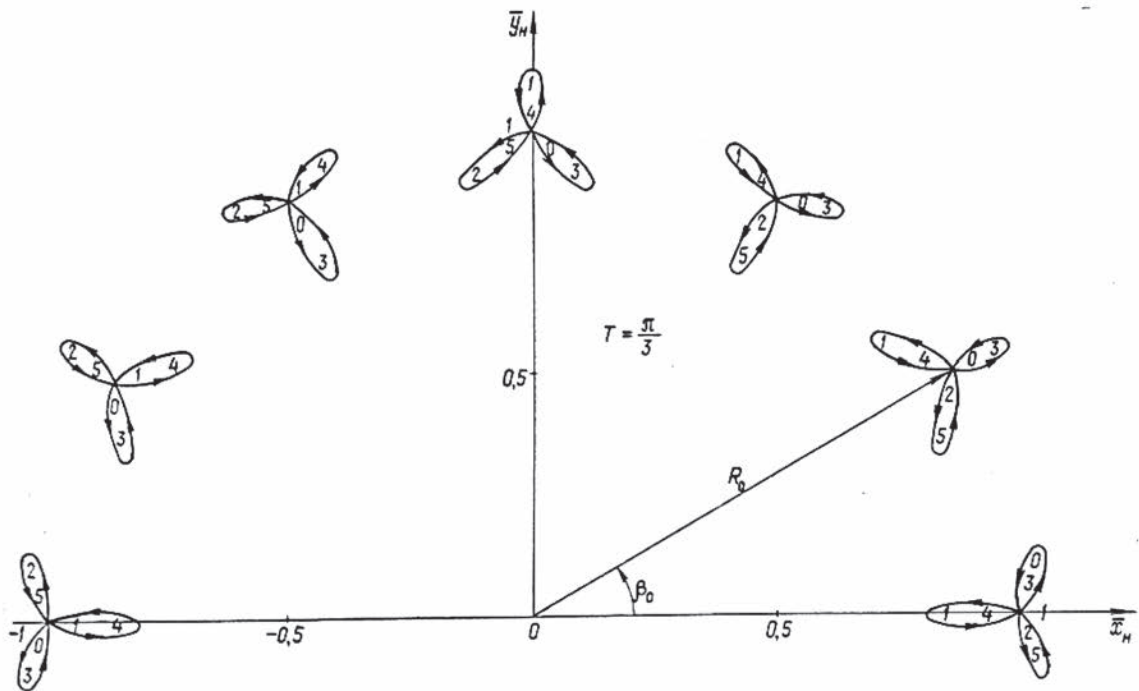


Рис. 5. Вид траекторий барражирования при $T = \pi/3$

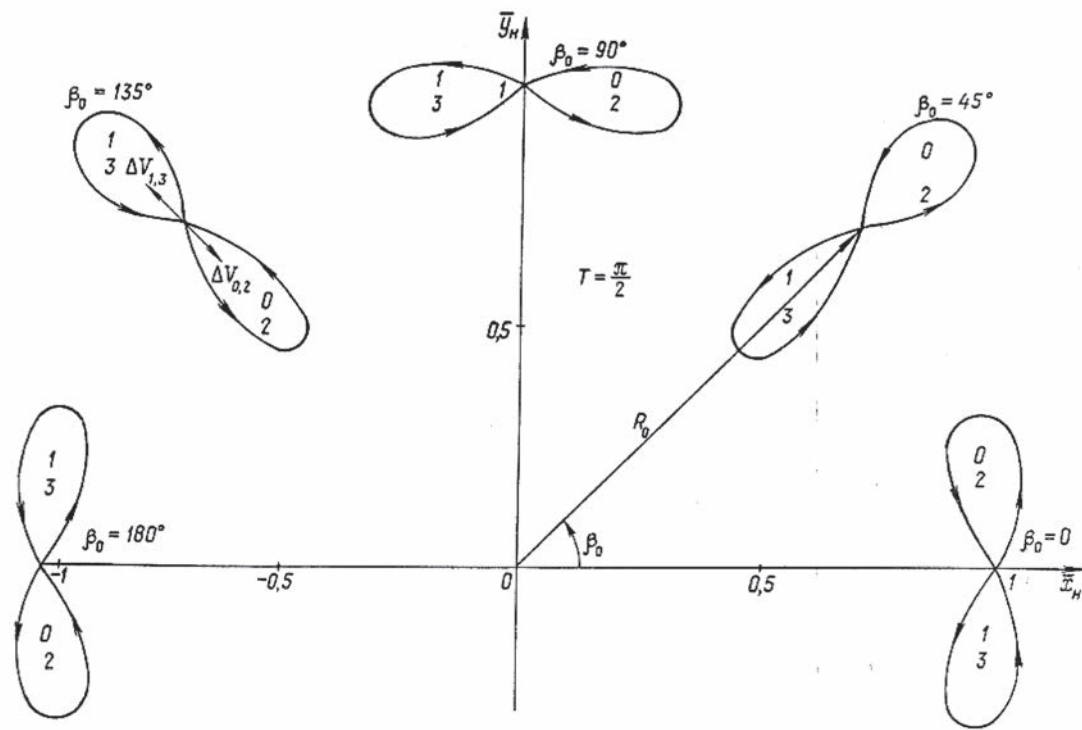


Рис. 6. Вид траекторий барражирования при $T = \pi/2$

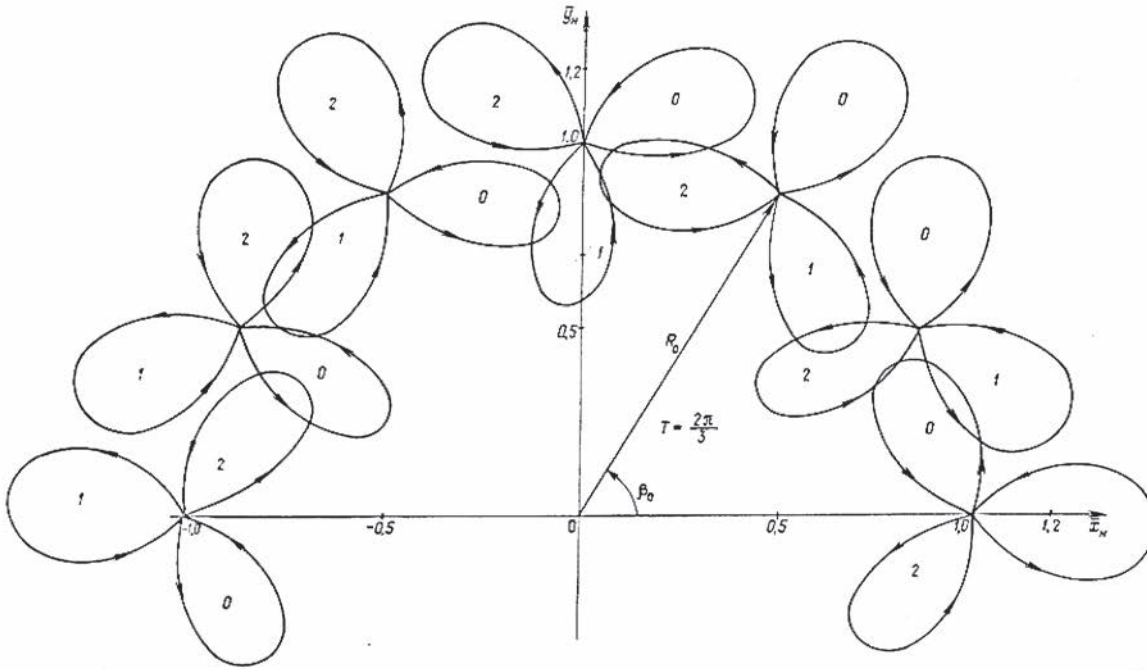


Рис. 7. Вид траекторий барражирования при $T = \pi/4$

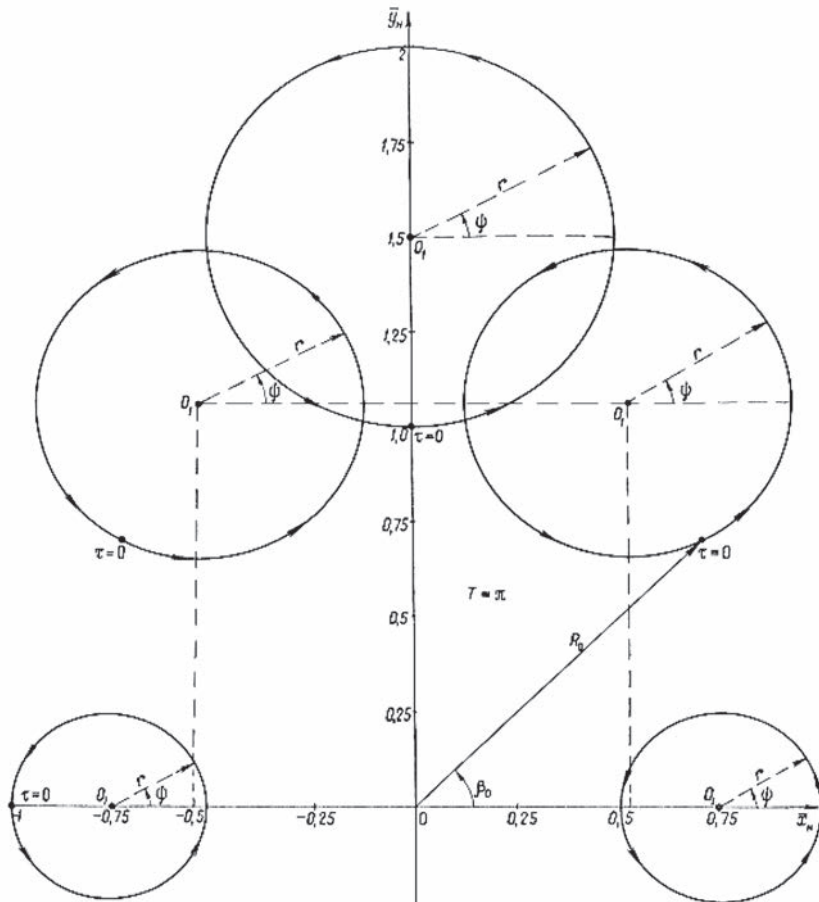


Рис. 8. Вид траекторий барражирования при $T = \pi$

Заклучение

Таким образом, может быть предложена следующая методика использования данных, приведенных на графиках рис. 1–3: задавшись угловым положением опорной точки и допустимыми размерами зоны барражирования, по графикам на рис. 2–3 находим период T , а затем по графику на рис. 1 определяем требуемые ЭЗ, при этом наиболее приемлемые значения T будут в основном лежать в диапазоне $\pi/4 \dots \pi$.

Литература

1. Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г., Ярошевский В.А. Маневрирование космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 416 с.
2. Балахонцев В.Г., Иванов В.А., Шабанов В.И. Сближение в космосе. М.: Воениздат, 1973. 240 с.
3. Баринов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 232 с.
4. Бебенин Г.Г., Скребушевский Б.С., Соколов Г.А. Системы управления полетом космических аппаратов. Машиностроение, 1978. 272 с.
5. Власов С.А., Мамон П.А. Теория полета космических аппаратов. СПб.: Изд-во Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, 2007. 435 с.
6. Гончаревский В.С. Групповой полет космических аппаратов. М.: МО РФ, 2006. 81 с.
7. Гончаревский В.С. Импульсное управление облетом космических аппаратов // Информация и Космос. 2012. № 2. С. 72-76.
8. Гончаревский В.С. Методы и алгоритмы управления относительным маневром космических аппаратов. М.: МО РФ, 1998. 87 с.
9. Ермилов Ю.А., Иванова Е.Е., Пантюшин С.В. Управление сближением космических аппаратов. М.: Наука, 1977. 448 с.
10. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2016. 523 с.
11. Кравец В.Г. Автоматизированные системы управления космическими полетами. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
12. Кубасов В.Н., Данков Г.Ю., Яблонько Ю.П. Методы сближения на орбите. М.: Машиностроение, 1985. 184 с.
13. Лебедев А.А., Соколов В.Б. Встреча на орбите. М.: Машиностроение, 1969. 366 с.
14. Пономарев В.М. Теория управления движением космических аппаратов. М.: Наука, 1965. 456 с.
15. Разыграев А.П. Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей. М.: Машиностроение, 1977. 472 с.
16. Титов Г.С., Иванов В.А., Горьков В.Л. Межорбитальные локальные маневры космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 245 с.

CONTROL OF HOVERING SPACECRAFT IN NON-ROTATING RELATIVE COORDINATE SYSTEM

VILEN S. GONCHAREVSKIJ

St. Peterbug, Russia, vilenstepan@yandex.ru

SERGEY V. ZINOVIEV

St. Peterbug, Russia, Zinoviev_SV@mail.ru

KEYWORDS: formation flying; hovering spacecraft; control methods hanging; loitering spacecraft; the relative coordinate system.

ABSTRACT

The methods of control of hovering spacecraft active is a relatively passive system, construction line which is in the inertial space fixed position. In the case when in the system of orientation and angular stabilization of the passive system as the reference frame used a non-rotating relative coordinate system.

Hang one space vehicle relative to one another is one of the varieties of the group flight orbital objects in space. Under group flight is controlled relative motion of two or more SPACECRAFT, in which the

relative distance between them is either not changed or changed by a law in some quite limited extent, and, moreover, this distance remains significantly smaller their distance to the center of the planet.

A distinctive feature of hovering as a kind of group flight is to ensure that all times during this flight, the condition of invariance of position spacecraft active in the relative coordinate system with the origin at the center of mass passive system. The need for such a situation may arise when the task of identification of space objects, the implemen-

tation of docking with space stations with multiple docking ports, rescue the crews of manned SPACECRAFT in emergency situations, etc. are found In work control actions necessary for the implementation of spacecraft active in the non-rotating hovering relative coordinate system. They are continuous-time functions in which the coordinates of the point of unresponsiveness play a role of parameters. The obtained relations for estimating energy in the implementation of these control actions. It is shown that at any given time hovering to reduce estimating energy it is advisable to perform it at a point lying in the relative coordinate system at an angle numerically equal to one-half of the time.

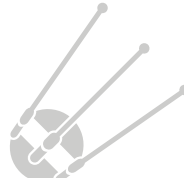
REFERENCES

1. Alekseev K.B., Bebenin G.G., Jaroshevskij V.A. *Manevrirovanie kosmicheskikh apparatov* [Maneuvering spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1970. 416 p. (In Russian)
2. Balahoncev V.G., Ivanov V. A., Shabanov V.I. *Sblizhenie v kosmose* [Rendezvous in space]. Moscow: Voenizdat, 1973. 240 p. (In Russian)
3. Barinov K.N., Burdaev M.N., Mamon P.A. *Dinamika i principy postroenija orbital'nyh sistem kosmicheskikh apparatov* [Dynamics and the principles of orbital systems of spacecraft's]. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 232 p. (In Russian)
4. Bebenin G.G., Skrebushevskij B.S., Sokolov G.A. *Sistemy upravleniya poletom kosmicheskikh apparatov* [The flight control system of the spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 272 p. (In Russian)
5. Vlasov S.A., Mamon P.A. *Teoriya poleta kosmicheskikh apparatov* [The theory of flight of spacecraft's]. St. Petersburg: Voenno-kosmicheskaya akademiya imeni A.F.Mozhajsokogo Publ., 2007. 435 p. (In Russian)
6. Goncharevskij V.S. *Grupповой polet kosmicheskikh apparatov* [Formation flying of spacecraft]. Moscow: The Ministry of defence of the Russian Federation, 2006. 81 p. (In Russian)
7. Goncharevskij V.S. *Impulse control flyby spacecraft. Informatsiya i kosmos* [Information and Space]. 2012. No. 2. Pp. 72-76. (In Russian)
8. Goncharevskij V.S. *Metody i algoritmy upravleniya odnositel'nyim manevrom kosmicheskikh apparatov* [Methods and algorithms to control the relative maneuver of the spacecraft]. Moscow: The Ministry of defence of the Russian Federation, 1998. 87 p. (In Russian)
9. Ermilov Yu.A., Ivanova E.E. *Pantyushin S.V. Upravleniye sblizheniyem kosmicheskikh apparatov* [Control rendezvous of the spacecraft]. Moscow: Nauka, 1977. 448 p. (In Russian)
10. Ivanov N.M., Lysenko L.N. *Ballistika i navigatsiya kosmicheskikh apparatov* [Ballistics and navigation of spacecraft's]. Moscow: MGТУ imeni N.E.Baumana Publ., 2016. 523 p. (In Russian)
11. Kravets V.G. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya kosmicheskimi poletami* [Automated control systems of space flight]. Moscow: Mashinostroenie, 1995. 256 p. (In Russian)
12. Kubasov V.N., Dankov G.Yu., Yablonko Yu.P. *Metody sblizheniya na orbite* [Methods of rendezvous in orbit]. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 184 p. (In Russian)
13. Lebedev A.A., Sokolov V.B. *Vstrecha na orbite* [Rendezvous in orbit]. Moscow: Mashinostroenie, 1969, 366 p. (In Russian)
14. Ponomarev V.M. *Teoriya upravleniya dvizheniyem kosmicheskikh apparatov* [The theory of motion control of spacecraft]. Moscow: Nauka, 1965. 456 p. (In Russian)
15. Razygrayev A.P. *Osnovy upravleniya poletom kosmicheskikh apparatov i korably* [The basics of flight control of space vehicles and ships]. Moscow: Mashinostroenie, 1977. 472 p. (In Russian)
16. Titov G.S., Ivanov V.A., Gorkov V.L. *Mezhorbitalnyye lokalnyye manevry kosmicheskikh apparatov* [Local orbital transfer maneuvers of the spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1982. 245 p. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Goncharevskij V.S., PhD, Full Professor, Professor of the Military Space Academy;
Zinoviev S.V., PhD, Docent, Head of the Department of the Military Space academy.

For citation: Goncharevskij V. S., Zinoviev S.V. Control of hovering spacecraft in non-rotating relative coordinate system. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 5. Pp. 4-14. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10161 (In Russian)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10162

Методический аппарат обоснования рационального варианта комплекса средств измерений, сбора и обработки измерительной информации в соответствии с потребностями обеспечения летных испытаний изделий ракетно-космической техники и ракетного вооружения

КУИМОВ

Андрей Владимирович

АННОТАЦИЯ

Проведены исследования, направленные на обоснование рационального варианта комплекса средств измерений, сбора и обработки информации в соответствии с потребностями обеспечения летно-конструкторских испытаний изделий ракетно-космической техники и ракетного вооружения, в ходе которых комплекс средств рассматривается как информационно-измерительная техническая система. Определены общие элементы, составляющие содержание его функционирования, которые представляют собой совокупность согласованных информационных процессов выполняемых техническими средствами и определяют структурно-функциональную декомпозицию системы. Обосновано модульное построение методического аппарата обоснования варианта формирования комплекса средств измерений, сбора и обработки, что обеспечивает достаточную автономность проведения исследований по обоснованию вариантов подсистем, а также необходимую взаимосвязь (по входным и выходным параметрам) при их объединении в последовательные схемы исследований. Предложенный методический аппарат включает три взаимосвязанные частные методики: методику обоснования рациональной конфигурации подсистемы измерений; методику обоснования рациональной конфигурации подсистемы обработки и анализа измерительной информации; методику обоснования рациональной конфигурации подсистемы информационного обмена. Частные методики предназначены для поиска рациональных значений варьируемых параметров подсистем комплекса средств измерений, сбора и обработки и направлены на обеспечение выполнения критериев показателей качества, наиболее полно соответствующих целям функционирования соответствующих подсистем и потребностям информационного обеспечения летно-конструкторских испытаний изделий ракетно-космической техники и ракетного вооружения. На базе разработанного методического аппарата проведены прикладные исследования, имеющие своей целью определить рациональный вариант комплекса средств для конкретно заданных условий и исходных данных проведения информационного обеспечения пуска и полета изделий ракетно-космической техники и ракетного вооружения и оценку их результатов. Прикладные исследования на основе данных реального пуска показали преимущества предложенного подхода формирования комплекса средств по сравнению с существующим, при этом обеспечены неразрывный прием всего объема информации с борта изделия и непрерывная доставка требуемой для контроля полета изделия информации меньшими затратами ресурсов средств приема и передачи информации.

Сведения об авторе:

начальник испытательного отдела
войсковой части 32103,
г. Краснознаменск, Московская обл., Россия,
82m_proton@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система; рациональный вариант; декомпозиция; показатель; критерий; параметры; поиск.

Для цитирования: Куимов А. В. Методический аппарат обоснования рационального варианта комплекса средств измерений, сбора и обработки измерительной информации в соответствии с потребностями обеспечения летных испытаний изделий ракетно-космической техники и ракетного вооружения // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 5. С. 15-25. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10162

Введение

Отечественный и зарубежный опыт создания изделий ракетно-космической техники (РКТ) и ракетного вооружения (РВ) показывает, что на уровень их качества влияют работы на всех этапах жизненного цикла, однако его основы закладываются совокупностью экспериментальных и испытательных работ на этапах наземной и летной отработки в ходе выполнения опытно-конструкторских работ [1, 2]. Ключевое место в процессе создания изделий РКТ и РВ отводится летно-конструкторским испытаниям (ЛКИ), в ходе которых проводится отработка изделий и их составных частей в реальных условиях функционирования.

В процессе ЛКИ проводится набор и оценка опытных данных по нагрузкам, действующим на изделия при старте и в полете, температурным режимам работы элементов РКТ (РВ), динамике, устойчивости и управляемости движения, точности выведения на заданную орбиту (поражения заданных целей). Практическая реализация данных мероприятий заключается в формировании, сборе, накоплении, обработке и анализе телеметрической информации (ТМИ) и текущих навигационных параметров (ТНП) движения изделий, получаемой при подготовке к пуску, пуске и в полете. Высокая сложность современных и перспективных изделий РКТ и РВ, экстремальные режимы и условия функционирования приводят к необходимости измерений, сбора, обработки и оценки большого числа параметров, характеризующих состояние и режимы работы отдельных агрегатов и изделий в целом. Вместе с тем существующие в настоящее время материально-техническая и научно-методическая базы формирования и применения комплекса средств измерений, сбора и обработки информации (КСИСО) не в полной мере обеспечивают выполнение современных требований к количеству и качеству измерительной информации [3, 4]. Научно-методический аппарат формирования рационального варианта КСИСО, стратегии информационного обеспечения ЛКИ в настоящее время только формируются.

Методический подход к обоснованию рационального варианта КСИСО ЛКИ изделий РКТ и РВ

При проведении исследований, связанных с обоснованием выбора рационального варианта КСИСО в соответствии с потребностями обеспечения ЛКИ изделий РКТ и РВ, КСИСО следует рассматривать как информационно-измерительную техническую систему. Такой подход обуславливается особенностями структурно-функциональных признаков КСИСО и условиями реализации процессов информационно-телеметрического (ИТО) и навигационно-баллистического (НБО) обеспечений пусков РКТ и РВ.

В этом случае КСИСО ЛКИ РКТ и РВ, как техническая система, описывается комплексом взаимосвязанных

и совместно функционирующих измерительных, приемно-передающих, вычислительных и других технических средств, выполняющих единую конечную задачу. Как информационная система, она описывается взаимосвязанной совокупностью информационных процессов и потоков, обеспечивающих потребителей информации, необходимой для выполнения задач контроля полета, анализа тактико-технических характеристик (ТТХ) и оценки технического состояния бортовых систем изделий РКТ и РВ. Как структурно-организованная система, КСИСО ЛКИ изделий РКТ и РВ состоит из ряда подсистем обеспечивающих выполнение сложных измерительно-информационных и управляющих функций, которые в свою очередь состоят из подчиненных элементов более низкого уровня [5–6]. В соответствии с принципами построения сложных многоуровневых иерархических систем составным элементам КСИСО ЛКИ изделий РКТ и РВ отводятся строго определенные функции [7]. КСИСО ЛКИ РКТ и РВ характеризуются, прежде всего, высокой размерностью, множественностью и сложностью зависимостей, прямых и обратных связей материального и информационного типа, иерархичностью, оперативностью реализации процессов ИТО и НБО [8–9].

В ходе реализации системного подхода к обоснованию выбора рационального варианта КСИСО в соответствии с потребностями обеспечения ЛКИ изделий РКТ и РВ должны быть решены следующие основные задачи [10–12]:

- формулировка цели функционирования системы;
- декомпозиция системы на подсистемы и элементы, выявление их функций, выбор параметров, отображающих структуру системы и процессы ее функционирования, установление функциональных связей между параметрами;
- определение параметров входов, параметров состояния, варьируемых параметров системы, параметров, определяющих степень достижения цели функционирования, границ их допустимых значений;
- разработка математической модели функционирования КСИСО;
- анализ потребностей информационного обеспечения ЛКИ, выбор и формирование критерия оценки эффективности процессов функционирования КСИСО ЛКИ изделий РКТ и РВ;
- формирование альтернативных вариантов КСИСО;
- оценка альтернативных вариантов по выбранному критерию с учетом влияния случайных и неопределенных факторов;
- принятие решения о выборе рационального (предпочтительного) варианта КСИСО ЛКИ изделий РКТ и РВ с учетом информации о возможных ситуациях в рамках выполнения ИТО и НБО пусков РКТ и РВ, взаимодействующих системах и т. д.

Следует отметить, что конечной целью проведения ИТО и НБО пусков изделий РКТ и РВ является получение информации о полете испытываемых изделий, функционировании их составных частей, систем и агрегатов на различных участках полета, в том числе в случае возникновения и развития нештатных или аварийных ситуации на борту.

Безусловно, реальное проведение ИТО и НБО при каждом конкретном пуске будет иметь свои специфические особенности. Проведение ИТО и НБО ЛКИ планируется и реализуется, исходя из типа испытываемого изделия РКТ (РВ), комплектации его бортовыми радиотелеметрическими системами (БРТС) и бортовыми средствами измерений текущих навигационных параметров (ИТНП), баллистической схемы полета. Однако, как показывают исследования, можно выделить ряд общих элементов в процессе функционирования КСИСО ЛКИ изделий РКТ (РВ).

Содержание процесса функционирования КСИСО ЛКИ изделий РКТ (РВ) представляет собой совокупность согласованных информационных процессов выполняемых средствами КСИСО, определяющих структурно-функциональную декомпозицию системы [13–15]:

- прием и регистрация ТМИ, измерения ТНП изделия наземными измерительными (приемно-регистрирующими) средствами;
- сбор измерительной информации от наземных средств в центры обработки и анализа измерительной информации;
- обработка измерительной информации изделия РКТ (РВ) и визуализация результатов обработки на средствах коллективного и индивидуального отображения;
- анализ измерительной информации, оценка функционирования бортовых систем, тактико-технических характеристик (ТТХ) изделия РКТ(РВ).

Структурно-функциональной декомпозиции КСИСО позволяет выделить три взаимосвязанные подсистемы:

- подсистему измерений, включающую наземные приемно-регистрирующие средства (НПРС) полных потоков ТМИ с борта изделий РКТ и РВ и средства ИТНП;
- подсистему обработки и анализа измерительной информации, включающую аппаратные и программные комплексы обработки измерительной информации, контроля параметров изделий РКТ (РВ), оценки функционирования бортовых систем;
- подсистему информационного обмена, включающую аппаратно-программные комплексы сбора и передачи информации и каналы связи.

Данный подход обосновывает модульное построение методического аппарата обоснования рационального варианта КСИСО, что обеспечивает достаточную автономность проведения исследований по обоснованию рациональных вариантов подсистем КСИСО, а также необходимую взаимосвязь (по входным и выходным параметрам) при их

объединении в последовательные схемы исследований по обоснованию рационального варианта КСИСО. Кроме того данный подход гармонично вписывается в наметившуюся в настоящее время тенденцию унификации материальной базы КСИСО на основе реконфигурируемых аппаратных и программных средств, в том числе мобильных измерительных пунктов (МИП) контейнерного исполнения.

Структурная схема методического аппарата обоснования рационального КСИСО ЛКИ изделия РКТ (РВ)

В соответствии с принятым методическим подходом, исследования по обоснованию рационального варианта КСИСО заключается в формировании и анализе исходных данных о потребностях в измерительной информации при проведении ЛКИ, информационных потоках на входах КСИСО (измерительная информация изделий), процессах информационного обеспечения ЛКИ в элементах КСИСО, воздействиях факторов внешней среды на элементы КСИСО, определении рациональных вариантов подсистем КСИСО (измерений, информационного обмена, обработки и анализа измерительной информации). Структурная схема исследований по обоснованию рационального варианта КСИСО в соответствии с потребностями информационного обеспечения ЛКИ изделий РКТ и РВ представлена на рис. 1.

Методический аппарат обоснования рационального варианта КСИСО ЛКИ изделий РКТ и РВ представляет собой совокупность взаимосвязанных методик:

- методику обоснования рациональной конфигурации подсистемы измерений;
- методику обоснования рациональной конфигурации подсистемы обработки и анализа измерительной информации;
- методику обоснования рациональной конфигурации подсистемы информационного обмена.

Данные методики предназначены для поиска рациональных значений варьируемых параметров подсистем КСИСО и направлены на обеспечение выполнения критериев показателей качества, наиболее полно соответствующих целям функционирования соответствующих подсистем и потребностям информационного обеспечения ЛКИ изделий РКТ и РВ. Вышеперечисленные методики, базирующиеся на совокупностях математических описаний, составляющих модель функционирования КСИСО, и должны учитывать все факторы, оказывающие существенное влияние на качество функционирования, как отдельных подсистем, так и КСИСО в целом. Структурная схема методического аппарата обоснования рационального варианта КСИСО ЛКИ изделия РКТ (РВ) приведена на рис. 2.

Методика обоснования рациональной конфигурации подсистемы измерений предназначена для обоснования



Рис. 1. Структурная схема исследований по обоснованию рационального варианта КСИСО ЛКИ изделий РКТ (РВ)

предпочтительного варианта размещения МИП в позиционном районе пуска изделия РКТ (РВ) и по трассе полета, а также варианта их комплектации аппаратными и программными средствами. В качестве критериев качества подсистемы измерений целесообразно принять [5, 16]:

– обеспечение непрерывного приема измерительной информации с борта изделия РКТ (РВ) по трассе полета минимальным составом МИП:

$$\bigcup_{M_{ip}} t_m^{zrv} = t^{trp}, \text{ при } M_{ip} \rightarrow \min;$$

– обеспечение полноты прием информации с борта изделия РКТ (РВ) в пределах зон радиовидимости МИП:

$$c_m = \max S(t), \text{ при } t \in t_m^{zrv};$$

где M_{ip} — количество МИП, задействованных в КСИСО;
 t_m^{zrv} — время зоны радиовидимости m -го МИП;
 t^{trp} время полета изделия РКТ (РВ);

c_m — количество комплектов аппаратных средств m -го МИП;

S — количество информационных потоков, излучаемых с борта изделия РКТ (РВ).

Исходными данными, используемыми в методике, являются: данные о формируемых бортовыми средствами измерений изделия РКТ (РВ) информационных потоков ($S(t)$), параметры движения изделия в полете ($\mathbf{x}(t)$). Выходные данные включают: состав (M_{ip}), географические координаты размещения МИП (\mathbf{X}_{ip}), значения зон их радиовидимости (t^{zrv}) и комплектация аппаратными модулями МИП (\mathbf{c}).

Проводимые в методике поисковые процедуры заключаются в определении значений искомых варьируемых параметров (M_{ip} , \mathbf{X}_{ip} , \mathbf{c}), приводящих к решению функциональных зависимостей:

$$t^{zrv} = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{X}_{ip});$$

$$\mathbf{c} = f(t^{zrv}, S(t))$$

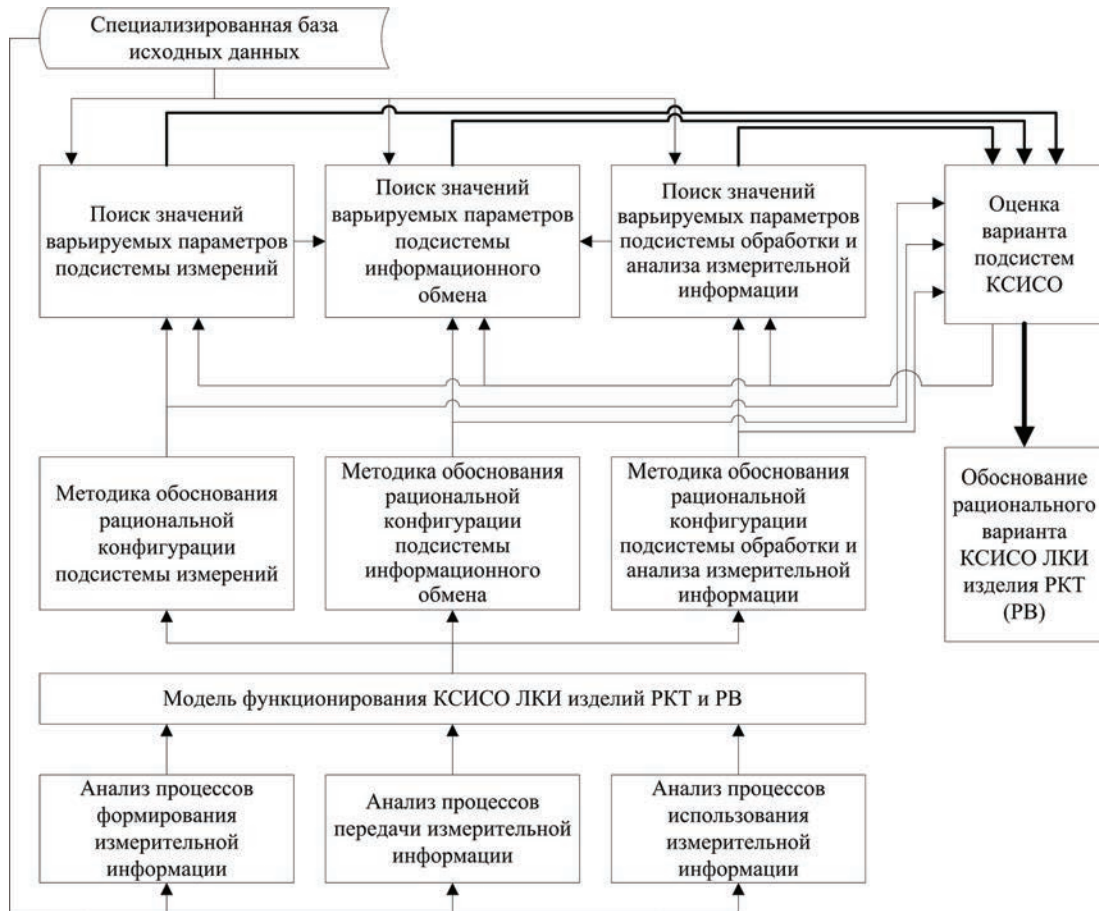


Рис. 2. Структурная схема методического аппарата обоснования рационального варианта KSISO ЛКИ изделия РКТ (РВ)

обеспечивающего выполнение критериев качества подсистемы измерений.

Методика обоснования рациональной конфигурации подсистемы обработки и анализа измерительной информации предназначена для обоснования предпочтительного варианта архитектуры аппаратно-программных средств обработки и анализа измерительной информации, необходимого состава программных модулей. При проведении поисковых процедур следует исходить из того положения, что конфигурация средств обработки и анализа измерительной информации определяется составом измеряемых параметров изделия РКТ (РВ), подлежащих контролю на соответствующем этапе выполнения задач информационного обеспечения пуска и полета. В связи с чем целесообразно формирование двух конфигураций программных средств обработки и анализа измерительной информации: комплекса программных средств реального времени и комплекса программных средств послеполетной обработки и анализа [8].

Конфигурация программных средств послеполетной обработки и анализа измерительной информации определя-

ется полным составом измеряемых параметров изделия, их группировкой в соответствии с типами алгоритмов обработки, заданных в эксплуатационно-технической документации.

Формирование конфигурации программных средств обработки и анализа измерительной информации реального времени следует проводить по критерию обеспечения полного охвата контролем функционирующих составных элементов изделия минимальным составом измеряемых параметров изделия РКТ (РВ) [2, 6]:

$$r_k(t) \rightarrow \min, \text{ при } q_k(t) = q_f(t),$$

где r_k — состав контролируемых параметров изделия РКТ (РВ);

q_k — состав охваченных контролем элементов изделия РКТ (РВ);

q_f — состав функционирующих элементов изделия РКТ (РВ).

Исходными данными, используемыми в методике, являются: данные о составе измеряемых параметров из-

делия РКТ (РВ) ($r(t)$), алгоритмах обработки измеряемых параметров ($a(r)$); данные о составе узлов, систем и агрегатов изделий РКТ (РВ), условий и режимах их функционирования ($q, q_f(t)$), связях измеряемых параметров с составными элементами изделия РКТ (РВ) (Z^{gr}). Выходные данные включают: состав контролируемых параметров изделия ($r_k(t)$), состав и структуру программных модулей обработки и анализа измерительной информации (\mathbf{m}_{pk}).

Проводимые поисковые процедуры определения конфигурации программных средств реального времени заключаются в определении значений искомым варьируемых параметров ($r_k(t)$), приводящих к решению функциональной зависимости

$$q_k(t) = f(r_k(t), Z^{gr}),$$

обеспечивающего выполнение принятого критерия качества подсистемы обработки и анализа измерительной информации с последующей группировкой измеряемых контролируемых параметров по типам алгоритмов обработки и определением состава программных модулей

$$\mathbf{m}_{pk} = f(r_k, a(r)).$$

Методика обоснования рациональной конфигурации подсистемы информационного обмена предназначена для обоснования предпочтительного варианта используемых в подсистеме каналов передачи информации и потребного ресурса пропускной способности. В качестве критериев качества подсистемы информационного обмена целесообразно принять:

— обеспечение непрерывного сбора измерительной информации от МИП:

$$\bigcup_{M_{ip}} (t_{m_{ip}}^{zrv} \cap t_{m_{ip}}^{kls}) = \bigcup_{M_{ip}} t_{m_{ip}}^{zrv};$$

— обеспечение доставки необходимой для контроля состояния изделия РКТ (РВ) информации при минимальном составе задействуемых ресурсов средств передачи информации:

$$v(m_{ip}) = \max_{r_k(t)} \sum \mu \cdot f_r(t), \text{ при } t \in t_m^{zrv};$$

$$L \rightarrow \min, V = \max_{m^{kls}(t)} \sum v(m_{ip}) \rightarrow \min,$$

$$\text{при } t_i^{kls} \cap t_j^{kls} \neq \emptyset, i \neq j,$$

где $t_{m_{ip}}^{kls}$ — время коммутации m -го МИП в каналы передачи информации;

m^{kls} — количество МИП коммутированных в каналы передачи информации;

$v(m_{ip})$ — пропускная способность канала передачи информации с m -м МИП;

μ — размер единичного сообщения измеряемого параметра изделия РКТ (РВ);

f_r — частота опроса измеряемого параметра изделия РКТ (РВ);

L — состав задействуемых линий связи (передачи информации);

V — задействуемый ресурс пропускной способности линий связи.

Исходными данными, используемыми в методике, являются: данные о контролируемых измеряемых параметрах изделия РКТ (РВ) ($r_k(t)$), частотах их опроса ($f(t)$) и форматах сообщений измерительной информации (μ), зонах покрытия космических аппаратов системы связи (\mathbf{X}_1), зонах радиовидимости МИП (t^{zrv}). Выходные данные включают: состав линий передачи информации (L), времена коммутации МИП в каналы передачи информации (t^{kls}), значения пропускной способности каналов передачи информации с МИП (\mathbf{v}).

Проводимые поисковые процедуры заключаются в определении искомым варьируемых параметров (L, t^{kls}, \mathbf{v}), приводящих к решению функциональных зависимостей:

$$L = f(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_{ip});$$

$$t^{kls} = f(\mathbf{X}_1, t^{zrv});$$

$$\mathbf{v} = f(r_k(t), f(t), \mu, \mathbf{X}_1, t^{kls}),$$

обеспечивающего выполнение критериев качества подсистемы информационного обмена.

Результаты прикладных исследований по обоснованию рационального варианта КСИСО ЛКИ изделий РКТ и РВ

На базе разработанного методического аппарата обоснования рационального варианта КСИСО ЛКИ изделий РКТ и РВ проведены прикладные исследования, имеющие своей целью сформировать КСИСО для конкретно заданных условий и исходных данных проведения информационного обеспечения пуска и полета изделия РКТ (РВ).

Прикладные исследования по определению рациональной варианта КСИСО проведены на основе данных пуска и полета РН «Ангара-1.2 ПП» с неотделяемым весом макетом полезной нагрузки (НВМ ПН) с космодрома «Плесецк» на полигон падения 43 ОНИС (п. о-в Камчатка). Основными расчетными исходными данными, которые используются при определении рациональной конфигурации КСИСО являются: циклограмма основных событий функционирования РН в полете (табл. 1), баллистические данные полета РН, состав и характеристики бортовых средств измерений РН (табл. 2), данные о формировании измеряемых параметров РН и потребностях получателя информации.

Перечень измеряемых бортовой аппаратурой параметров I и II ступеней РН «Ангара-1.2 ПП» и их распределение по каналам средств измерений приведены в «Программе телеметрических измерений РН «Ангара-1.2 ПП», требуемый для оценки состояния бортовых систем в полете состав параметров и временные интервалы контроля приведены в «Инструкции по оценке бортовых систем РН «Ангара-1.2 ПП» ч. 1, ч. 2, ч. 3». Баллистические данные о полете РН приведены в «Расчете баллистическом РН «Ангара-1.2 ПП» ч. 1».

В процессе прикладных исследований проведено формирование расчетных данных, составляющих рацио-

нальный вариант конфигурации, определяемой варьируемыми параметрами функциональных подсистем КСИСО.

Результаты поиска рациональных значений варьируемых параметров подсистемы измерений приведены в табл. 3.

На рис. 3 приведена суммарная зона радиовидимости средств подсистемы измерений КСИСО. В отличие от использованной при проведении реального пуска РН «Ангара-1.2 ПП», осуществленного с космодрома «Плесецк», сформированная конфигурация подсистемы измерений обеспечивает неразрывный прием всего объема измерительной информации по трассе полета РН от старта до точки падения.

Таблица 1

Расчетные значения времен прохождения команд при полете РН «Ангара-1.2 ПП»

Наименование команды	Время прохождения (сек от КП)
Контакт подъема (КП)	0,0
Разделение I и II ступеней	222,0
Сброс ГО	232,0
Начало пассивного полета II ступени РН с НВМ ПН	492,5

Таблица 2

Состав и характеристики бортовой аппаратуры измерений

Место размещения	Тип БРТС	Литера радиочастоты	Информативность (Мбит/сек)	Интервал работы (сек от КП)
I ступень	«Орбита IV АН5-01»	ДП-174	3,14	- 900 – 617 (до точки падения)
II ступень	«Орбита IV АН5-02»	ДП-094	3,14	- 900 – 1097 (до точки падения)

Таблица 3

Состав средств подсистемы измерений КСИСО

ИП	Географические координаты			Зоны радиовидимости (сек. от КП)	Количество комплектов приемной аппаратуры
	Широта (°с.ш.)	Долгота (°в.д.)	Высота над уровнем моря (м)		
МИП 1	62° 54' 02,78"	40° 33' 23,13"	148	0–524	2
МИП 2	70° 00' 22,97"	103° 36' 13,99"	45	481–857	1
МИП 3	60° 40' 54,12"	147° 06' 53,58"	101	825–1076	1
МИП 4	54° 18' 20,88"	159° 31' 09,54"	126	1010 – 1097	1

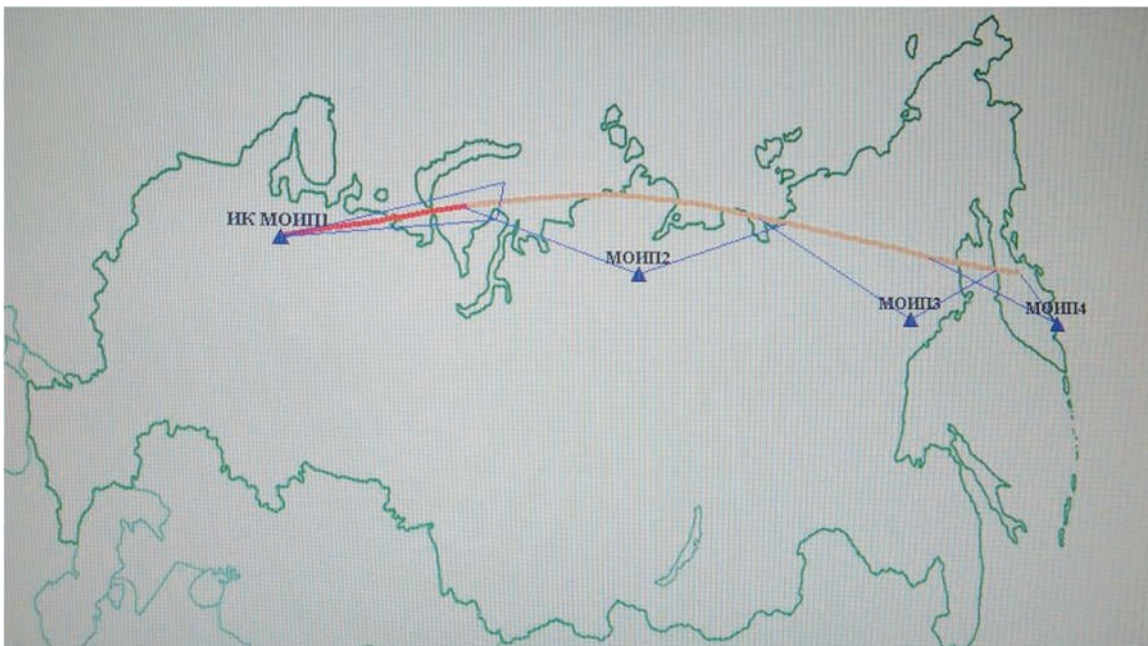


Рис. 3. Зона радиовидимости подсистемы измерений КСИСО

В результате поиска рациональных значений варьируемых параметров подсистемы обработки и анализа измерительной информации реального времени сформирован перечень контролируемых параметров РН в реальном масштабе времени полета, на основе которого определен состав программных модулей средств обработки и анализа измерительной информации:

- сбора и коммутации информационных потоков;
- обработки параметров бортовой цифровой вычислительной машины;
- дешифровки параметров аппаратуры спутниковой навигации;
- определения параметров движения РН;
- обработки сигнальных параметров РН;
- обработки оборотов турбонасосных агрегатов двигательных установок;
- обработки параметров давления системы подачи топлива и двигательных установок в индивидуальных калибровочных уровнях;
- обработки параметров давления среды в элементах конструкции;
- обработки температурных параметров РН;
- обработки функциональных параметров РН в общих калибровочных уровнях;
- визуализации результатов обработки и диагностики функционирования бортовых систем РН.

Использование предложенного подхода позволяет, не приводя к снижению качества оценивания состояния изделий РКТ (РВ) в реальном масштабе времени полета, сократить количество одновременно обрабатываемых

и контролируемых измеряемых параметров РН, что приводит к снижению нагрузки на средства обработки и сокращает избыточность данных, циркулирующих в КСИСО.

При формировании рациональной конфигурации подсистемы информационного обмена принято целесообразным использование спутниковых каналов связи на базе КА «Ямал 401», обеспечивающего зону покрытия районов размещения МИП подсистемы измерений. Зона покрытия КА «Ямал 401» приведена на рис. 4.

На основе проведенных расчетов определены программа задействования спутниковых каналов связи при проведении информационного обеспечения пуска и потребный ресурс пропускной способности (табл. 4).

Заключение

Таким образом, предлагаемый методический подход позволяет создать методический аппарат формирования КСИСО в соответствии с потребностями обеспечения ЛКИ изделий РКТ и РВ. Методический аппарат реализуется через три частные взаимосвязанные методики:

- методика обоснования рациональной конфигурации подсистемы измерений;
- методика обоснования рациональной конфигурации подсистемы информационного обмена;
- методика обоснования рациональной конфигурации и технологий обработки и анализа измерительной информации.

Модульное построение методического аппарата позволяет дифференцировано определять рациональные конфигурации подсистем КСИСО в соответствии с по-

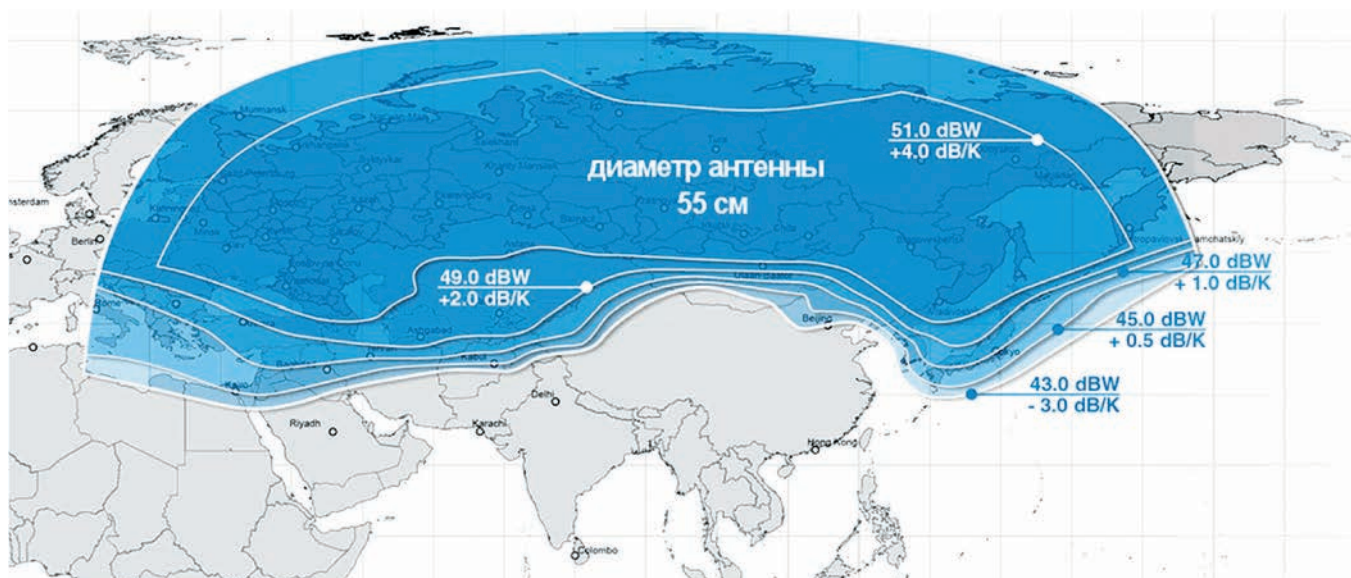


Рис. 4. Зона покрытия КА «Ямал 401»

Таблица 4

Программа задействования спутниковых каналов связи

ИП	Время коммутации (сек от КП)	№ канала	Пропускная способность (Мбит/сек)		
			потребная	выделенная	
МИП 1	-1500 – 700	1	2,2	2,6	
МИП 2	0 – 900	2	1,2	1,4	
МИП 3	700 – 1200	1	0,256	2,6	
МИП 4	900 – 1200	2	0,256	1,4	
Суммарный потребный ресурс пропускной способности				4,0	

требностями обеспечения ЛКИ изделий РКТ (РВ) и располагаемых для их реализации материальных ресурсов.

Практические исследования на основе данных реального пуска показали преимущества предложенного подхода формирования КСИСО по сравнению с существующим, при этом обеспечены неразрывный прием всего объема информации с борта изделия и непрерывная доставка требуемой для контроля полета изделия информации меньшими затратами средств приема и передачи информации.

При этом комплексное использование предложенного подхода к формированию рациональной конфигурации функциональных подсистем КСИСО позволяет сократить в 2,25 раза потребный ресурс пропускной способности каналов передачи информации по сравнению с использованным при проведении реального пуска (использовано 9 Мбит/сек).

Литература

1. Бахвалов Ю. О. Испытания ракетно-космической техники. Введение в специальность. М.: АИР, 2015. 228 с.
2. Методы отработки научных и народнохозяйственных ракетно-космических комплексов / под общ. ред. В. Ф. Грибанова. М.: Машиностроение, 1995. 352 с.
3. Лисейкин В.А., Мусеев Н. Ф., Сайдов Г.Г., Фролов О.П. Основы теории испытаний. Экспериментальная отработка ракетно-космической техники. М.: Машиностроение-Полет Виарт Плюс, 2015. 260 с.
4. Кукушкин С.С., Мазуров В.М. Основные проблемные вопросы информационно-телеметрического обеспечения испытаний ракетно-космической техники при появлении нештатных и аварийных ситуаций // Двойные технологии. 2008. № 2. С. 20–26.

5. Летные испытания ракет и космических аппаратов / под ред. Е.И. Криницкого. М.: Машиностроение, 1979. 464 с.

6. Козырев Г.И., Назаров А.В., Шитов И.В., Обрученков В.П., Древин А.В., Краскин В.Б., Кудряков С.Г., Петров А.И., Соколов С.М., Якимов В.Л., Лоскутов А.И. Современная телеметрия в теории и на практике. СПб.: Наука и техника, 2007. 672 с.

7. Месарович М., Мако Д., Такахага И. Теория иерархических многоуровневых систем: пер. с англ. М.: Мир, 1973. 344 с.

8. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы: Структура и алгоритмы, системотехническое проектирование. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 440 с.

9. Иванов В.Л., Коновалов В.П., Макаров М.И., Медведев А.А., Чаплинский В.С. Структура модели формирования инновационного проекта наземного измерительного комплекса ракет космического назначения // Двойные технологии. 2017. № 3. С. 2–7.

10. Раскин Л.Г. Анализ сложных систем и элементы теории управления. М.: Сов. радио, 1976. 344 с.

11. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. 510 с.

12. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем. М.: Наука, 1982. 200 с.

13. Бабак В.П., Бабак С.В., Еременко В.С., Куц Ю.В., Марченко Н.Б., Мокийчук В.М., Монченко Е.В., Орнатский Д.П., Павлов В.Г., Пустовойтов Н.А., Щербак Л.Н. Теоретические основы информационно-измерительных систем. К.: НАУ, 2014. 832 с.

14. Информационные процессы в автоматизированных системах сбора и обработки информации / под общ. ред. Ю.Г. Ростовцева. Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1981. 223 с.

15. Рубичев Н.А. Измерительные информационные системы: учеб. пособие. М.: Дрофа, 2010. 334 с.

16. Рабинович В.И., Цапенко М.П. Информационные характеристики средств измерения и контроля. М.: Энергия, 1968. 96 с.

Methodology for substantiating a rational alternative of a complex of devices of measuring, collecting and processing measurement information in accordance with the requirements of providing flight tests of rocket-space technics and rocket armament

ANDREY V. KUIMOV,

Krasnoznamensk, Russia, 82m_proton@mail.ru

KEYWORDS: system; rational alternative; decomposition; indicator; criterion; parameters; search.

ABSTRACT

Conducted research aimed at substantiation of the rational system of measuring, collecting and processing information in accordance with the requirements of ensuring flight tests of rocket-space equipment and missile armament, in which the complex of devices is regarded as information-measuring technical system. Common elements identified that make up the content of its functioning, which are a set of coordinated information processes performed by technical devices and determine the structural and functional decomposition of the system. The modular construction of the methodology for substantiating the alternative of forming a complex of devices of measuring, collection and processing has been substantiated, which ensures sufficient autonomy for conducting studies to substantiate

subsystem variants, as well as the necessary interconnection (in terms of input and output parameters) when combined into successive research schemes. The proposed methodology consists of three interconnected private methods: method of rational measurement subsystem configuration justification; method of rational justification configure the subsystem the processing and analysis of measurement information; method of rational justification of the configuration of the subsystem information exchange.

Private methods designed to search the optimal values of variable parameters of the subsystems of a complex of devices of measurements, collection and treatment and aims to ensure the criteria of quality indicators that best meet the objectives of the relevant sub-systems and

the needs of information support of flight tests of rocket and space technology and missile armament.

On the basis of the developed methodology, applied studies have been conducted to determine the rational version of the complex of tools for specific conditions and initial data of information support for the launch and flight of rocket-space technics and missile armament and evaluation of their results. Applied research on the basis of real launch data showed the advantages of the proposed approach to the formation of a set of tools compared to the existing one, while providing an indissoluble reception of the entire volume of information from the board of the product and the continuous delivery of the information required for flight control of the product with lower costs of the resources of the devices of receiving and transmitting information.

REFERENCES

1. Bakhvalov Yu. O. *Ispytaniya raketno-kosmicheskoy tekhniki. Vvedenie v spetsial'nost'* [Tests of rocket and space technology. Introduction to the specialty]. Moscow: AIR, 2015. 228 p. (In Russian)
2. Gribanova V.F. (Ed.). *Metody otrabotki nauchnykh i narodnohozyaystvennykh raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Methods of development of scientific and economic rocket and space complexes]. Moscow: Mashinostroenie, 1995. 352 p. (In Russian)
3. Liseykin V.A., Moiseev N.F., Saydov G.G., Frolov O.P. *Osnovy teorii ispytaniy. Eksperimental'naya otrabotka raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Fundamentals of test theory. Experimental development of rocket and space technology]. Moscow: Mashinostroenie-Polet Viart Plyus, 2015. 260 p. (In Russian)
4. Kukushkin S.S., Mazurov V.M. *Osnovnye problemnye voprosy informatsionno-telemetricheskogo obespecheniya ispytaniy raketno-kosmicheskoy tekhniki pri poyavlenii neshtatnykh i aviarnykh situatsiy* [The main problematic issues of information and telemetry support of tests of rocket and space technology in the event of emergency and emergency situations]. *Dvoynye tekhnologii* [Dual technology]. 2008. No. 2. Pp. 20-26. (In Russian)
5. Krinitskogo E.I. (Ed.). *Letnye ispytaniya raket i kosmicheskikh apparatov* [Flight tests of rockets and spacecraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 464 p. (In Russian)
6. Kozyrev G.I., Nazarov A.V., Shitov I.V., Obruchenkov V.P., Drevin A.V., Kraskin V.B., Kudryakov S.G., Petrov A.I., Sokolov S.M., Yakimov V.L., Loskutov A.I. *Shitov i dr. Sovremennaya telemetriya v teorii i na praktike* [Modern telemetry in theory and practice]. St. Petersburg: Nauka i tekhnika, 2007. 672 p. (In Russian)
7. Mesarovic M., Marko D., Takahara Y. *Theory of Multi-level Hierarchical Systems*. New York: Academic Press, 1970. 294 p.
8. Tsapenko M.P. *Izmeritel'nye informatsionnye sistemy: Struktura i algoritmy, sistemotekhnicheskoe proektirovanie. ucheb. posobie dlya vuzov* [Measuring information systems: Structure and algorithms, system engineering design]. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 440 p. (In Russian)
9. Ivanov V., Konovalov V., Makarov M., Medvedev A., Chaplinsky V. *Strucure model for creation of innovation project of space launch vehicle ground mesurement cjmplex. Dvoynye tekhnologii* [Dual technology]. 2017. No. 3. Pp. 2-7. (In Russian)
10. Raskin L.G. *Analiz slozhnykh sistem i elementy teorii upravleniya* [Analysis of complex systems and elements of control theor]. Moscow: Sovetskoe radio, 1976. 344 p. (In Russian)
11. Volkova V.N., Denisov A.A. *Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza* [Fundamentals of systems theory and system analysis]. St. Petersburg: SPbGTU Publ., 1997. 510 p. (In Russian)
12. Tsvirkun A.D. *Osnovy sinteza struktury slozhnykh sistem* [Fundamentals of synthesis of complex systems structure]. Moscow: Nauka, 1982. 200 p. (In Russian)
13. Babak V.P., Babak S.V., Eremenko V.S., Kuts Yu.V., Marchenko N.B., Mokiychuk V.M., Monchenko E.V., Ornatskiy D.P., Pavlov V.G., Pustovoytov N.A., Shcherbak L.N. *Teoreticheskie osnovy informatsionno-izmeritel'nykh sistem* [Theoretical basis of information-measuring systems]. Kiev: NAU, 2014. 832 p. (In Russian)
14. Rostovtseva Yu.G. (Ed.). *Informatsionnye protsessy v avtomatizirovannykh sistemakh sbora i obrabotki informatsii* [Information processes in automated information collection and processing systems]. Leningrad: VIKI imeni A.F. Mozhayskogo, 1981. 223 p. (In Russian)
15. Rubichev N.A. *Izmeritel'nye informatsionnye sistemy: ucheb. Posobie* [Measuring information systems]. Moscow: Drofa, 2010. 334 p. (In Russian)
16. Rabinovich V.I., Tsapenko M.P. *Informatsionnye kharakteristiki sredstv izmereniya i kontrolya* [Information characteristics of measuring and control means]. Moscow: Energiya, 1968. 96 p. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Kuimov A.V., Head of the testing department of the military unit 32103.

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10163

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДМЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ ОБЪЕКТНОЙ МОДЕЛИ ОТОБРАЖАЕМЫХ ДАННЫХ НА АВТОМАТИЗИРОВАННОМ РАБОЧЕМ МЕСТЕ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИХ СИЛ

МОРОЗОВ

Павел Андреевич¹

КРУТАЛЕВИЧ

Юрий Александрович²

АНОШИН

Роман Игоревич³

ЗЮЗИНА

Анастасия Дмитриевна⁴

АННОТАЦИЯ

Одним из направлений сокращения времени принятия решения лицами боевого расчета комплексов средств автоматизации может выступать управление информацией, отображаемой на автоматизированном рабочем месте с помощью запросов оператора в терминах и понятиях естественно-подобного языка. Для реализации предлагаемого направления разработан способ предметно-графической объектной модели понятийного и графического представления структурных элементов отображаемых данных на автоматизированном рабочем месте комплекса средств автоматизации. Согласно разработанного способа предлагается рассматривать отображаемые данные на автоматизированном рабочем месте как совокупность понятийных единиц, представляющих структурные и функциональные стороны объектов управления. Совокупность всех понятий, определяющих образ каждого объекта управления, представляется в виде фрейма. Далее определяется тип и структура фреймов, образующих соответствующие множества. На этапе разработки предметной объектной модели осуществляется разделение множества фреймов, образующих фреймовую модель, по их типу, тем самым определяются фрейм-прототипы. На основе совокупности фрейм-прототипов формируется множество слотов, позволяющее определить множество классов, на основе которых формируется множество объектов, которое, в свою очередь, определяет соответствующие объекты управления информационной модели отображения. Далее разрабатываются графическая объектная модель, обеспечивающая графическое объектное представление объектов управления отображаемых данных на автоматизированном рабочем месте комплекса средств автоматизации в средствах визуализации. Объединение данных моделей на основе паттернов образует предметно-графическую объектную модель данных, отображаемых на автоматизированном рабочем месте комплекса средств автоматизации. Описание отображаемой информации автоматизированного рабочего места в виде предметно-графической объектной модели создает основу для использования естественно-подобных языков в запросах операторов автоматизированных рабочих мест комплексов средств автоматизации при формировании множества условий, определяющих необходимую оперативную информацию, выводимую на экран. Объектом исследования является система информационной поддержки процесса принятия решения комплексов средств автоматизации. Предмет исследования – способ информационной поддержки процесса принятия решения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отображаемые данные на автоматизированном рабочем месте; объекты управления; фреймовая модель; фрейм-прототип; предметная объектная модель; графическая объектная модель; паттерн.

Сведения об авторах:

¹к.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем управления Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, Россия, Ярославль, mpa24@mail.ru

²адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, Россия, Ярославль, ullia57@mail.ru

³начальник отделения управления батальона обеспечения учетного процесса Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, Россия, Ярославль, roman88an@gmail.com

⁴курсант Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, Россия, Ярославль, zyuzina-1996@bk.ru

Для цитирования: Морозов П.А., Круталевич Ю.А., Аношин Р.И., Зюзина А.Д. Способ формирования предметно-графической объектной модели отображаемых данных на автоматизированном рабочем месте комплекса средств автоматизации Воздушно-космических сил // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 5. С. 26-36. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10163

Бурное развитие средств воздушно-космического назначения (СВКН) вероятного противника и сложность задач, решаемых лицами боевых расчетов (ЛБР) командных пунктов (КП), а также высокие требования к оперативности и качеству их решения обуславливают необходимость совершенствования процессов управления. В настоящее время это происходит в основном за счет оснащения КП комплексами средств автоматизации (КСА).

Для повышения информативности об оперативной обстановке, а также сокращения времени на принятие решения боевыми расчетами в современных КСА применяется информационная модель отображения (ИМО), в которой для управления всей информацией об оперативной обстановке на фоне цифровой карты местности используется многоуровневое пользовательское меню. ИМО представляет собой совокупность отображаемых данных на автоматизированном рабочем месте (ОД АРМ).

При существующем подходе, выполнение действий и распоряжений по объектам управления ЛБР выполняются путем последовательного выбора той или иной команды в соответствии с информационной моделью отображения. Однако в случае сложной оперативной обстановки, которая характеризуется резким возрастанием объема информации, ЛБР приходится выполнять ряд дополнительных действий для правильного принятия решения, что в свою очередь приводит к увеличению времени выполнения необходимой операции по объекту управления.

Одним из направлений сокращения времени принятия решения лицами боевого расчета КСА может выступать управление информацией, отображаемой на автоматизированном рабочем месте (АРМ) с помощью запросов оператора в терминах и понятиях естественно-подобного языка.

Решение этой задачи заключается в формировании оперативной информации, основанной на использовании моделей и способов работы с ними, которые учитывают различные аспекты представления и использования информационной модели отображения КСА в процессе выполнения задач боевым расчетом.

ОД АРМ, являясь для оператора КСА источником информации, на основе которой он формирует образ реальной обстановки, как правило, включают большое количество элементов. Учитывая различный семантический характер используемых элементов, ОД АРМ представляют собой совокупность взаимосвязанных объектов. Количество групп элементов ОД АРМ определяется степенью детализации описания состояний и условий функционирования объекта управления. Как правило, элемент ОД АРМ связан с каким-либо параметром объекта управления (ОУ).

При организации процесса обработки информации в системах отображения информации будем манипулировать следующими понятиями:

1. Статическая информация: относительно стабильная по содержанию информация, такая как координатная сетка, план, карта местности, государственная граница и т.д.

2. Динамическая информация: информация, переменная в определенном интервале времени по содержанию или положению на экране. Реально динамическая информация часто является функцией некоторых случайных параметров.

В связи с этим представляет интерес использование концептуального модельного представления ОД АРМ, обеспечивающего возможность формирования необходимой оперативной информации по условиям, определяющим структурно-функциональные свойства элементов ОД АРМ на естественно-подобном языке с использованием предметных понятий и терминов. Состав и структура концептуальной модели определяется предметным содержанием информационного ресурса, необходимого и достаточного для представления ОД АРМ с точки зрения выполнения поставленной задачи операторами.

Концептуальное представление ОД АРМ характеризуется рядом особенностей, которые обуславливают выбор фреймовой модели ОД АРМ из существующих видов концептуальных моделей (фреймовая, семантическая сеть, онтологии и т.п. [1]) в качестве модели:

1. ОД АРМ представляет структурные и функциональные элементы системы в виде графических и (или) буквенно-цифровых обозначений, выступающих в качестве самостоятельных структурных единиц. Каждая из структурных единиц характеризуется множеством свойств и атрибутов, которые в совокупности определяют образ, ассоциированный с соответствующим структурным элементом ОД АРМ. Совокупность всех понятий, определяющих образ каждого структурного элемента изделия, целесообразно представлять в виде фрейма.

2. ОД АРМ является детерминированной структурой, что обеспечивает единые правила формирования общей фреймовой модели системы из множества отдельных фреймов.

3. Как показывает анализ работ [2–6], связанных с формированием фреймовых моделей для разных предметных областей, подход к представлению ОД АРМ в виде фреймовой модели, предоставляет возможность использования предметных понятий и терминов естественного языка. Понятийная основа концептуальной модели ОД АРМ при таком подходе формируется посредством концептуального анализа содержания совокупности эксплуатационных документов на типовой КСА.

4. Использование фреймовой модели предоставляет возможность перехода к объектно-ориентированному представлению ОД АРМ, что служит основой для согласования с существующими моделями в СИП.

На начальном этапе необходимо отображаемые данные на автоматизированном рабочем месте комплексов

средств автоматизации представить в терминах предметной области. Для этого в качестве исходного информационного ресурса используется существующая информационная модель отображения, информация из базы данных КСА, ГОСТ, а также эксплуатационная документация на соответствующий КСА.

Из всей информации, отображаемой на автоматизированном рабочем месте комплекса средств автоматизации, определяется множество основных объектов управления (например «Воздушный объект», «Абонент», «Карта» и т.д.), а также множество возможных отношений между ними.

Такой способ описания предметной области позволяет представить ОД АРМ как совокупность объектов управления, которые представляют собой самостоятельные понятийные единицы и определяются несколькими самостоятельными частями, называемыми слотами. Такая информационная единица — многоуровневая, каждый слот верхнего уровня содержит в себе слоты нижнего уровня. Глубина вложения слотов может быть различной. Информационные единицы, структурированные таким образом, называются фреймами.

Под фреймом [7] понимается структура, описывающая некоторый сложный объект или абстрактный образ, или модель для представления некоторой концепции. Структура фрейма включает три основных типа данных: понятие (название фрейма), характеристика и значение характеристики. В этой связи можно считать, что во фрейме реализованы некоторые общие принципы, присущие организации базы данных, где как единицы выделяются объекты, характеристики и их значения. Базовым элементом фрейма является слот, который определяет атрибуты или процедурные знания, связанные с его атрибутами, для понятия, представленного фреймом.

Однако, отдельные фреймы не могут описывать динамические ситуации, когда некоторые характеристики, содержащиеся в структуре одного фрейма, вступают в ситуативную связь с характеристиками или явлениями, описанными в структуре другого фрейма. Для описания таких связей используются специальные слоты. В них указываются имена фреймов, с которыми есть связь у данного фрейма и существующие отношения. Фреймы, связанные отношениями, образуют так называемую семантическую сеть.

Выражения 1 и 2 формально определяют фрейм F в виде упорядоченного множества (кортежа) слотов:

$$F = \langle \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n \rangle, \quad (1)$$

где каждый слот $\sigma_i (i = \overline{1, n})$ в общем виде имеет следующую структуру:

$$\sigma_i = (V_i, \delta_i), \quad (2)$$

где V_i — множество значений слота σ_i , δ_i — демон слота σ_i .

Построение фреймовой модели требует учета различных аспектов представления объектов управления (ОУ) в предметных понятиях, в связи с чем предлагается учитывать два аспекта: сущностный и ролевой.

Сущностный аспект отражает наличие объектов управления (их сущностей), которые представляются в ОД АРМ.

Ролевой аспект отражает функциональную сторону системы в терминах действий, которые выполняют ОУ.

В соответствии с этим фреймовую модель ФМ ОД АРМ целесообразно формировать на основе фреймов двух видов: фреймов-экземпляров Φ^1 и фреймов-ролей Φ^2 , причем для каждого вида фрейма правила построения имеют свои характерные особенности.

Фреймы-экземпляры создаются для всех объектов управления ОД АРМ. В качестве исходных данных для формирования фреймов-экземпляров выступает множество понятий, формируемое на основе концептуального анализа данных, содержащегося в ОД АРМ.

На примере КСА РТВ ряда «Фундамент» [8–9], одним из объектов управления является воздушный объект, для которого характерны определенные признаки и характеристики.

Каждый фрейм-экземпляр идентифицируется уникальным именем. Для учета названия фрейма «Воздушный объект» создается слот «Название», номера ВО — слот «Номер ВО», индекса — слот «Индекс ВО», типа воздушного объекта — слот «Тип ВО», количества самолетов в составе ВО — слот «Количество самолетов в составе ВО» и т.д.

Некоторые фреймы включают в свой состав ряд соответствующих фреймов, такие как «Формуляр ВО», состоящий из фреймов: «Фрейм тип 1», «Фрейм тип 2», «Фрейм тип 3», «Фрейм тип 4». Также фреймы «Тип ВО» содержит: «Фрейм ракета», «Фрейм самолет», «Фрейм вертолет» и т.д.

Слот «Номер ВО» определяет, какой из номеров ВО на данный момент задействован в системе: единый или машинный. Слот «Индекс ВО» используется для указания классификации ВО по назначению: ИВО еще не установлен; воздушный противник; постановщик активных помех; заявочный самолет; самолет-нарушитель режимов полетов; контрольный самолет; самолет выполняющий боевую задачу. Слот «Тип ВО» используется для описания типа ВО: ракета, самолет, вертолет и т.д. В свою очередь, фрейм «ракета» содержит слоты: баллистическая, крылатая, специальная и т.д.

В результате объединения данных, полученных в ходе проведенного анализа, формируется общая структура фрейма — экземпляра для воздушного объекта (табл. 1).

Следует отметить, что совокупность Φ^1 всех фреймов-экземпляров позволяет представить структурную модель ОД АРМ в терминах и понятиях предметной области.

Таблица 1

1. Имя фрейма	Воздушный объект
2. Номер ВО	единый машинный индивидуальный
3. Индекс ВО	ИВО еще не установлен воздушный противник постановщик активных помех заявочный самолет самолет-нарушитель режимов полетов контрольный самолет самолет выполняющий боевую задачу
4. Тип ВО	фрейм «ракета» фрейм «самолет» фрейм «вертолет» фрейм «планирующий аппарат» фрейм «космический аппарат» ...
...	...
n. Формуляр ВО	фрейм «тип 1» - короткий (однострочный) фрейм «тип 2» – NE(NBO) фрейм «тип 3» – ИВО, ТВО, NE(NBO) фрейм «тип4» – полный (двухстрочный): ИВО, ТВО, NE(NBO), Н, V

Однако, с помощью фреймов-экземпляров не представляется возможным описать функции и задачи, выполняемые ОУ в ОД АРМ.

Для решения этой задачи используется фрейм-роль.

При формировании фреймов-ролей основой выступает не структура системы, а выполняемые функции ОУ. Поэтому для формирования фреймов-ролей требуется определить множество всех функций и команд для объекта управления (функции $\Psi = \{\Psi^{(1)}, \Psi^{(2)}, \dots, \Psi^{(N)}\}$), которые целесообразно использовать для отражения функциональности ОД АРМ, и создать соответствующий набор функций и команд для всех объектов ОД АРМ.

Каждая функциональная команда в общем случае характеризуется набором используемых входных параметров C_i и результатов выполнения — выходных параметров C_i^* (рис. 1).

Предлагаемый подход к формированию фреймов-ролей заключается в том, что для каждой функциональной задачи (функции) $\Psi^{(i)} \in \Psi, i = \overline{1, N}$, учитываются ее название и множество входных/выходных параметров. Формально структура всякого фрейма-роли $F_i = \Phi^2$ определяется упорядоченной тройкой компонентов $F_i = \langle \Psi^{(i)}, C_i, C_i^* \rangle$.

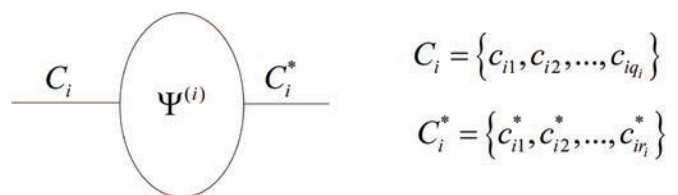


Рис. 1. Формализованное представление функциональной задачи (функции)

Таблица 2

В соответствии с этим, помимо имени в структуре каждого фрейма-роли целесообразно использовать четыре слота: «Входные параметры», «Выходные параметры», «Функциональная задача (функция)» и «Команда управления».

В качестве значения слота «Функциональная задача (функция)» целесообразно использовать краткое название функциональной задачи (функции), отражающее группу выполняемых однотипных функциональных задач (например, «Определение местоположения», «Выдача радиолокационной информации», «Определение государственной принадлежности» и т.п.). Значением слота «Команда управления» является соответствующая команда согласно эксплуатационной документации (ЭД) на типовой КСА. В качестве значений слота «Входные параметры» и слота «Выходные параметры» целесообразно использовать названия входных/выходных параметров.

Например, для объекта управления «Воздушный объект», одной из функциональных задач является определение его местоположения, которая реализуется в меню КСА ряда «Фундамент» командой № 17 («Показать ВО») (табл. 2).

Для выполнения задачи используются два входных параметра — единый номер воздушного объекта (ВО) или машинный номер ВО. В результате выполнения задачи формируется ряд выходных параметров: «Координаты X, Y», «Координаты сетки Азимут-Дальность», «Координаты сетки ПВО», квитанция, графический примитив «Изображение» (ГПИИзображение).

Наличие квитанции характеризует правильность или ошибку при вводе соответствующей команды.

Имя фрейма	«Показать ВО»
Функциональная задача (функция)	Определение местоположения
Команда управления	Команда №17
Входные параметры	Единый номер воздушного объекта Машинный номер воздушного объекта
Выходные параметры	Координаты X,Y Координаты сетки Азимут-Дальность (АЗ-Д) Координаты сетки ПВО Квитанция ГПИИзображение

Следует отметить, что совокупность Φ^2 всех фреймов-ролей позволяет представить функциональную модель ОД АРМ в терминах и понятиях предметной области.

Таким образом можно определить два множества Φ^1 и Φ^2 фреймов-экземпляров и фреймов-ролей, которые в совокупности образуют фреймовую модель (ФМ) ОД АРМ:

$$\text{ФМ ОД АРМ} = \Phi^1 \cup \Phi^2 \quad (3)$$

В общем виде методика формирования ФМ ОД АРМ представлен на рис. 2.



Рис. 2. Методика формирования фреймовой модели отображаемых данных на автоматизированном рабочем месте КСА

В качестве исходных данных для формирования ФМ ОД АРМ выступают соответствующий ГОСТ и комплект эксплуатационной документации КСА.

Фреймовые модели широко применяются в различных предметных областях, однако, обеспечивая концептуальное описание ОД АРМ в терминах и понятиях предметной области, она не содержит средств, которые предназначены для графического представления ОД АРМ. Отмеченное ограничение в использовании фреймовой модели требует разработки двух моделей: предметной объектной модели ОД АРМ (ПОМ) и графической объектной модели (ГОМ) ОД АРМ, согласование которых осуществляется в рамках одной предметно-графической объектной модели (ПГОМ) ОД АРМ.

Формирование ПОМ представляет собой самостоятельную задачу, которая требует учета и взаимного согласования целого ряда следующих аспектов в соответствии с принципами объектно-ориентированного подхода:

1. Предметное представление ОД АРМ в виде фреймовой модели ФМ ОД АРМ.

2. Графическое представление ОД АРМ в системах визуализации.

3. Графическое представление ОД АРМ в соответствии с ГОСТ.

Решение рассматриваемой задачи, с одной стороны, требует выделения из фреймовой модели ФМ ОД АРМ элементов, имеющих законченный предметный смысл (объект управления, наименование, значение, параметр, позиционное обозначение и т.п.), а с другой стороны, выделения в ОД АРМ графических элементов, несущих смысловую предметную нагрузку.

В соответствии с принципами объектно-ориентированного подхода [10] выделение таких элементов целесообразно выполнять в виде объектов, что определило название данной модели.

Построение предметной объектной модели (ПОМ) начинается с формирования фреймов-прототипов, определяющих на основе ФМ ОД АРМ структуру классов, которые являются основой для формирования множества объектов, соответствующих представлению ОД АРМ

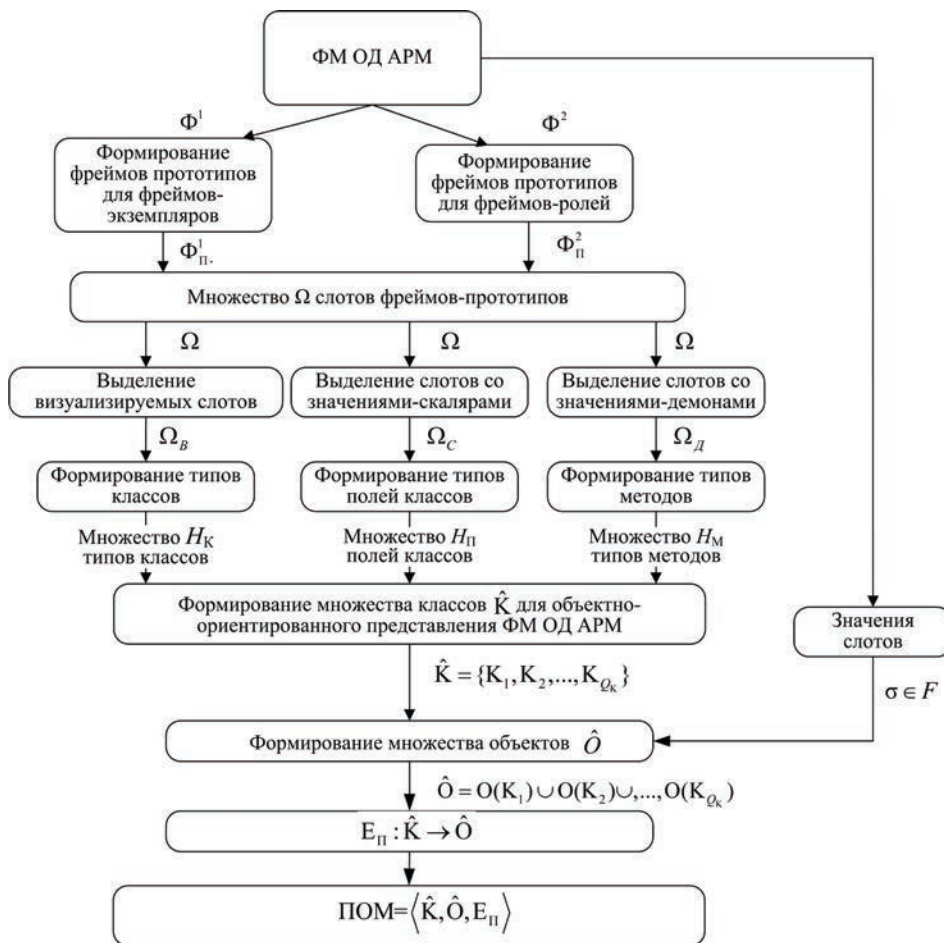


Рис. 3. Общий принцип формирования предметной объектной модели ОД АРМ

в языковых терминах и понятиях предметной области. Исходными данными для этого является множество фреймов, образующих ФМ ОД АРМ. Каждый из фреймов необходимо поставить в соответствие одному из двух типов фреймов: фреймов-экземпляров Φ^1 и фреймов-ролей Φ^2 .

В соответствии с этим целесообразно определить два типа фреймов-прототипов Φ_{Π}^1 и Φ_{Π}^2 (рис. 3).

На основе совокупности фреймов-прототипов Φ_{Π}^1 и Φ_{Π}^2 формируется объединенное множество $\Omega = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M\}$ слотов по следующему правилу:

$$\Omega = \sigma(\Phi_{\Pi}^1) \cup \sigma(\Phi_{\Pi}^2), \quad (4)$$

где — $\sigma(\Phi_{\Pi}^i)$ набор всех слотов фреймов-прототипов Φ_{Π}^i .

Дальнейший анализ совокупности слотов Ω направлен на их классификацию в соответствии с принципами объектно-ориентированного подхода.

Для этого множество Ω разбивается на три подмножества:

Ω_B — совокупность слотов, которые имеют визуализируемое представление на АРМ КСА (надпись, условное обозначение, объект управления и т.п.);

Ω_C — совокупность слотов-скаляров, которые не используются при визуализации информации (эллиптический центр антенны и т.п.);

Ω_D — совокупность слотов, значениями которых являются демоны (выдача радиолокационной информации от источника к потребителю и т.п.).

Следуя принципам объектно-ориентированного подхода, на основе множества слотов Ω_B целесообразно сформировать совокупность N_K типов классов. Множество слотов Ω_C — определяет совокупность N_{Π} полей классов, а множество слотов-демонов Ω_D — совокупность N_M типов методов классов.

Проведенная классификация упорядочивается представлением, определяемым ФМ ОД АРМ, которое определяет соответствующие поля и методы, задающие структуру каждого типа класса.

Это позволяет сформировать множество классов $\hat{K} = \{K_1, K_2, \dots, K_{OK}\}$, которые определяют предметное описание ОД АРМ, соответствующее объектно-ориентированному подходу к декомпозиции ФМ ОД АРМ.

Для формирования предметного объектно-ориентированного представления ОД АРМ с каждым фреймом ОД АРМ сопоставляются соответствующие классы $K(F) \subseteq \hat{K}$ и производится заполнение полей этих классов значениями, определяемыми слотовой структурой фрейма F .

На основе каждого из классов K_j формируется множество объектов $O(K_j)$, которые определяют соответствующие структурные элементы ОД АРМ. В соответствии с этим ПОМ представляется в виде:

$$\text{ПОМ} = \langle \hat{K}, \hat{O}, E_{\Pi} \rangle \quad (5)$$

где множество объектов $\hat{O} = O(K_1) \cup O(K_2) \cup \dots \cup O(K_{OK})$ определяет все элементы ОД АРМ, а отображение $E_{\Pi} : \hat{K} \rightarrow \hat{O}$ определяется произведенной классификацией $O(K_j)$, $j = \overline{1, Q_K}$.

Таким образом, предлагаемая предметная объектная модель определяют не только объектное представление, но и задает соответствие между объектами управления информационной модели отображения и предметными понятиями, связанными с этими объектами.

Предлагаемый принцип формирования ПОМ обеспечивает возможность работать в СИП с объектами управления в терминах и понятиях предметной области.

В СИП для представления объектов управления ОД АРМ при формировании графической объектной модели (ГОМ) используются базовые графические элементы, которые предоставляются графическими системами комплексов средств автоматизации. В соответствии с ГОСТ 27459–87. «Системы обработки информации. Машинная графика. Термины и определения», ГОСТ 27817–88. «Системы обработки информации. Машинная графика. Функциональное описание ядра графической системы», ГОСТ Р50716–94. «Информационные модели отображения элементов единой радиолокационной системы», данные базовые элементы называются графическими примитивами вывода (ГП) [11–12].

Правила построения ОД АРМ, изложенные в данных нормативных документах, являются основой для определения множества примитивов вывода, которые целесообразно использовать при визуализации графической информации, выводимой на экран АРМ оператора.

Следует отметить, что на экране АРМ КСА возможно отображение нескольких видов графической информации: формуляров, справок, таблиц, подсказок.

Под графической информацией понимается информация в виде координатно-картографической и таблично-знаковой информации, а также в виде линий и геометрических фигур для отображения на экране государственной границы, приграничных полос, коридоров пролета, воздушных линий, запретных зон, карт местности и т.п.

Построение ГОМ связывается с представлением объектов управления ОД АРМ средствами визуализации СИП, использующими графические примитивы вывода ГП. На основе правил построения графических элементов ОД АРМ, изложенных в нормативных документах, определяется множество графических примитивов вывода $\hat{G} = \{ГП_1, ГП_2, \dots\}$, используемых для визуализации объектов \hat{O} . При этом с каждым объектом $o \in \hat{O}$ сопоставляется совокупность графических примитивов $ГП(>) \subseteq \hat{G}$,

которая формирует графический контекст $ГК(o)$ для визуализации одного объекта $o \in \hat{O}$. В соответствии с этим ГОМ представляется в виде:

$$ГОМ = \langle \hat{Г}, \hat{O}, A \rangle \quad O \quad (6)$$

где отображение $A: \hat{Г} \rightarrow \hat{O}$ определяется совокупностью соответствий $ГП(o), o \in \hat{O}$.

Для совмещения понятийного и графического представления объектов управления предлагается использовать объектную модель на основе паттернов [13–15]. Паттерн следует рассматривать как шаблон (виджет), предназначенный для визуального представления предметных понятий, соответствующих структурным элементам ОД АРМ КСА. Использование паттернов позволяет обеспечить согласование объектов ПОМ ОД АРМ с примитивами вывода, определяемыми возможностями графической системы СИП.

Всякий паттерн π формируется в виде объектной структуры, в которой осуществляется сопоставление предметных понятий ПОМ с графическими единицами визуализации. В соответствии с этим, всякий паттерн π формально представляется в виде двухэлементного кортежа, в котором одновременно отражены предметный и графический аспекты элементов ОД АРМ:

$$\pi = \langle O(\pi), ГП(\pi) \rangle \quad (7)$$

В структуре каждого паттерна π одновременно отражены два аспекта элементов ОД АРМ — предметный и графический.

Предметный аспект в структуре паттерна представляется набором объектов $O(\pi) \subseteq ПОМ$, а графический — набором $ГП(\pi) \subseteq ГОМ$.

Паттерны формируются для каждого типа элементов ОД АРМ с учетом их предметного объектного описания в ПОМ и используемых графических примитивов вывода. Например, такие объекты ПОМ, как «Единый номер», «Машинный номер», «Название» и другие, которые в ОД АРМ КСА представляются в виде надписей, целесообразно представить в виде графического прими-

тива $ГП_{Текст}$. Такие объекты, как «Государственная граница», «Коридоры пролета», «Местные воздушные линии», «Радиолокационное поле» в ОД АРМ представляются в виде линий, и их можно представить в виде графического примитива $ГП_{Линия}$.

Разнообразие графических примитивов определяется видом и сложностью визуализируемого объекта. При этом одни и те же примитивы могут использоваться при построении паттернов разных объектов. С другой стороны, создание паттернов объектов может требовать использования собственных уникальных графических примитивов вывода, так что, для каждого объекта ПОМ должны быть определены соответствующие графические примитивы вывода.

На рис. 4 иллюстрируется принцип формирования паттерна «Формуляр ВО полный (двухстрочный)».

На 0-м знакоместе отображается символ-вектор воздушного (движущегося) объекта, который состоит из координатной точки и прямой линии, исходящей из нее, при этом координатная точка расположена в начале символа-вектора и определяет местоположение ВО. Линия, исходящая из координатной точки, указывает направление движения ВО и вращается в соответствии с изменением курса ВО.

На 1–8-х знакоместах 1–2 строк отображаются символы, цифры, буквы, которые могут выделяться миганием, цветом, яркостью и размером для привлечения внимания оператора АРМ.

Цвет формуляра ВО определяет его государственную принадлежность («Свой», «Чужой», «Неопознанный»), а также природу ВО (реальный, тренажный или эталонный).

Цвет символов, цифр и букв на 1–8 знакоместах формуляра ВО всегда совпадает с цветом символа-вектора ВО.

Предметную объектную основу паттерна «Формуляр ВО полный (двухстрочный)» составляют такие объекты, как: «Индекс ВО» (И), «Номер единый» (NE), «Распоряжения от ВКП и характеристики ВО» (PX), «Высота ВО» (H), «Скорость ВО» (V). Графическую объектную основу паттерна «Формуляр ВО полный (двухстрочный)» составляют графические примитивы текст ($ГП_{Текст}$), прямоугольник ($ГП_{Прямоугольник}$), точка ($ГП_{Точка}$), линия ($ГП_{Линия}$), а также « $ГП_{Изображение}$ » (Тип ВО).








0	1	2	3	4	5	6	7	8
	И	Т	NE				PX	
	H			-	V			

Рис. 4. Элементы графического паттерна «Формуляр ВО полный (двухстрочный)»

В соответствии с иерархическим принципом структуризации паттернов, сформулированным выше, в паттерне «Формуляр ВО полный (двухстрочный)» использован графический примитив ГП_{Изображение}, который является классом ПОМ и соответствуют структурному элементу «Тип ВО».

Это означает, что данный структурный элемент имеет собственный паттерн (табл. 3).

Таблица 3

Содержание информации	Графическое изображение
1. Самолет:	
-стратегический	
-тактический	
-беспилотный	
-легкомоторный	
-палубный	
2. Вертолет	
3. Ракета	

Подобным образом могут быть сформированы и структурированы паттерны для других понятий. Определенное таким образом множество паттернов $\hat{\pi} = \{\pi_1, \pi_2, \dots\}$ в совокупности с ПОМ и ГОМ определяет предметно-графическое объектное описание ОД АРМ КСА, которое целесообразно представить в виде предметно-графической объектной модели ПГОМ:

$$\text{ПГОМ} = \langle \hat{\pi}, \text{ПОМ}, \text{ГОМ} \rangle \quad (8)$$

В общем виде структура способа формирования предметно-графической объектной модели ОД АРМ КСА (рис. 5).

Таким образом, описание ОД АРМ в виде ПГОМ создает основу для использования естественно-подобных языков в запросах операторов АРМ КСА при формировании множества условий, определяющих необходимую оперативную информацию, выводимую на экран АРМ.

Также следует отметить, что особенностью предлагаемого предметно-графического объектного описания ОД АРМ КСА является использование совокупности предметных и графических моделей в качестве информационного ресурса, что позволяет совместить два соответствующих аспекта представления объектов управления ОД АРМ КСА.

Данный способ, в отличие от известных, основан на совместной объектной декомпозиции объектов управления ОД АРМ и предложенной концептуальной модели ОД АРМ на основе фреймов, что позволяет в рамках единой модели на основе паттернов объектов управления согласовать понятийное и графическое представление ОД АРМ КСА.

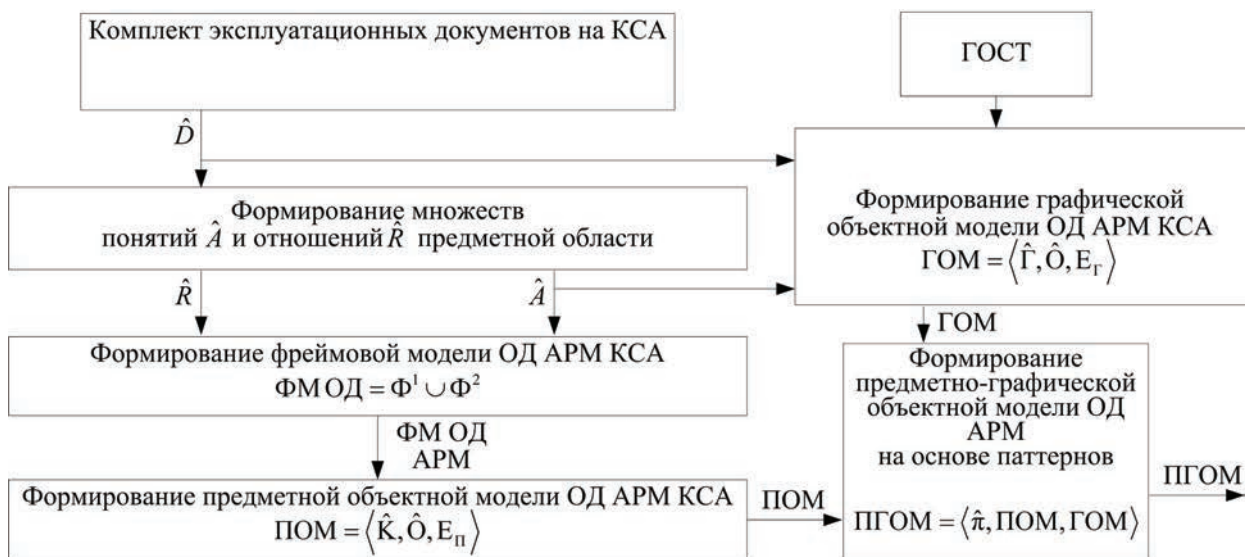


Рис. 5. Общая структура способа формирования предметно-графической объектной модели ОД АРМ

Литература

1. *Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф.* Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000. 384 с.
2. *Говорков А.С., Ахатов Р.Х.* Исследование информационного образа изделия при технологической подготовки производства // Решетнёвские чтения: материалы XIII междунар. науч. конф.: в 2 ч. Ч. 2 / под общ. ред. И.В. Ковалева. Красноярск: СибГАУ, 2009. С. 400–401.
3. *Жук М.А., Омельченко Т.В.* Моделирование процесса аккумуляции знаний о рынке труда на базе фреймового представления // Вестник Оренбургского государственного университета. 2010. № 13. С. 266–272.
4. *Мошев Е.Р., Ромашкин М.А.* Разработка концептуальной модели поршневого компрессора для автоматизации информационной поддержки динамического оборудования // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 10. С. 28–31.
5. *Швецов А.Н.* Метод формирования концептуальной модели предметной области в задачах проектирования распределенных интеллектуальных информационных систем. Интеллектуальные системы // Труды пятого Международ. Симпозиума. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2002. С. 49–51.
6. *Шувал-Сергеев Н.А.* Методика формирования операционных эскизов // Материалы VI всероссийской межвузовской конференции молодых ученых (14–17 апреля 2009 года). СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. Т. 33. С. 269–275.
7. *Минский М.* Фреймы и представление знаний. М.: Энергия, 1979. 150 с.
8. Руководство по применению 44Б6. Информационная модель отображения КСА. Часть 3. АСГК.461262.002 РП2, 149 с.
9. Руководство по применению 44Б6. Порядок ввода основных команд на АРМ КСА. Часть 4. АСГК.461262.002 РП3. 85 с.
10. *Буч Г., Максимчук Р.А., Энгл М., Янг Б. Дж., Коналлен Д., Хьюстон К.* Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений: пер. с англ. 3-е издание. М.: Вильямс, 2008. 720 с.
11. *Блинова Т.А., Порев В.Н.* Компьютерная графика. К.: Юниор, СПб.: КОРОНА принт, К.: Век+, 2006. 520 с.
12. *Петров М.Н., Молочков В.П.* Компьютерная графика. СПб.: Питер, 2002. 735 с.
13. *Fowler M.* Patterns of Enterprise Application Architecture. Boston: Addison-Wesley, 2002. 511 p. ISBN-13: 007–6092019909.
14. *Гамма Э., Хэлм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж.* Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования: пер с англ. СПб.: Питер, 2007. 366 с.
15. *Фримен Э., Фримен Э., Сьерра К., Бейтс Б.* Паттерны проектирования: пер с англ. СПб.: Питер, 2011. 656 с.

A METHOD OF FORMING A SUBJECT-OBJECT MODEL OF THE GRAPHICS DATA DISPLAYED ON THE AUTOMATED WORKSTATION OF THE AUTOMATION SYSTEMS

PAVEL A. MOROZOV,

Yaroslavl, Russia, mpa24@mail.ru

YURIY A. KRUTALEVICH,

Yaroslavl, Russia, ullia57@mail.ru

ROMAN I. ANOSHIN,

Yaroslavl, Russia, roman88an@gmail.com

ANASTASIA D. ZYUZINA,

Yaroslavl, Russia, zyuzina-1996@bk.ru

KEYWORDS: the data displayed on the automated workplace; facilities management; frame model; frame prototype; subject-object model; a graphical object model; a pattern.

ABSTRACT

One of the ways of reducing the time of decision by persons of martial calculation of automation systems may be the management information displayed on the automated workstation using the operator's requests in terms and notions of natural-like language. To implement the proposed directions developed spool piece graphic object model, a conceptual and graphical representation of the structural elements on an automated workplace of automation.

According to the developed method proposes to consider view at the automated workstation as a set of conceptual units representing structural and functional aspects of facilities management. The set of all concepts that define the way each object management is presented in the form of a frame. Next, it defines the type and structure of frames that form a matching set. At the development stage subject object model assisted separation of a plurality of frames forming a

frame model type, thus determines the frame-prototypes. On the basis of a set of frame-prototypes is formed by a plurality of slots to determine the set of classes, which form the basis for a set of objects, which, in turn, determines the corresponding control objects of the information model mapping. Further develop graphic object model, providing a graphical object representation of the control objects of the displayed data on the automated workplace of automation in the visualization tools. Integrating data models on the basis of patterns forms the subject-object model of the graphics data displayed on the automated workplace of automation. Description of the displayed information automated work Mestas the subject graphical object model provides the basis for the use of natural-like languages to query operators automated workflow s automation equipment in the formation of a set of conditions that determine the necessary operational information displayed on the screen. The object of research is the system of information support of decision-making process of automation systems. Subject of research – the method of information support of decision-making process.

REFERENCES

1. Gavrilova T.A., Khoroshevskiy V.F. *Bazy znaniy intellektual'nykh sistem* [Knowledge Bases of intelligent systems]. St. Petesburg: Peter, 2000. 384 p. (In Russian)
2. Govorkov A. S., Akhatov R.H. Issledovanie informatsionnogo obraza izdeliya pri tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva [Investigation of the image information of the product when technological preparation of production]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Resetdevice reading: proceedings of the XIII Intern. scientific. Conf.: 2 pt. Pt. 2]. Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Reshetnev University) Publ., 2009. Pp. 400–401. (In Russian)
3. Zhuk M. A., Omelchenko T.V. Modeling of process of accumulation of knowledge about the labour market based on frame-presentation. *Vestnik of the Orenburg State University*. 2010. No. 13. Pp. 266–272. (In Russian)
4. Moshev E.R., Romashkin M.A. Development of conceptual model of piston compressor for automation of informational support of rotating equipment. *Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering]. 2013. No. 10. Pp. 28–31. (In Russian)
5. Shvetsov A.N. Metod formirovaniya kontseptual'noy modeli predmetnoy oblasti v zadachakh proektirovaniya raspredelennykh intellektual'nykh informatsionnykh sistem/ Intellektual'nye sistemy [A method of forming a conceptual domain model in the problem of design of distributed intelligent information systems. Intelligent systems]. *Trudy Pyatogo Mezhdunarodnogo Simpoziuma* [Proc. The Fifth International. Symposium]. Moscow: MGTU imeni N. Uh. Bauman Publ., 2002. Pp. 49–51. (In Russian)
6. Shuval-Sergeev N.A. Metodika formirovaniya operatsionnykh eskizov [The formation methods of operating sketches]. *Materialy VI vserossiyskoy mezhvuzovskoy konferentsii molodykh uchenykh* [Materials of VI all-Russia interuniversity conference of young scientists]. St. Petersburg: ITMO University Publ., 2009. Vol. 33. Pp. 269–275. (In Russian)
7. Minsky M. *Freymy i predstavlenie znaniy* [Frames and knowledge representation]. Moscow: Energiya, 1979. 150 p. (In Russian)
8. *Rukovodstvo po primeneniyu 44B6. Informatsionnaya model' otobrazheniya KSA* [Guidance on the application of 44B6. The information mapping model KSA]. Pt. 3. ASGK.461262.002 DR2. 149 p. (In Russian)
9. *Rukovodstvo po primeneniyu 44B6. Poryadok vvoda osnovnykh komand na ARM KSA* [Guidance on the application of 44B6. How to enter basic commands into the arm of the KSA]. Pt. 4. ASGK.461262.002 IS3. 85 p. (In Russian)
10. Booch G., Maksimchuk R.A., Engle M.W., Young B.J., Conallen J., Houston K.A. *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*. 3rd ed. Addison-Wesley Professional, 2007. 717 p.
11. Blinova T.A., Porev V.N. *Komp'yuternaya grafika* [Computer graphics: a tutorial]. Kyiv: Yuniior, St. Petersburg: KORONA print, Kyiv: Vek+, 2006. 520 p. (In Russian)
12. Petrov M.N., Molochkov V.P. *Komp'yuternaya grafika* [Computer graphics: a Textbook]. St. Petesburg: Peter, 2002. 573 p. (In Russian)
13. Fowler M. *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Boston: Addison-Wesley, 2002. 511 p. ISBN-13: 007-6092019909.
14. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J. *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley Professional, 1995. 395 p.
15. Freeman E., Freeman E., Sierra K., Bates B. *Head First Design Patterns*. O'Reilly Media, 2004. 642 p.

INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Morozov P. A., PhD, Associate Professor of automated control systems of Yaroslavl higher military school of antiaircraft defense; Krutalevich Yu. A., Postassistant of the Department of automated control systems of Yaroslavl higher military school of antiaircraft defense; Anoshin R. I., Chief of office of "Foundation-M" KTU RTC BOUP Yaroslavl higher military school of antiaircraft defense. Zyuzina A. D., Student of the Yaroslavl higher military school of antiaircraft defense.

For citation: Morozov P.A., Krutalevich Yu.A., Anoshin R.I., Zyuzina A.D. A method of forming a subject-object model of the graphics data displayed on the automated workstation of the automation systems. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 5. Pp. 26–36. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10163 (In Russian)

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10164

Методика оценки возможностей инфраструктуры испытательного космодрома по запуску малых космических аппаратов с целью наращивания возможностей национальной орбитальной группировки

МОСИН

Дмитрий Александрович¹

ДУГА

Вадим Вадимович²

АННОТАЦИЯ

В работе представлена методика оценки возможностей инфраструктуры испытательного космодрома по подготовке и запуску малых космических аппаратов. На современном этапе развития ракетно-космической техники существует тенденция миниатюризации элементной базы, применяемой при проектировании космических аппаратов. В связи с этим, всё чаще приходится осуществлять подготовку и запуск именно малых космических аппаратов. Основной целью разработки приведенной методики является создание научно-методического аппарата, необходимого для планирования подготовки и запуска малых космических аппаратов. Отличительной особенностью данной методики является учет группы показателей, которые не были учтены в предыдущих работах. Данными показателями являются: состояние запасов космических средств находящихся на испытательном космодроме, состояние запасов компонентов ракетного топлива, необходимого для заправки космических средств, численность личного состава участвующего в подготовке космических средств. Кроме того, в данной методике предусмотрена допоставка как космических средств, так и компонентов ракетного топлива в случае, если текущая обеспеченность не соответствует требуемому запасу, необходимому для подготовки и запуска необходимого количества ракет космического назначения. Ещё одной важной особенностью данной методики является применение сетевых моделей GERT для расчёта времени подготовки составных частей ракет космического назначения. В существующей практике процесс подготовки составных частей ракеты космического назначения описывается сетевыми графиками, в которых не учитывается вероятность возникновения неисправностей (отказов) и интенсивность выполнения операций, составляющих указанный процесс. Применение сетевых моделей GERT, учитывая указанные факторы, позволяет произвести расчёт времени подготовки составных частей ракеты космического назначения с большей достоверностью.

Сведения об авторах:

¹к.т.н, доцент, доктарант Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, sin-da@mail.ru

²научный сотрудник Научно-испытательного центра войсковой части 13991, г. Мирный, Россия, dugavadim@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: инфраструктура испытательного космодрома; малый космический аппарат; орбитальная группировка; ракетно-космический комплекс; ракета космического назначения; система оперативного развертывания и восполнения орбитальных группировок; сетевая модель GERT.

Для цитирования: Мосин Д.А., Дуга В.В. Методика оценки возможностей инфраструктуры испытательного космодрома по запуску малых космических аппаратов с целью наращивания возможностей национальной орбитальной группировки // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 5. С. 37-44. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10164

Введение

Развитие ракетно-космической техники (РКТ) на современном этапе идет по пути уменьшения массогабаритных характеристик, как отдельных элементов бортовых систем, так и космических аппаратов (КА) в целом [1,3,4]. Именно с этим связан рост объемной доли запускаемых малых космических аппаратов (МКА) по отношению к средним и тяжелым КА. В направлении МКА в целом, и в элементной базе для МКА в частности, страны Европы и США на настоящий момент занимают лидирующие позиции [5,7,12]. Вместе с тем, важность данного направления для экономического развития (и не только для него) несомненна. Возможно сделать вывод о том, что в ближайшие годы одной из важнейших задач отечественной ракетно-космической отрасли станет развитие направления МКА [6].

На настоящий момент в ВКА имени А. Ф. Можайского на кафедре «Космических аппаратов и средств межорбитальной транспортировки» проводится комплекс исследований посвященных МКА. В апреле 2016 проведена Всероссийская НПК посвященная «Проблемам создания и применения МКА и робототехнических средств в интересах ВС РФ», в рамках международных военно-технических форумов «Армия-2015» и «Армия-2016» проведены заседания круглых столов посвященных МКА.

Одной из важнейших задач в рамках данного направления является «Создание системы оперативного развертывания и восполнения орбитальных группировок космических систем на основе малых КА», обеспечение выполнения данной задачи является неотъемлемым условием для достижения целей эффективного создания и применения космических систем на базе МКА для решения задач воздушно-космической обороны страны.

Одновременно на современном этапе развития РКТ создание системы оперативного развертывания и восполнения ОГ КС на основе МКА представляется задачей выбора рационального варианта применения существующей инфраструктуры испытательных космодромов (ИИК). Так как энергетических возможностей существующих ракетно-космических комплексов (РКК) для выполнения задач по запуску МКА более чем достаточно, на первый план в данном вопросе выходит экономическая целесообразность и количественная составляющая ракет космического назначения (РКН). При этом для рационального выбора варианта применения ИИК необходимо достоверно оценить существующие возможности ИИК. Таким образом возникает задача по разработке методики оценки возможностей ИИК по запуску МКА с целью наращивания возможностей национальной ОГ.

Основная часть

Приведенная далее методика, разработана с целью обеспечения выполнения требований [11] в рамках НИИР

«Анализатор» [10], проводимом на космодроме «Плесецк» в 2016 году.

Степень задействования ИИК главным образом зависит от перечня задач, выполняемых ИК.

Этап 1. Исходя из этого в первую очередь необходимо определить количество и тип МКА N^i (i – вид КА), которые необходимо вывести на целевые орбиты.

Этап 2. Следующим шагом необходимо определить состав космических средств (КСр), необходимый для выведения ОГ МКА $N_{КСр}^k, k \in \{1...n\}$.

Этап 3. Далее необходимо сравнить запас КСр находящихся на ИК с потребным $N_{КСр}^k \geq N_{КСр}^i$ количеством КСр, необходимым для выведения N^i . Так как в современных условиях зачастую запас КСр на ИК отсутствует и КСр поставляются на ИК непосредственно перед подготовкой — высока вероятность необходимости допоставки КСр.

Этап 4. Определение возможности инфраструктуры ИК по подготовке КСр осуществляется в несколько этапов.

4.1. Сравнение списочной численности личного состава войсковых частей ИК и потребного количества необходимого для подготовки $N_{КСр}^k$.

Для сравнения списочной численности личного состава войсковых частей ИК с количеством личного состава личного состава необходимого для формирования боевых расчетов подготовки КСр $N_{(5)}^P \geq N^P$, определение количества смен $n_{смен}$ актуально выражение (1).

$$N_{(5)}^P = \langle n_{Т}^{PH}, n_{С}^{PH}, n_{Т}^A, n_{Т}^C \rangle \quad (1)$$

где $n_{ТК}^{PH}$ — численность боевого расчета подготовки РН на ТК;

$n_{СК}^{PH}$ — численность боевого расчета подготовки РН на СК;

$n_{ТК}^{РБ}$ — численность боевого расчета подготовки РБ на ТК;

$n_{ТК}^{КА}$ — численность боевого расчета подготовки КА на ТК;

$n_{ЗС}^{3С}$ — численность боевого расчета подготовки КРТ на ЗС и заправки РБ и КА.

4.2. Сравнение текущего запаса компонентов ракетного топлива (КРТ) с потребным количеством КРТ для запусков РКН $V_{(7)}^{PT} \geq V^{PT}$, в случае несоответствия, его допоставка. В случае отсутствия возможности поставки КРТ от поставщиков, с которыми в плановом порядке заключены договорные отношения, допоставка КРТ с использованием системы альтернативных поставщиков КРТ.

$$V_{(7)}^{PT} = \langle v_{P-1}^{PT}, v_{T-1}^{PT}, v_{O2}^{PT}, v_{AT}^{PT}, v_{H}^{PT}, v_{M}^{PT}, v_A^C, v_{Г}^{CG} \rangle^* \quad (2)$$

где v_{P-1}^{PT} — совокупный запас керосина РГ-1;

v_{T-1}^{PT} — совокупный запас керосина Т-1;

$v_{O_2}^{PT}$ — совокупный запас жидкого кислорода;

v_{AT}^{PT} — совокупный запас азотного тетраоксида;

$v_{H M}^{PT}$ — совокупный запас несимметричного диметил гидразина;

v_A^C — совокупный запас азота;

v_G^{CG} — совокупный запас гелия.

* в данном пункте приведены типовые КРТ и СГ используемые при подготовке РКН на ИК

Этап 5. Следующим пунктом в методике оценки является расчет времени подготовки КСр. Время, затрачиваемое на выведение ОГ КА, главным образом зависит от количества и времени подготовки и запуска каждой РКН.

Отсчет времени выполнения операции начинается с момента принятия решения на наращивание и восполнение ОГ КА и заканчивается при выведении последнего КА (последнего БКА). С учетом времени на проведение подготовки и пуска, а также проведения послепусковых операций, получим:

$$T_p = \sum_{i=1}^{N_n} T_i + \sum_{i=1}^{N_n-1} \tau_i, \quad (3)$$

где T_p — время выведения ОГ КА;

T_i — время пуска i -ой РКН;

τ_i — время проведения послепусковых операций и ремонтно-восстановительных работ на стартовом комплексе после пуска i -ой РКН;

N_n — потребное для выведения ОГ КА количество пусков РКН.

Пусть каждая конкретная ракета-носитель (РН) способна вывести V КА. Тогда получим количество необходимых пусков (4), причем в случае, если значение N_n является дробным числом, его следует округлить до ближайшего большего целого числа.

$$N_n = \frac{n}{v}, \quad (4)$$

Время постановки в систему одного или нескольких КА (T_i) (запуском одной РКН определяется исходя из следующего выражения (5):

$$T_i = T_{ni} + T_{выв}^? \quad (5)$$

где T_{ni} — время подготовки i -го РКН к пуску;

$T_{выв}^?$ — время выведения КА i -м РКН;

Отметим, что $T_{выв}^?$ зависит от продолжительности ожидания старта. Связано это с тем, что приказ на подготовку к запуску РКН может поступить в любое время и срок окончания подготовки может не совпасть с окнами пуска, либо пуск РКН может не попасть в запланирован-

ное «окно» пуска в результате отказа или неисправности при подготовке и необходимо будет ожидать удовлетворяющего требуемым условиям момента. Методики расчета времени ожидания старта и времени ввода КА в систему индивидуальны для каждого пуска и в рамках данной статьи не рассматриваются. Примем для простоты расчета, что пуск РКН производится сразу по завершению предпусковых операций.

Так как подготовка КА к запуску это комплексная задача, необходимо рассмотреть все её составляющие. При расчете T_{Π} , учитывается время подготовки ракеты-носителя (РН), а в случае с выводом полезной нагрузки на высокоэнергетические орбиты — время подготовки разгонного блока (РБ). Таким образом, время подготовки к пуску имеет следующий вид:

$$T_{\Pi} = T_{TK}^{PKH} + T_{TP}^{PKH} + T_{CK}^{PKH}, \quad (6)$$

где T_{TK}^{PKH} — время подготовки РН на техническом комплексе (ТК);

T_T^{PH} — время подготовки РКН на стартовом комплексе (СК);

T_{CK}^{PKH} — время транспортировки РКН на СК.

Чаще всего длительность подготовки РН на ТК значительно выше, чем РКН на СК, а T_T^{PH} актуально не для всех ракетно-космических комплексов (РКК) и при небольшой удаленности технических и стартовых комплексов может быть пренебрежимо мало. Формула для определения T_{TK}^{PKH} (7) выглядит следующим образом:

$$T_{TK}^{PKH} = T_{\Pi}^{C^4} + T_{\Pi}^{K^4G^4}, \quad (7)$$

где $T_{\Pi}^{C^4}$ — время подготовки составных частей РКН, т.е. РН, КА, РБ, сборочно-защитный блок (СЗБ). Эти элементы требуют наибольших временных затрат на подготовку, но чаще всего работы с ними идут параллельно, зачастую даже в разных сооружениях и на разных площадках. Поэтому показателем $T_{\Pi}^{C^4}$ выбирается наибольшее время подготовки в соответствии с графиками проводимых работ.

$T_{\Pi}^{K^4G^4}$ — время подготовки КГЧ, включающее в себя сборку, накатку, стыковку, совместные электрические проверки и при необходимости другие операции.

Для подготовки малых КА актуально следующее допущение:

$$T_{\Pi}^{PH} \leq T_{\Pi}^{KA} \leq T_{\Pi}^{PB}, \quad (8)$$

где T_{Π}^{PH} — время подготовки РН к пуску (включает в себя подготовку на ТК, транспортировку и подготовку на СК);

T_{Π}^{KA} — время подготовки КА (включает в себя время подготовки КА на ТК);

T_{Π}^{PB} — время подготовки РБ (которое включает в себя подготовку РБ на ТК).

Соотношение (8) обусловлено тем, что малые КА обычно прибывают на испытательный полигон уже правленными, а РБ заправляют на заправочной станции. В применении к МКА, рассмотрим расчет T_{Π}^{PB} (9)

$$T_{\Pi}^{PB} = T_{TK}^{PB} + T_{TP}^{PB} + T_{Zapr}^{PB}, \quad (9)$$

где T_{TK}^{PB} — время подготовки РБ на ТК;

T_{TP}^{PB} — время транспортировки РБ (включает транспортировку РБ на заправочную станцию (ЗС) и обратно);

T_{Zapr}^{PB} — время заправки РБ на ЗС.

Значения всех перечисленных в выражениях (6)–(9) величин являются строго детерминированными и описываются сетевыми графиками в эксплуатационной документации (инструкциях по эксплуатации ИЭ-10 и ИЭ-11). Однако сравнивая сетевые графики использованные при планировании и реальное время подготовки КСр, оказывается что времена существенно различаются. Сетевые графики не учитывают вероятность возникновения отказов и неисправностей. Одним из средств исследования стохастических характеристик технических объектов, технологических циклов и программных комплексов является система GERT (Graphical Evaluation and Review Technique) [2,13]. Система GERT применяется для моделирования промышленных комплексов, исследования вероятностно-временных характеристик локальных сетей [8] и т.д. В моделях GERT состоянием исследуемого объекта соответствуют узлы графа, а выполняемым операциям — дуги (ветви) графа. Дуга характеризуется функцией, равной произведению производящей функции моментов времени исполнения на вероятность выбора дуги (можно рассматривать также любой параметр, который обладает аддитивностью по дугам любого пути). Основная выходная характеристика GERT-сети — производящая функция моментов $M_E(s)$. Для нахождения значений $M_E(s)$ используется топологическое уравнение Мейсона для замкнутых потоковых графов. Зная j -ю частную производную по s функции $M_E(s)$ и полагая $s=0$, можно найти j -й момент μ_{jE} относительно начала координат:

$$\mu_{jE} = \frac{\partial^j [M_E(s)]}{\partial s^j}, s = 0.$$

При увеличении j определение моментов становится все более проблематичным из-за сложности нахождения производных. Формула Мейсона позволяет получить эквивалентную производящую функцию моментов GERT-сети через производящие функции моментов петель порядка $\alpha, \alpha = 1, \alpha_{max}$, которые образуются из всевозможных сочетаний петель первого порядка, не имеющих общих узлов

(петля первого порядка GERT-сети соответствует простому контуру в ориентированном графе). С увеличением размерности GERT-сети может резко возрастать число петель порядка α , что ведет к экспоненциальному увеличению времени счета. Рассматривается численный метод нахождения значений закона распределения времени исполнения GERT-сети, основанный на применении формулы обращения и интерполяции характеристической функции GERT-сети многочленом Лагранжа второй степени. При этом используется топологическое уравнение Мейсона, что снижает размерность используемых моделей.

Целью исследования ставится поиск в численном виде плотности распределения вероятностей времени исполнения GERT-сети для заданного стока. В разрабатываемом алгоритме не должны выполняться операции с петлями порядка $\alpha < 1$ GERT-сети [9,14,15].

После нахождения плотности распределения вероятности необходимо проинтегрировать её в программе MathLab, в результате чего мы получаем закон распределения вероятности. Получив закон распределения вероятности и зная требуемые показатели надежности (заданные в ТТЗ на комплекс), возможно найти время выполнения комплекса операций с КСр.

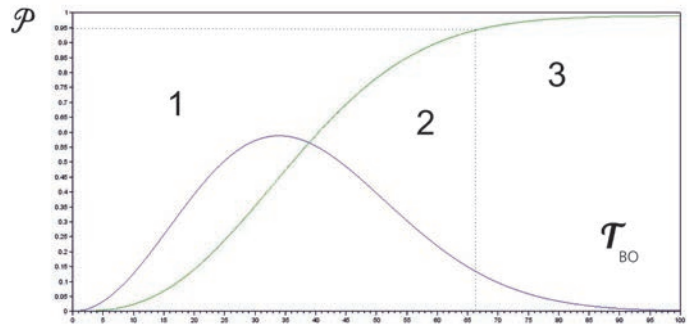


Рис. 1. Пример нахождения времени продолжения подготовки БКА на ТК: 1 — плотность распределения вероятности; 2 — закон распределения вероятности; 3 — время проведения подготовки с заданным в ТТЗ вероятностным показателем

Однако сетевых моделей отдельных групп операций недостаточно для описания всего процесса выведения ОГ МКА. Весь процесс выведения ОГ МКА возможно представить в виде схемы (рис. 2).

Таким образом, используя выражения (4)–(7) на основе (3) получаем время постановки одного или нескольких (для МКА) КА запуском одной РКН. В случае, если развертывание ОГ осуществляется различными типами РКН или с различных комплексов, следует рассчитывать временные показатели подготовки и пуска для каждого случая

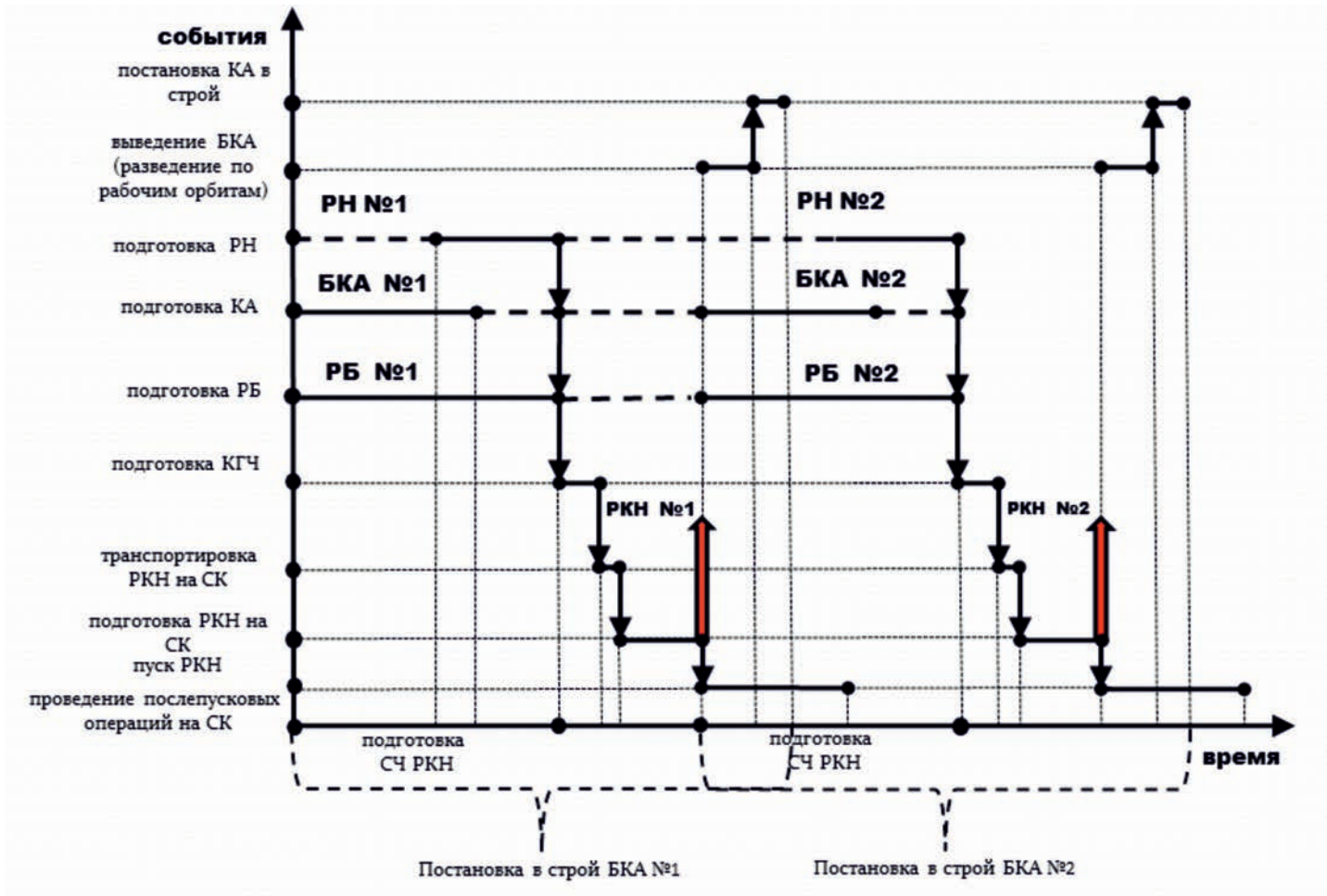


Рис. 2. Схема выведения ОГ состоящей из двух БКА

отдельно. Так как подготовка на всех РКК осуществляется параллельно, общее время находится по выражению:

$$T_{\Pi}^{\text{РКК1}} \geq T_{\Pi}^{\text{РКК2}} \geq T_{\Pi}^{\text{РКК}i}, \quad (10)$$

В качестве времени подготовки СЧ РКН выбирается подготовка большее время одной СЧ. Кроме того, $T_{\text{выв}i}$ в выражении (3) в условиях, когда возникающие неисправности и их устранение приводит к смещению графика подготовки, также оказывает существенное влияние на сроки проведения пусков в зависимости от времени устранения и имеющимися окнами пуска.

Основной особенностью запуска МКА является их запуск целыми БКА, однако необходимо учитывать количество орбитальных плоскостей в которые необходимы вывести ОГ МКА. Очевидно, что в случае если РН способна вывести 4 МКА, а в орбитальной плоскости необходимо лишь 2, для выведения двух других потребуется запуск ещё одной РН. Таким образом для выведения ОГ МКА перспективными будут являться РН легкого клас-

са с небольшими энергетическими способностями — но и с минимальными экономическими затратами. Этим экзотическим в отечественной космической отрасли требованиям отвечают конверсионные прототипы. РН созданные на базе доработанных МБР, гарантийный ресурс которых близок к выработке.

Этап 6. Сравнение времени подготовки КСр с планируемой продолжительностью периода непосредственной угрозы агрессии $T_{\Pi} \geq T_{\Pi}^{\text{н}}$. В случае несоответствия, определение первоочередности выведения ОГ МКА.

Заключение

Создание системы оперативного развертывания и восполнения ОГ КС на основе МКА является сложной, в первую очередь с экономической точки зрения, задачей. Однако существуют возможности по минимизации затрат на её создание. Речь идет о конверсионных программах. На настоящий момент РКК, созданные в рамках данных программ, выполняют задачи по запуску МКА главным образом в рамках программ международного сотрудни-

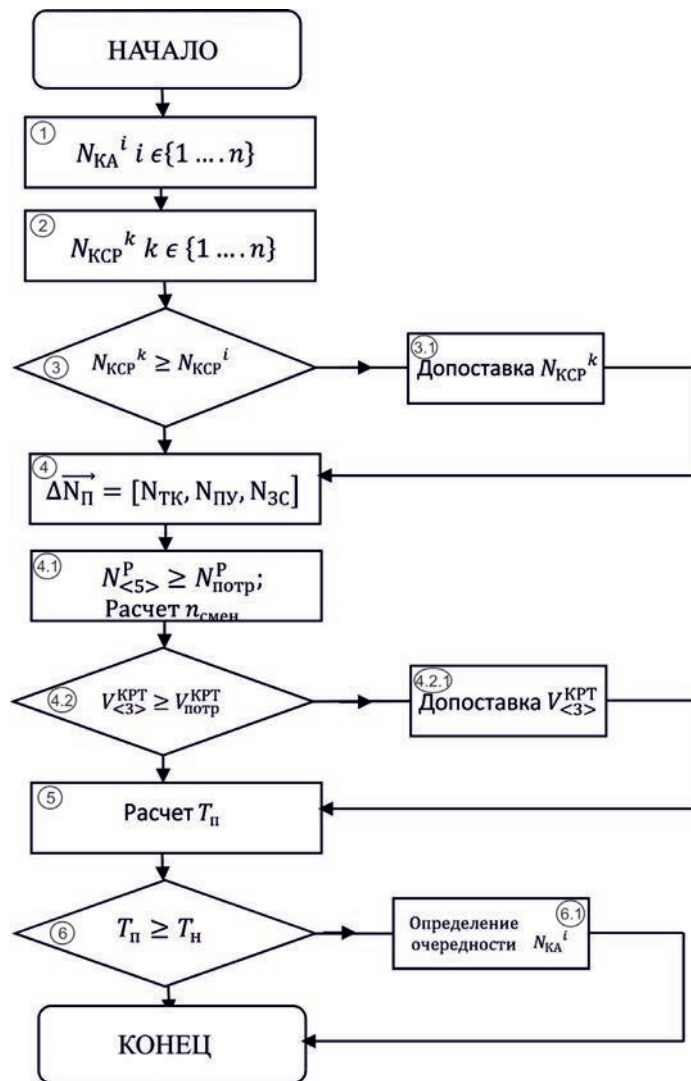


Рис. 3. Схема методики оценки возможности ИИК по запуску МКА с целью наращивания возможностей национальной ОГ

чества. У направления конверсионных программ есть огромный потенциал, полным ходом идет перевооружение РВСН, в связи с чем высвобождается большой объем МБР, подлежащих утилизации.

Создание системы оперативного развертывания и восполнения ОГ КС на основе МКА в которой в качестве средств выведения будут использоваться РН разработанные на основе доработанных МБР, позволит не только выполнить задачу по её созданию с минимальными затратами, но и в кратчайшие сроки.

Литература

1. Аверкиев Н.Ф., Власов С.А., Киселев В.В., Салов В.В. Обоснование параметров орбит космических аппаратов для повышения числа пролетов над районом поверхно-

сти Земли // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2016. № 665. С.48–53.

2. Абдулаев Д.А., Амирсаидов У.Б. Моделирование локальных вычислительных сетей с учетом вероятностно-временных характеристик // Автоматика и вычислительная техника. 1994. № 3. С. 151–160.

3. Алифанов О.М., Медведев А.А., Соколов В.П. Формирование облика малых космических аппаратов нового поколения // Наука и технологии в промышленности. 2011. № 7. С. 69–91.

4. Дуга В.В. Бортовые системы космических аппаратов дистанционного зондирования земли // Сборник трудов Всеармейской военно-научной конференции «Проблемы построения системы воздушно-космической обороны Российской Федерации». СПб., 2015. Т. 1. С. 285–287.

5. Дуга В.В., Кантельцев Д.Н. Основные тенденции развития малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Сборник трудов XX НПК «Научно-практические аспекты совершенствования управления космическими аппаратами и информационного обеспечения запусков космических аппаратов» (Краснознаменск, 10–11 ноября 2015 г.). Краснознаменск, 2015. С. 24–27.

6. Дуга В.В., Федоров И.В. Современное состояние развития малых космических аппаратов дистанционного зондирования земли // Сборник научных трудов VI Молодежной научно-технической конференции «Инновационный арсенал молодежи» (Санкт-Петербург, 27–29 мая 2015 г.). СПб., 2015. С. 100–102.

7. Дуга В.В. Сравнительный анализ характеристик отечественных и зарубежных космических аппаратов дистанционного зондирования земли // Сборник научных трудов V Молодежной научно-технической конференции «Инновационный арсенал молодежи». СПб., 2014. С. 98–101.

8. Корячко В.П., Шибанов А.П. Анализ и оптимизация временных характеристик ЛВС сложной технической системы // 3-я Всесоюзная конференция «Локальные вычислительные сети». Рига, 1988. С. 165–168.

9. Корячко В.П., Шибанов А.П., Шибанов В.А. Численный метод нахождения закона распределения выходных величин GERT-сети // Информационные технологии. 2001. № 7. С. 16–21.

10. Методика оценки возможностей испытательного космодрома при выведении орбитальных группировок малых космических аппаратов: отчет о НИИР (промежуточ.): 27–35/ 1 ГИК МО РФ; рук. Зотов А.С.; исполн.: Дуга В.В. Мирный, 2016. 58 с. Инв. № 373/НИЦ.

11. Основные положения Основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу. Утв. Президентом РФ от 19.04.2013 N Пр-906 // Законы, кодексы и нормативно-правовые акты в Российской Федерации. URL: <http://legalacts.ru/doc/osnovnye-polozeniija-osnov-gosudarstvennoi-politiki-rossiiskoi-federatsii/> (дата обращения 15.09.2018).

12. Соколов В.П., Завалишин И.В., Милюков И.А. Инновации в аэрокосмической деятельности — будущее российской космонавтики // Качество. Инновации. Образование. 2009. № 12. С. 36–38.

13. Филлипс Д., Гарсиа-Диас Д. Методы анализа сетей. М.: Мир, 1984. 496 с.

14. Шибанов А.П. Нахождение закона распределения выходной величины GERT-сети большой размерности // Информационные технологии. 2007. № 1. С. 42–45.

15. Шибанов А.П. Нахождение плотности распределения времени исполнения GERT-сети на основе эквивалентных упрощающих преобразований // Автоматика и телемеханика. 2003. Выпуск 2. С. 117–126.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE INFRASTRUCTURE OF THE TEST SPACEPORT FOR LAUNCHING SMALL SPACECRAFT WITH THE AIM OF INCREASING THE CAPABILITIES OF THE NATIONAL ORBITAL GROUPING

DMITRY A. MOSIN,

St.-Petersburg, Russia, sin-da@mail.ru

VADIM V. DUGA,

Mirny, Russia, dugavadim@mail.ru

KEYWORDS: test spaceport infrastructure; small spacecraft; orbital groupings; rocket and space complex; space rocket; system of operational deployment and replenishment of orbital groupings; network models GERT.

ABSTRACT

This work presents a methodology for assessing the capacity of the test spaceport infrastructure for preparing and launching small spacecraft. At the present stage of development of rocket and space technology, there is a tendency of miniaturization of the element base used in designing spacecraft. In this connection, it is increasingly necessary to prepare and launch precisely small spacecraft. A distinctive feature of this technique is the consideration of a group of indicators that were not taken into account in previous works. These indicators are: the state of the reserves

of the space assets located on the test spaceport, the state of the stocks of the propellant components necessary for fueling the space assets, the number of personnel involved in the preparation of the space assets. In addition, this method provides for the delivery of both space assets and propellant components in the event that the current provision does not meet the required reserve required to prepare and launch the required number of space rockets. Another important feature of this technique is the use of GERT network models for calculating the preparation time for

components of space rockets. In current practice, the process of preparing components of a space rocket is described by network graphs, which do not take into account the probability of malfunctions (failures) and the intensity of the operations that make up this process. The use of network GERT models, taking into account the indicated factors, makes it possible to calculate the preparation time for components of a space rocket with greater reliability.

REFERENCES

1. Averkiev N.F., Vlasov S.A., Kiselev V.V., Salov V.V. Obosnovanie parametrov orbit kosmicheskikh apparatov dlya povysheniya chisla proletoy nad rayonom poverkhnosti Zemli [Justification of the parameters of the orbits of spacecraft to increase the number of spans over the surface of the Earth]. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhayskogo* [Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky]. 2016. No. 665. Pp. 48–53.
2. Abdulaev D.A., Amirsaid U. B. Simulation of local computer networks taking into account probability-time characteristics. *Automation and Remote Control*. 1994. No. 3(55). Pp. 427–434.
3. Alifanov OM, Medvedev A.A., Sokolov V.P. Formirovaniye oblika malykh kosmicheskikh apparatov novogo pokoleniya [Formation of the appearance of small spacecraft of a new generation]. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and Technology in Industry]. 2011. No. 7. Pp. 69–91. (In Russian)
4. Duga V.V. Bortovye sistemy kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya [Onboard systems of spacecraft for remote sensing of the earth]. *Sbornik trudov Vsearmeyskoy voenno-nauchnoy konferentsii "Problemy postroyeniya sistemy vozdušno-kosmicheskoy oborony Rossiyskoy Federatsii"* [Collection of works of the All-Army Military-Scientific Conference "Problems of building the system of aerospace defense of the Russian Federation"]. St. Petersburg, 2015. Vol. 1. Pp. 285–287. (In Russian)
5. Duga V.V. Kapteltsev D.N. Osnovnye tendentsii razvitiya malykh kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Main trends in the development of small spacecraft for remote sensing of the Earth]. *Sbornik trudov XX nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchno-prakticheskie aspekty sovershenstvovaniya upravleniya kosmicheskimi apparatami i informatsionnogo obespecheniya zapuskov kosmicheskikh apparatov"* [Proceedings of the XX scientific-practical conference "Scientific and practical aspects of improving spacecraft control and information support of spacecraft launches". Krasnoznamensk, 10–11 November 2015]. Krasnoznamensk, 2015. Pp. 24–27. (In Russian)
6. Duga V.V. Fedorov I.V. Sovremennoye sostoyaniye razvitiya malykh kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya zemli [The current state of development of small spacecraft for remote sensing of the earth]. *Sbornik nauchnykh trudov VI Molodezhnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Innovatsionnyy arsenal molodezhi"* [Proceedings of the VI Youth scientific and technical conference "Innovative Arsenal of Youth". St. Petersburg, 27–29 may 2015]. St. Petersburg, 2015. Pp. 100–102. (In Russian)
7. Duga V.V. Sravnitel'nyy analiz kharakteristik otechestvennykh i zarubezhnykh kosmicheskikh apparatov distantsionnogo zondirovaniya zemli [Comparative analysis of the characteristics of domestic and foreign remote sensing spacecraft]. *Sbornik nauchnykh trudov V Molodezhnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Innovatsionnyy arsenal molodezhi"* [Proceedings of the VI Youth scientific and technical conference "Innovative Arsenal of Youth"]. St. Petersburg, 2014. Pp. 98–101. (In Russian)
8. Koryachko V.P., Shibano A.P. Analiz i optimizatsiya vremennykh kharakteristik LVS slozhnoy tekhnicheskoy sistemy [Analysis and optimization of the time characteristics of the LAN of a complex technical system]. *3-ya Vsesoyuznaya konferentsiya «Lokal'nye vychislitel'nye seti»* [3rd All-Union Conference "Local Area Networks"]. Riga, 1988. Pp. 165–168.
9. Koryachko V.P., Shibano A.P., Shibano V.A. Chislennyy metod nakhozhdeniya zakona raspredeleniya vykhodnykh velichin GERT-seti [Numerical method for finding the distribution law of the output values of the GERT-network]. *Informatsionnyye tekhnologii* [Information technologies]. 2006. No. 7. Pp. 16–21. (In Russian)
10. *Methods of assessment of possibilities of testing cosmodrome in deriving the orbital groups of small satellites: report NIIR (intermediate.)* [Methods for assessing the capabilities of the test spaceport during the orbital groupings of small spacecraft: the report on the NIIR (Intermediate): 27–35 / 1 GIK MO RF]. Hands: Zotov A.S.; Execution: Duga V.V. Mirny, 2016. 58 p. Inv. No. 373 / SIC. (In Russian)
11. Osnovnye polozheniya Osnov gosudarstvennoy politiki Rossiyskoy Federatsii v oblasti kosmicheskoy deyatel'nosti na period do 2030 goda i dal'neyshuyu perspektivu. Utv. Prezidentom RF ot 19.04.2013 N Pr-906 [The main provisions of the state policy of the Russian Federation in the field of space activities for the period up to 2030 and beyond. Approved. The President of the Russian Federation of 19.04.2013 N PR-906]. *Zakony, kodekсы i normativno-pravovye akty v Rossiyskoy Federatsii* [Laws, codes and regulations in the Russian Federation]. URL: <http://legalacts.ru/doc/osnovnye-polozheniya-osnov-gosudarstvennoi-politiki-rossiiskoi-federatsii/> (date of access 15.09.2018). (In Russian)
12. Sokolov V.P., Zavalishin I.V., Milyukov I.A. Innovatsii v aerokosmicheskoy deyatel'nosti – budushchee rossiyskoy kosmonavтики [Innovations in aerospace – the future of the Russian space industry]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. 2009. No. 12. Pp. 36–38. (In Russian)
13. Phillips D., Garcia-Diaz A. *Fundamentals of Network Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1981, 474 p.
14. Shibano A.P. Nahozhdeniye zakona raspredeleniya vyhodnoy velichiny GERT-seti bol'shoj razmernosti [Finding the law of distribution of the output value of a GERT-network of large dimension]. *Informatsionnyye tekhnologii* [Information technologies]. 2007. No. 1. Pp. 42–45. (In Russian)
15. Shibano A.P. Finding the Density of the Distribution of the Runtime of a GERT Network Based on Equivalent Simplifying Transformations. *Automation and Remote Control*. 2003. No. 2. Pp. 117–126. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Mosin D. A., PhD, Docent, Doctoral Candidate, Military Space Academy; Duga V.V., Research Officer of the Research and Test center, 13991 State test spaceport Ministry of defense of the Russian Federation.



НПЦ ИРС

Научно-производственный центр
Информационных региональных систем

▶ npcirs.ru

Закрытое акционерное общество "Научно-производственный центр информационных региональных систем" является предприятием, разрабатывающим автоматизированные системы специального назначения.

Основными направлениями нашей деятельности являются:

- проектирование, создание и ремонт автоматизированных систем управления и их составных частей, систем обработки данных, программного обеспечения, информационных систем для государственных организаций и коммерческих компаний;
- разработка общесистемного и прикладного ПО, внедрение и сопровождение информационных систем;
- защита информации в системах управления, локальных вычислительных сетях, программно-аппаратных комплексах, телекоммуникационных системах;
- производство и поставка технических средств, в офисном и защищенном исполнении;
- создание, внедрение и сопровождение оперативных и учетных систем любой сложности;
- анализ автоматизированных систем на предмет разработки к ним классификаторов и нормативно-справочной информации;
- разработка проектов и создание глобальных, корпоративных, локальных телекоммуникационных систем и структурированных кабельных сетей.

Создаваемые предприятием средства (комплексы средств автоматизации, программные и программно-информационные комплексы, информационные изделия) эксплуатируются в различных государственных органах: в органах военного управления Министерства обороны РФ, а также на предприятиях, в организациях, в органах местного самоуправления субъектов РФ, занимающихся воинским учетом.

Научные исследования в сфере КНСИ позволяют нам качественно анализировать автоматизированные системы и разрабатывать к ним классификаторы и нормативно-справочную информацию.

На данный момент уже имеющиеся разработки позволяют:

- создавать классификаторы по единым правилам, независимо от их содержимого;
- создавать массивы классификационной, нормативно-справочной информации в виде эталонных и контрольных экземпляров;
- создавать и вести централизованный банк УММ классификаторов (нормативные документы кодирования сведений);
- комплектовать массивы КНСИ для поставки на объекты, в части касающейся;
- проводить учет КНСИ и поставку на объекты автоматизации;
- централизованно вносить изменения в КНСИ;
- синхронизировать взаимодействие объектов, использующих классификаторы (КНСИ) и УФД;
- обеспечить совместимость данных баз данных объектов;
- обеспечить обмен базами данных между различными автоматизированными системами с территориально разнесенными источниками информации.

Коллектив ЗАО "НПЦ ИРС" образован на основе коллектива Государственного унитарного предприятия. Унаследовав его опыт научно-производственной деятельности, профессиональные знания коллектива специалистов, который целенаправленно занимается проблематикой автоматизации деятельности должностных лиц органов военного управления Вооруженных Сил РФ и разработкой единого информационного обеспечения автоматизированных систем военного назначения более 15 лет, выполняя как теоретические, так и практические работы в этой области.



НПЦ ИРС

Научно-производственный центр
Информационных региональных систем

▶ npcirs.ru

Телефон: 8(800)100-40-90
E-mail: administrator@npcirs.ru

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10165

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДА ДЕКОДИРОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО БЛОКОВОГО КОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВТОРОГО АЛГОРИТМА ЧЕЙЗА

КУЗНЕЦОВ

Виталий Степанович¹

ВОЛКОВ

Алексей Станиславович²

БЫКОВ

Александр Вячеславович³

Сведения об авторах:

¹д.т.н., профессор кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», г. Москва, Зеленоград, vitaliy_kuznetsov@hotmail.com

²к.т.н., доцент кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», г. Москва, Зеленоград, leshvol@mail.ru

³студент кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», г. Москва, Зеленоград, myalex96@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В работе приведено описание принципа работы квадратурной сигнально-кодовой конструкции с применением троичных каскадных кодов для каждой из квадратурных осей. Выбрана система с каскадным кодированием, в которой используется внутренний троичный код и внешний максимальный q-ичный код Рида-Соломона. Троичный код представлен в виде произведения двух двоичных подкодов. Их декодирование выполняется квазикорреляционным методом. Параметры подкодов подобраны так, чтобы на выходе получались два восьмибитных символа. Приведен расчет параметров помехоустойчивости для рассматриваемой сигнально-кодовой конструкции. Троичный код был разбит на двоичный равновесный и двоичный корректирующий подкоды, для которых приведена расчетная вероятность битовой ошибки с учетом выравнивания данных кодов по энергетике и частотной эффективности. Была получена верхняя аддитивная граница для выбранного троичного кода. Приведено сравнение выбранного троичного кода с другим помехоустойчивым кодом. Для сравнения был взят двоичный код Боуза-Чоудхури-Хоквингема, так как данный код обладает такой же блоковой длиной и помехоустойчивостью в метрике Хэмминга. В результате сравнения скорость кодирования троичного кода оказалась на 30% выше. Разработана схема декодирования равновесного подкода с применением второго алгоритма Чейза. На основании данной схемы разработана имитационная модель декодера с целью определения вероятности блоковой ошибки. Полученные в результате моделирования экспериментальные вероятности асимптотически близки к вероятностям блоковой ошибки, рассчитанным по верхней аддитивной границе, что свидетельствует о достоверности использования расчетных методов для квазикорреляционных способов декодирования. Проведена доработка расчетных данных с учетом результатов моделирования и поправкой на энергетику кода. Полученная вероятность битовой ошибки для всей системы подтверждает достоверность расчетов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Код Рида-Соломона; второй алгоритм Чейза; блоковый код; каскадное кодирование; помехоустойчивое кодирование; сигнально-кодовая конструкция.

Для цитирования: Кузнецов В.С., Волков А.С., Быков А.В. Разработка и моделирование метода декодирования помехоустойчивого блокового кода с применением второго алгоритма Чейза // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 5. С. 46–55. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10165

Введение

В настоящее время все системы связи стремятся к увеличению скорости и дальности передачи данных с сохранением качества передаваемой информации. Для этого используются методы и алгоритмы, повышающие эффективность передачи на физическом уровне. Важную роль в данном направлении играют алгоритмы построения, кодирования и декодирования сигнально-кодовых конструкции, обеспечивающие максимальное использование возможностей канала передачи данных [1].

Однако на пути к достижению данных целей стоят уже давно определенные ограничения. Одним из таких ограничений является теорема Шеннона, устанавливающая прямую взаимосвязь между максимально возможной достоверностью передачи информации и ее максимальной скоростью передачи [2].

Для достижения высоких значений показателей помехоустойчивости постоянно разрабатываются новые сигнально-кодовые конструкции. Для каждого из внедряемых стандартов используются определенные методы кодирования и декодирования, удовлетворяющие поставленным задачам. Также в связи с переходами на следующие поколения систем передачи данных активно разрабатываются новые методы кодирования.

Одними из наиболее редко используемых являются декодеры, основанные на троичном декодировании, так как, несмотря на свои высокие расчетные показатели, они крайне сложны в реализации, требуют более точных декодеров с использованием максимально точных значений сигналов, полученных из канала. Однако для систем, где надежность передачи информации является основополагающей характеристикой, данные системы могут оказаться весьма выгодными [3].

Рассматриваются возможности троичной квадратурной сигнально-кодовой конструкции. Проводится исследование параметров ее теоретических возможностей

и, исходя из этого, рассчитываются параметры помехоустойчивости ее возможной реализации. На основе теоретических данных разрабатывается имитационная модель для декодера равновесного кода с применением квазикорреляционного метода декодирования, основанного на втором алгоритме Чейза, с целью подтверждения расчетных данных для данного метода.

Метод декодирования

Рассмотрим двумерную (квадратурную) троичную модуляцию с символами $\{0, \pm a\}$ по каждой оси (ветви). С этой модуляцией работает троичный каскадный код ветви, причем одинаковые кодеки этого кода установлены в каждой квадратурной ветви (рис. 1).

Пропускная способность непрерывного гауссовского группового канала с двумя квадратурными подканалами на выходе вычисляется по формуле [4]

$$C = F \cdot \log_2 \left(1 + 2 \cdot \frac{P_{cp_c}}{\sigma^2} \right),$$

где P_{cp_c} — средняя мощность сигнала в квадратурном канале.

В этом случае $2P_{cp_c}$ — суммарная мощность в групповом канале с полосой $2F$, где F — выходная полоса непрерывного гауссовского канала.

Параметры выбранного троичного кода –

$$(n_p, n_a, a_{xp}, v_p; a_{xk}, v_k) = (14, 8, 4, 256; 1, 256), \quad (1)$$

где n_p — длина блока троичного кода, n_a — число энергетических символов на длине блока, d_{xp} и d_{xk} — минимальное расстояние в метрике Хэмминга соответственно равновесного и корректирующего подкодов, v_p и v_k — объемы ансамблей кодовых сигналов соответственно равновесного и корректирующего подкодов [5].



Рис. 1. Блок схема приема

Равновесный и корректирующий подходы троичного кода каскадируются с внешним кодом Рида-Соломона (РС) с параметрами $RS(N, K, D_x, GF(2^m)) = RS(256, 226, 31, GF(2^8))$ в поле Галуа с основанием 2^8 [6].

Был выбран код Рида-Соломона, поскольку он позволяет выбрать кодовые слова с достаточно большим количеством энергонесущих символов при достаточно малой длине кодового слова. Выбранный троичный код при блоковой длине 14 имеет восемь энергонесущих символов.

Скорость передачи троичного каскадного кода (ТКК) определяется как

$$R_1 = \frac{(k_p + k_k) \cdot K}{n_p \cdot N \cdot \tau_q} = \frac{(k_p + k_k) \cdot r_c}{n_p \cdot \tau_q} = R_Q,$$

где $r_c = \frac{K}{N}$ — относительная скорость передачи кода

Рида-Соломона, τ_q — длительность радиосимвола, $\tau_q = \tau_l = \tau_Q$. За каждое переданное кодовое слово троичного кодера передается по одному кодовому слову корректирующего и равновесного подходов, при этом скорости передачи корректирующего и равновесного подходов одинаковы.

В работе рассматриваются прямоугольные радиоимпульсы. Выходная полоса фильтра для таких импульсов определяется выражением $F_l = F_Q = \frac{0,5}{\tau_q}$, или $\tau_q = \frac{1}{2 \cdot F_l} = \frac{1}{2 \cdot F_Q}$ [7]. Частотную эффективность будем определять по отношению к выходной полосе частот канала

$$\gamma_1 = \frac{R_1}{F_l} = 2 \cdot \frac{(k_p + k_k) \cdot r_c}{n_p} = \log_2 2^{\gamma_1} = \log_2 2^{\gamma_Q}.$$

Так как квадратурные каналы статистически независимы, то суммарная частотная эффективность системы равна

$$\gamma_{\text{sys.}} = 2 \cdot \gamma_1 = 2 \cdot \gamma_Q = \log_2 2^{2\gamma_1} = \log_2 2^{2\gamma_Q}.$$

Частотную эффективность непрерывного гауссовского группового канала также определим по отношению к выходной полосе частот канала:

$$\gamma_{\text{chan}} = \frac{C}{F} = \log_2 \left(1 + 2 \frac{P_{\text{cp.c}}}{\sigma^2} \right). \quad (2)$$

С учетом применений в квадратурной ветви троичного кода с параметрами (1) $P_{\text{cp.c}} = a^2 \frac{n_a}{n_p}$. Тогда, согласно (2), получим [8]

$$\gamma_{\text{chan}} = \log_2 \left(1 + 2 \frac{a^2 \cdot n_a}{\sigma^2 \cdot n_p} \right).$$

Проанализируем поведение предлагаемой сигнально-кодовой конструкции (двумерная квадратурная КАМ-9 с троичными каскадными кодами в каждой квадратурной оси (ветви) по помехоустойчивости при согласовании с групповым каналом по частотной эффективности γ и энергетике, то есть по отношению $\frac{E_{\text{bit}}}{N_0}$

$$\left(\gamma_{\text{chan}} = \gamma_{\text{sys.}} 8 \left(\frac{E_{\text{bit}}}{N_0} \right)_{\text{chan}} = \left(\frac{E_{\text{bit}}}{N_0} \right)_{\text{sys.}} \right).$$

Данные согласования необходимы для определения максимально наилучших возможных параметров помехоустойчивости данного кода.

Приравняем непрерывный гауссовский групповой канал и предлагаемую систему по частотной эффективности в выходной полосе частот F , то есть

$$\gamma_{\text{chan}} = \log_2 \left(1 + 2 \frac{a^2 \cdot n_a}{\sigma^2 \cdot n_p} \right) = \log_2 2^{2\gamma_1} = \gamma_{\text{sys.}}$$

Числовое значение

$$\gamma_{\text{chan}} = 2 \cdot \gamma_1 = 4 \cdot \frac{(k_p + k_k) \cdot r_c}{n_p} = 4 \cdot \frac{16 \cdot 226}{14 \cdot 256} = 4,0357 \text{ бит/с/Гц.}$$

$$\text{Так как } \frac{a^2}{\sigma^2} = \frac{a^2 \cdot \tau_q}{N_0 \cdot F \cdot \frac{1}{2F}} = \frac{d_{1p}^2}{N_0 / 2} = 4 \cdot \frac{d_{1p}^2}{2N_0},$$

$$\text{то } \left(1 + 8 \frac{d_{1p}^2 \cdot n_a}{2N_0 \cdot n_p} \right) = 2^{\frac{4(k_p + k_k) \cdot r_c}{n_p}}, \quad (3)$$

где $d_{1p}^2 = a^2 \cdot \tau_q$ — квадрат Евклидова расстояния между символами $\{0, a\}$ равновесного подхода. Из соотношения (3) следует

$$\frac{d_{1p}^2}{2N_0} = \frac{2^{\frac{4(k_p + k_k) \cdot r_c}{n_p}} - 1}{8 \cdot n_a / n_p} = \frac{2^{2\gamma_1} - 1}{8 \cdot n_a / n_p} = \frac{2^{\gamma_{\text{chan}}} - 1}{8 \cdot n_a / n_p}. \quad (4)$$

Докажем, что при согласовании с каналом по частотной эффективности, то есть при $\gamma_{\text{chan}} = \gamma_{\text{sys.}}$, выполняется также равенство энергетических параметров данной системы, то есть [9]

$$\left(\frac{E_{\text{bit}}}{N_0} \right)_{\text{chan}} = \left(\frac{E_{\text{bit}}}{N_0} \right)_{\text{sys.}}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_{bit}}{N_0}\right)_{syst} &= \frac{a^2 \cdot \tau \cdot n_a \cdot N}{N_0 \cdot (k_p + k_K) \cdot K} = \frac{d_{1p}^2 \cdot 2 \cdot n_a}{N_0 \cdot 2 \cdot (k_p + k_K) \cdot r_C} = \\ &= \frac{(2^{2\gamma_I} - 1) \cdot 2 \cdot n_a}{8 \cdot n_a / n_p \cdot (k_p + k_K) \cdot r_C} = \frac{(2^{2\gamma_I} - 1)}{4 \cdot (k_p + k_K) \cdot r_C / n_p} = \\ &= \frac{(2^{2\gamma_I} - 1)}{2 \cdot \gamma_I} = \frac{(2^{\gamma_{chan}} - 1)}{\gamma_{chan}} = \left(\frac{E_{bit}}{N_0}\right)_{chan} \end{aligned}$$

Числовое значение $\left(\frac{E_{bit}}{N_0}\right)_{chan} = 5,816$ дБ.

Отношение $\frac{d_{1p}^2}{2N_0} = \frac{a^2 \cdot \tau}{2 \cdot N_0}$ определяет помехоустойчивость равновесного подкода. Вычислим это отношение при условии согласования с групповым каналом по частотной эффективности [10].

$$\frac{d_{1p}^2}{2N_0} = \frac{2^{4 \cdot (8+8) \cdot 226} - 1}{8 \cdot 8 / 14} = 3,3689748.$$

Вероятность блоковой ошибки равновесного и корректирующего подкодов определим по верхней аддитивной границе.

$$Q_{erp} = N_{d_p} \left(1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{d_{1p}^2 \cdot d_{xp}}{2N_0}} \right) \right), N_{d_p} = 46.$$

$$Q_{erk} = N_{d_k} \left(1 - \Phi \left(\sqrt{\frac{d_{1k}^2 \cdot d_{xk}}{2N_0}} \right) \right), N_{d_k} = 8.$$

Троичный код строится так, чтобы расстояния его подкодов метрике Евклида были одинаковы

$$d_{1p}^2 \cdot d_{xp} = d_{1k}^2 \cdot d_{xk},$$

где $d_{1p}^2 = a^2 \tau$, $d_{1k}^2 = (2 \cdot \sqrt{a^2 \tau})^2 = 4a^2 \tau$. Следовательно, $a^2 \tau \cdot d_{xp} = 4a^2 \tau \cdot d_{xk}$, то есть $d_{xp} = 4d_{xk}$.

Но верхняя аддитивная граница для Q_{oH_p} в $\frac{46}{8}$ раз больше верхней аддитивной границы для Q_{erk} . Если $Q_{erp} = q_{s_{RS}}^P$, а $Q_{erk} = q_{s_{RS}}^K$, то $Q_{erp}^P \gg Q_{erk}^K$ [11].

По этой причине общая вероятность битовой ошибки будет равна

$$\begin{aligned} q_{bit} &= q_{bit_{RS}}^P \cdot \frac{k_P}{k_P + k_K} + \\ &+ q_{bit_{RS}}^K \cdot \frac{k_K}{k_P + k_K} \approx q_{bit_{RS}}^P \cdot \frac{k_P}{k_P + k_K}, \end{aligned} \quad (5)$$

так как вкладом в вероятность битовой ошибки корректирующего кода можно пренебречь.

$$\begin{cases} \bar{q}_{bit_{RS}} = \frac{\bar{i} \cdot K}{2 \cdot K} = \sum_{i=T+1}^N \frac{i}{2 \cdot N} \cdot C_N^i \cdot q_s^i \cdot (1 - q_s)^{N-i}, \quad D_x = 2T + 1. \\ q_{s_{RS}}^P = Q_{erp} \leq N_d^P \cdot \left(1 - \left(\sqrt{\frac{d_{1p}^2 \cdot d_{xp}}{2N_0}} \right) \right) = 46 \cdot \left(1 - \left(\sqrt{\frac{d_{1p}^2 \cdot d_{xp}}{2N_0}} \right) \right) = \\ = 46 \cdot 1,208 \cdot 10^{-4} = 5,5568 \cdot 10^{-3}, \quad x = 3,671, \end{cases} \quad (6)$$

где $\bar{q}_{bit_{RS}}$ — средняя вероятность ошибки декодирования на бит для внешнего кода Рида-Соломона (РС) [12].

Верхней границе $Q_{erp} \leq 5,5568 \cdot 10^{-3}$ равновесного кода при $n_a = 8$ соответствует среднее отношение сигнал/

$$\text{шум } \frac{2 \cdot a^2 \cdot \tau \cdot n_a}{N_0 \cdot n_p} = 8,8653 \text{ дБ.}$$

Сравнение кодов по скорости передачи

Проведем сравнение по скорости передачи информации для заданного каскадного кода с подходящим двоичным кодом. Для начала рассчитаем общие параметры каскадного кода путем перемножения параметров его составляющих подкодов:

$$(14, 8, 4, 256; 1, 256) \times RS(256, 226, 31)_{2^8} \times (8, 8, 1) \times RS(256, 226, 31)_{2^8} = \\ = (n, k, d_x) = (3584, 3616, 124), \quad t = 61, \quad r_3 = \frac{113}{112},$$

где r_3 — скорость кодирования троичного кода.

Так как для двоичных кодов скорость кодирования не может превышать единицы, сравнение необходимо вести по другим параметрам; наиболее показательным сравнение при одинаковой блоковой длине и одинаковой помехоустойчивости (определяемой расстоянием Хэмминга). Для сравнения возьмем укороченный двоичный код БЧХ $(2^m - i, k - i, d_x) = (3584, 2851, 124)$ с укорочением $i = 2^{12} - 3584 = 512$ [13].

Такой код является подходящим для сравнения по скорости кодирования, так как остальные его параметры совпадают с выбранным троичным кодом

Для такого кода скорость кодирования будет равна

$$r_2 = \frac{2851}{3584} = 0,79548.$$

Таким образом, при одинаковой блоковой длине и помехоустойчивости (в метрике Хемминга) лучший двоичный БЧХ код проигрывает по скорости кодирования

$$\text{в } \frac{r_3}{r_2} = \frac{113}{112 \cdot 0,79548} = 1,268327 \text{ раза.}$$

Описание схемы декодирования

В выбранной схеме декодирования используется квазикорреляционное декодирование троичного кода, реализованное с помощью второго алгоритма Чейза. Суть данного алгоритма заключается в оценке правдоподобия принятой последовательности с некоторым набором сгенерированных кодовых слов. Таким образом, если кодовое слово, полученное жестким решением, не совпадает с принятым словом, то одно из ближайших к нему в метрике Эвклида кодовых слов с высокой вероятностью будет совпадать. Три основных алгоритма, предложенных Чейзом описывают методы генерации этих ближайших последовательностей.

Для формирования набора наиболее вероятно принятых кодовых слов используется тот факт, что ошибки вероятнее всего находятся на наименее надежных принятых позициях. Разница алгоритмов Чейза заключается в количестве выбираемых позиций, от которых зависит количество генерируемых кодовых последовательностей. Первый алгоритм дает большую избыточность, поскольку выборка идет по половине всех принятых символов, часть из которых будет с большой вероятностью достоверно принятыми. Третий алгоритм не дает необходимого уровня достоверности, требующегося для реализуемой модели, поэтому был выбран второй алгоритм Чейза, дающий достаточный уровень исправления ошибок. Второй алгоритм Чейза подразумевает под собой выборку определенного числа позиций, на которых будут выполняться определение наименее достоверных принятых символов и дальнейшая генерация последовательности наборов всевозможных значений ошибок на данных позициях.

Схема проведения данного алгоритма проходит в три основных шага. На первом шаге производится жесткое декодирование принятых символов и определение трех наименее надежных позиций. Данные позиции определяются наибольшей приближенностью к граничному значению. На втором этапе вводятся все различные варианты ошибок на наименее надежных позициях принятой последовательности, далее после декодирования жестким методом этих последовательностей получается набор из восьми наиболее вероятных переданных кодовых слов, подающихся в качестве опорных на квазикорреляционный декодер. В качестве жесткого декодера используется пакетный декодер, исправляющий одну независимую ошибку, или пакет из двух ошибок. Был выбран именно этот простейший алгебраический декодер, поскольку в алгоритме Чейза при

декодировании одного переданного кодового слова через жесткий декодер пропускают восемь вариантов принятого слова, следовательно, необходим декодер с достаточно низким значением задержки для обеспечения высокой скорости декодирования. У более сложных декодеров, несмотря на их лучшие параметры исправления ошибок, задержка слишком велика для их многократного использования на одном такте декодирования, и пакетный декодер обеспечивает достаточный уровень помехоустойчивости, не сильно увеличивая время декодирования.

На третьем шаге декодирования производится сравнение сгенерированных кодовых слов с полученной (не дискретизированной) последовательностью и выбор наиболее близкого кодового слова, которое поступает на выход декодера. Сравнение можно проводить в различных метриках, но для данной схемы декодирования была выбрана евклидова метрика и в качестве декодированного выбирается кодовое слово с наименьшим евклидовым расстоянием до полученного слова.

Моделирование декодера

Рассмотрим реализованную имитационную модель декодера троичного кода (см. рис. 1). Имеем параметры троичного кода (1). На вход декодера поступают кодовые слова длины 14, состоящие из полученных символов с максимально точными значениями.

Рассмотрим пошагово процесс декодирования, осуществляемый в рамках данной имитационной модели.

На первом шаге производится запоминание знаков и модулей значений полученных символов, в нашем примере выбран формат с 14 знаками после запятой. Значение модулей символов подаются на коррелятор и АЦП, а значения знаков на блок вычисления значений корректирующего кода.

На втором шаге происходит оцифровка модулей символов в значения $\{0,1\}$ для дальнейшего декодирования. Оцифровка происходит по уровню 0,5, где значения больше или равные данной границе определяются как 1, а меньше — как 0.

На третьем шаге начинается квазикорреляционное декодирование вторым алгоритмом Чейза. В начале в полученном сигнале выделяются три наименее надежные позиции, определяемые нахождением расстояния до порогового значения

$$d_i^2 = (x_i - U_{th})^2,$$

где d_i^2 — квадрат расстояния до граничного значения, x_i — модуль значения полученного сигнала, а U_{th} — пороговое значение [14].

Символы с наименьшим значением d_i^2 считаются наименее надежными.

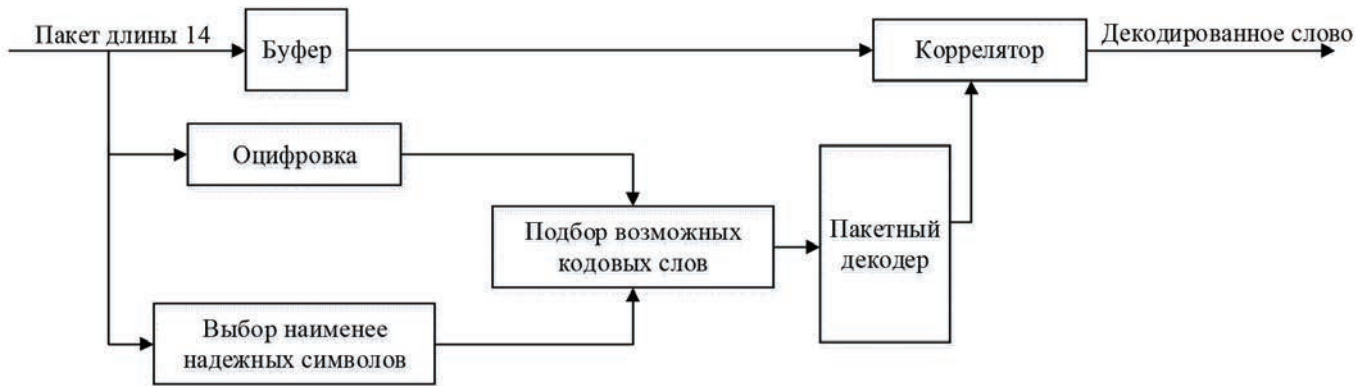


Рис. 2. Схема квазикорреляционного декодера двоичного равновесного подкода

Четвертым шагом происходит нахождение 8 кодовых слов, максимально приближенных к полученному, путем подстановки в оцифрованное полученное слово на наиболее ненадежные позиции всех возможных значений $\{0,1\}$.

На пятом шаге происходит алгебраическое декодирование всех восьми слов. Для этого используется пакетный декодер, исправляющий одну независимую ошибку или пакет из двух ошибок.

На шестом шаге декодированные с помощью жестких решений слова поступают на проверку веса. Эта проверка позволяет отбросить заранее неверно декодированные слова с весами отличными от 8 и 10, то есть не подпадающие в набор из 256 кодовых слов, выбранный для данного алгоритма.

Седьмым шагом принятый сигнал поступает на коррелятор, который производит сравнение восьми декодированных слов с этим сигналом. Сравнение идет по расстоянию, вычисляемому в евклидовой метрике. На выход коррелятора выдается кодовое слово равновесного подкода с наименьшим Евклидовым расстоянием до принятого сигнала.

Восьмым шагом каждому из 256 слов равновесного подкода длины 14 ставится в однозначное соответствие кодовое слово длины 8, состоящее из символов $\{0,1\}$.

На девятом шаге производится получение кодового слова корректирующего подкода тактированием кодового слова длины 14 знаками, находящимися на ненулевых позициях, в результате чего на выход выдается кодовое слово длины 8.

В результате на выходе троичного декодера имеем два кодовых слова длины 8, состоящих из символов $\{0,1\}$, которые подаются на внешний декодер q -ичного кода Рида-Соломона (РС).

Для реализации описанной выше схемы декодирования была реализована каскадная модель декодера помехоустойчивого блочного кода.

Основой модели являются блоки функции, в которых реализована большая часть вычислений. Особенностью

данных блоков является точность вычислений и отсутствие задержки, что не влияет на результаты рассматриваемого в нашем случае моделирования и позволяет вычислить наиболее точные выходные значения без погрешностей на неточности аппаратуры. На вход канала подаются закодированные слова длины 14, относящиеся к выбранному коду Рида-Соломона. В качестве канала передачи данных используется канал белого гауссовского шума (AWGN channel), с помощью внутренних настроек приведенный в соответствие с частотными и энергетическими параметрами выбранной сигнально-кодовой конструкцией. Также добавлен блок, выравнивающий средний уровень энергетики на выходе из канала с уровнем энергетики кодовых слов кода Рида-Соломона. Это связано с особенностью реализации канала белого гауссовского шума, где уменьшается значение сигнала с уменьшением отношения сигнал/шум, а увеличивается величина шума в канале.

В результате моделирования были получены значения вероятности блочной ошибки для равновесного подкода. Графики зависимости этой вероятности от отношения сигнал/шум представлены на рис. 3. Нижний график показывает значения, полученные в результате моделирования, а верхний — рассчитанную теоретически верхнюю аддитивную границу данного кода. Так как полученный график не превосходит верхнюю аддитивную границу, то расчеты, проведенные для квазикорреляционного декодирования троичного каскадного кода, являются верными.

Оценка результатов

Проведем дополнительный расчет полученных в предыдущем разделе результатов моделирования.

Средней вероятности блочной ошибки $\bar{Q}_{ер} = 5,5568 \cdot 10^{-3}$ при экспериментальном статистическом моделировании равновесного кода в непрерывном гауссовском канале по второму алгоритму Чейза при 8 опорных кодовых словах ($n_a^K = 8$) соответствовало среднее отношение сигнал/шум

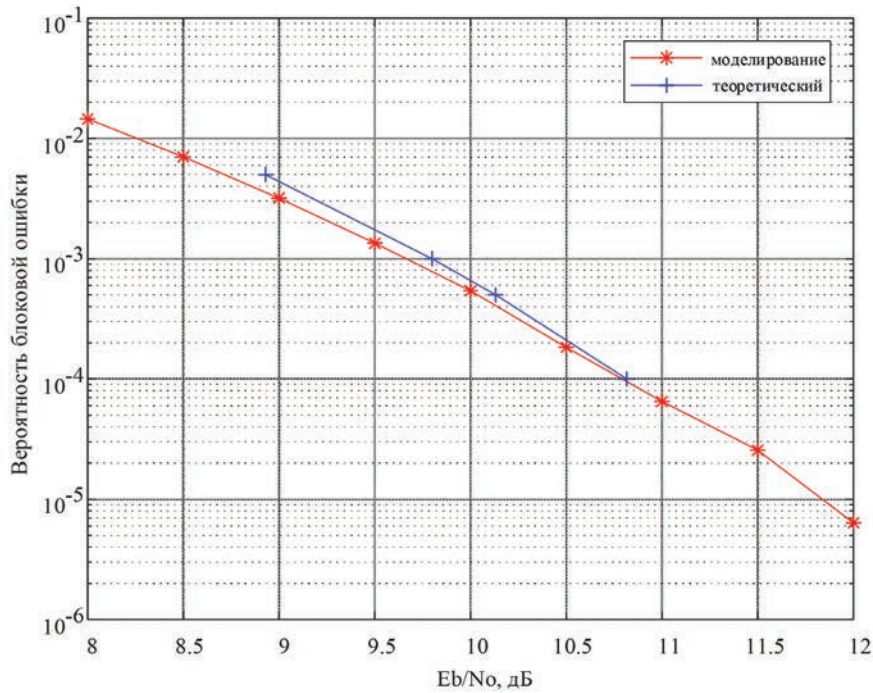


Рис. 3. График вероятности блоковой ошибки для равновесного подкода

$$\frac{2 \cdot a^2 \cdot \tau \cdot n_a}{N_0 \cdot n_p} = 8,6902 \text{ дБ, то есть меньше верхней аддитивной}$$

границы на 0,175дБ (см. рис. 4) [15].

В виду того, что в весовом спектре укороченного циклического кода Хэмминга (15,10,4), то есть при $i = 1$ в коде (14,9,4), содержится только 203 кодовых слова веса $n_a = 8$, то до полного объема придется добавлять еще 53 равновесных кодовых слова веса 10.

Тогда среднее число энергонесущих символов в комбинации равновесного кода с учетом кодов слов веса 10 равно $\bar{n}_a = \frac{203}{256} \cdot 8 + \frac{53}{256} \cdot 10 = 8,414$, что увеличивает требуемое среднее отношение сигнал/шум на $\frac{8,414}{8} = 0,219$ дБ.

Подстановка в выражение (4) для расчета параметра помехоустойчивости $\frac{d_{1p}^2}{2 \cdot N_0}$ значения $\bar{n}_a = 8,414$ вместо $n_a = 8$ дает меньшее значение этого выражения

$$\frac{d_{1p}^2}{2N_0} = \frac{2^{\frac{(8+8) \cdot 226}{14 \cdot 256} - 1}}{8 \cdot 8,414 / 14} = 3,2032.$$

Тогда вероятность ошибки q -ичного символа внешнего кода Рида-Соломона равновесного каскадного кода определяется неравенством (6)

$$q_{bit_{RS}}^P = Q_{er_p} \leq 46 \cdot (1 - \Phi(\sqrt{3,2032 \cdot 4})) = 46 \cdot (1 - \Phi(3,58)) = 46 \cdot 1,718 \cdot 10^{-4} = 7,903 \cdot 10^{-3}.$$

Теперь рассчитаем величину вероятности $\bar{q}_{bit_{RS}}^P$ по выражению (6), используя первые 3 слагаемых этой суммы, так как вклад в сумму дальнейших слагаемых незначителен и ими можно пренебречь.

$$\bar{q}_{bit_{RS}}^P = 1,086228 \cdot 10^{-11} + 1,297926 \cdot 10^{-12} + 1,453574 \cdot 10^{-13} = 1,231 \cdot 10^{-11}.$$

Вероятность ошибки q -ичного символа внешнего кода Рида-Соломона в корректирующем каскадном коде определяется неравенством (6)

$$q_{S_{RS}}^K = Q_{er_K} \leq 8 \cdot (1 - \Phi(3,58)) = 1,374 \cdot 10^{-3}.$$

Величину вероятности $\bar{q}_{bit_{RS}}^K$ рассчитаем по выражению (6), по аналогичному рассуждению, используя только первое слагаемое этой суммы.

$$\bar{q}_{bit_{RS}}^K \approx \frac{16}{2 \cdot 256} \cdot C_{256}^{16} \cdot (q_{S_{RS}}^K)^{16} \cdot (1 - q_{S_{RS}}^K)^{240} = 3,672 \cdot 10^{-23}.$$

В итоге, согласно выражению (5), имеем общую вероятность битовой ошибки каскадного кода

$$q_{bit\Sigma} = 1,231 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1}{2} + 3,672 \cdot 10^{-23} \cdot \frac{1}{2} = 6,155 \cdot 10^{-12}.$$

Таким образом, при работе строго с энергочастотными параметрами непрерывного гауссовского канала выбранная сигнально-кодовая конструкция обеспечивает надежную передачу информации, то есть надежную работу на границе К. Э. Шеннона. [8].

Выводы

Выбрана троичная квадратурная система передачи и приема данных. Проведен расчет параметров помехоустойчивости для применяемых в ней троичных кодов при условии согласования по энергетике и частотной эффективности с непрерывным гауссовским каналом. Рассчитаны вероятности битовой ошибки для системы. Проведено сравнение выбранной конструкции кода с двоичным кодом БЧХ по относительной скорости кодирования при заданной блоковой длине и помехоустойчивости, показано увеличение скорости кодирования на 30% по сравнению с кодом БЧХ. Составлена схема декодирования с применением второго алгоритма Чейза для равновесного подкода. В результате исследования разработана имитационная модель декодера троичного кода. Полученные с помощью данной модели данные использованы для расчета блоковой вероятности ошибки для троичной сигнально-кодовой конструкции. В расчеты была внесена поправка с учетом на результаты моделирования и была получена вероятность ошибки $q_{bit\Sigma} = 6,155 \cdot 10^{-12}$, что подтверждает возможность использования данной конструкции при значениях сигнал/шум близких к границе Шеннона.

Работа была выполнена при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Грант № 14.257.21.0215 RFMEFI57816X0215).

Литература

1. *Высоцкая В. В.* Квадрат кода Риды–Маллера и классы эквивалентности секретных ключей криптосистемы Мак–Элиса–Сидельникова // ПДМ. Приложение. 2017. № 10. С. 66–68.
2. *Синева И. С.* Улучшение качества передачи кодами, опирающимися на топологию источника сообщений // Технологии информационного общества: Тезисы докладов московской отраслевой научно-технической конференции (Москва, 23–25 апреля 2007 г.). М.: Инсвязьиздат, 2007. С. 169–170.
3. *Фенчук М. М., Боталов А. Э., Синева И. С.* Сравнительная помехоустойчивость кодов Грея и алгоритмов генетического типа // Материалы Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC— 2018) (Москва, 1–5 декабря 2014 г.). Москва, 2014. Ч. 5. С. 44–47.
4. *Кузнецов В. С.* Способ достижения максимальной помехоустойчивости оптимальным каскадным кодированием // Естественные и технические науки. 2013. № 4 (66). С. 205–215.
5. *Кузнецов В. С., Кузнецов В. В.* Нерешенные проблемы в области передачи информации и связи. М.: Горячая линия — Телеком. 2016. 59 с.
6. *Кузнецов В. С.* Оптимизация параметров кодов и возможности асимптотического достижения границы Шеннона // Естественные и технические науки. 2015. № 5 (83). С. 109–115.
7. *Боталов А. Э., Синева И. С.* Сравнительный анализ помехоустойчивых свойств генетических алгоритмов безызбыточного кодирования для кластеризующихся пространств источника // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. № 1. С. 68–74.
8. *Барамыков А. И., Зайцева И. Н.* Анализ основных параметров кодирования спутниковых телевизионных каналов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 10. С. 74–79.
9. *Eroz M., Sun F.-W., Lee L.-N.* DVB-S2 Low Density Parity Check Codes with near Shannon Limit Performance // International Journal on Satellite Communication Networks. 2004. Vol. 22. Pp. 269–279.
10. *Proakis J. G.* Digital Communications. 4th ed. N.Y.: McGraw-Hill, 2000. 928 p.
11. *Морелос-Сарагоса Р.* Искусство помехоустойчивого кодирования. методы, алгоритмы, применение: пер. с англ. М.: Техносфера, 2005. 320 с.
12. *Тимофеев Г. С.* Выбор алгоритма помехоустойчивого кодирования для систем беспроводной цифровой связи // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 11–15 апреля 2016 г.). Красноярск, 2016. Т. 1. № 12. С. 655–657.
13. *Сидоркина Ю. А., Шахтарин Б. И., Балахонов К. А.* Анализ эффективности современных помехоустойчивых кодов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2014. № 6 (99). С. 108–116.
14. *Deundyak V. M., Kosolapov Yu. V.* On the Berger-Loidreau cryptosystem on the tensor product of codes // J. Comp. Eng. Math. 2018. Pp. 16–33.
15. *Дружинин В. И., Кузьмин О. В.* Коды Риды–Соломона в системах обнаружения и исправления ошибок при передаче данных // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 1 (45). С. 116–124.

DEVELOPMENT AND MODELING OF DECODING METHOD OF ERROR CORRECTION BLOCK CODE USING THE SECOND CHASE ALGORITHM

VITALIY S. KUZNETSOV,

Moscow, Zelenograd, Russia, vitaliy_kuznetsov@hotmail.com

ALEXEY S. VOLKOV,

Moscow, Zelenograd, Russia, leshvol@mail.ru

ALEXANDR V. BYKOV,

Moscow, Zelenograd, Russia, myalex96@mail.ru

KEYWORDS: Reed-Solomon codes, Chase algorithm, block code, cascade FEC, forward error correction, modulation-coding scheme.

ABSTRACT

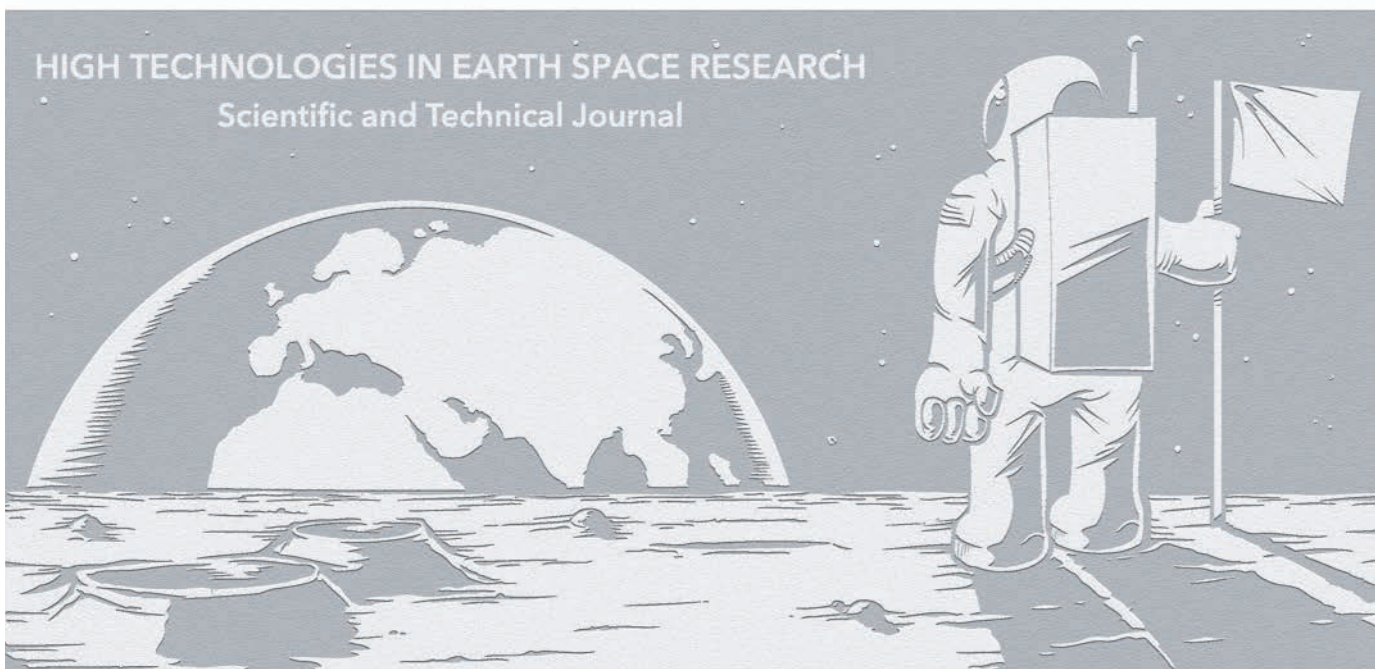
The paper describes the principle of operation of the joint modulation and coding structure with the use of ternary error-correction codes on each of the quadrature axes. A system with cascade decoding is chosen, which uses an external ternary code and an internal binary decoder. Reed-Solomon code is selected as the internal one, so both outputs of the ternary decoders are combined in a single input vector. The ternary decoding is constructed in a cascade method, the code parameters are chosen so that 2 8-bit symbols are obtained at the output. The calculation of the parameters for the signal-code construction is given. The ternary code was divided into an equilibrium and corrective code, for which the calculated bit error probability is given, taking into account the equating of these energy codes and frequency efficiency. The upper additive bound for the selected ternary code was obtained. A comparison of the selected ternary code with another noise-proof code is given. For comparison, the Bose-Chaudhuri-Hocquenghem code was taken, since this code has the same block length and noise immunity in the Hamming metric. As a result of comparison, the coding rate of the ternary code is 30% higher. A decoding scheme was developed for the equilibrium code using the second Chase algorithm. Based on this scheme, a simulation model of the decoder has been developed, in order to determine the probability of a block error. The probabilities obtained as a result of the simulation is consistent with upper additive boundary, which proof the reliability of the use of computational methods for quasi-correlation decoding methods. The finalization of the calculated data taking into account the results of modeling and the correction for the power of the code is carried out. The bit error rate for the entire system is obtained, which indicates the possibility of reliable information transmission.

REFERENCES

1. Vysockaya V.V. The Reed-Muller code square and equivalence classes of McEliece-Sidelnikov cryptosystem private keys. *Prikladnaya Diskretnaya Matematika. Supplement*. 2017. No. 10. Pp. 66-68. (In Russian)
2. Sineva I.S. Uluchshenie kachestva peredachi kodami, opirayushchimisya na topologiyu istochnika soobshcheniy [Improving the quality of the transmission codes, based on the topology of the message source]. *Tekhnologii informatsionnogo obshchestva: Tezisy dokladov moskovskoy otraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (23-25 aprelya 2007 g.)*. [Information Society Technologies: Proceedings of the Moscow branch scientific and technical conference]. Moscow: Insvyazizdat, 2007. Pp. 169-170. (In Russian)
3. Fenchuk M.M., Batalov A.E., Sineva I.S. *Sravnitel'naya pomekhoustoychivost' kodov Greya i algoritmov geneticheskogo tipa* [Comparative noise immunity analysis of Gray codes and genetic algorithms]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya" (INTERMATIC – 2018) (Moskva, 1-5 dekabrya 2014 g.)*. International scientific and technical conference "Fundamental problems of radioelectronics" (INTERMATIC – 2018). Moscow: Energoatomizdat. 2014. Pt. 5. Pp. 44-47. (In Russian)
4. Kuznetsov V.S. Sposob Dostizheniya Maksimalnoj Pomexoustoychivosti Optimalnym Kaskadnym Kodirovaniem [Method for achieving maximum noise immunity by optimal cascade coding]. *Natural and technical sciences*. 2013. No. 4(66). Pp. 205-215. (In Russian)
5. Kuznetsov V.S., Kuznetsov V.V. *Nereshyonnye Problemy v Oblasti Peredachi Informacii I Svyazi* [Unresolved problems in the field of information and communication]. Moscow: Goryachaya Liniya, 2016. 59 p. (In Russian)

6. Kuznetsov V.S. Optimizaciya Parametrov Kodov I Vozmozhnosti Asimptoticheskogo Dostizheniya Granicy Shennona [Optimization of the parameters of the codes and the possibility of achieving asymptotic boundary of the Shanno]. *Natural and technical sciences*. 2015. No. 5(66). Pp. 109-115. (In Russian)
 7. Batalov A.E., Sineva I.S. Comparative analysis of error-correcting properties of genetic noise immunity coding algorithms for clustered source spaces. *T-Comm*. 2015. No. 1. Pp. 68-74. (In Russian)
 8. Baramykov A.I., Zaitseva I.N. Analysis of the basic encoding parameters of satellite TV channels. *T-Comm*. 2017. Vol. 11. No. 10. Pp. 74-79. (In Russian)
 9. Eroz M., Sun F.-W., Lee L.-N. DVB-S2 Low Density Parity Check Codes with near Shannon Limit Performance. *International Journal on Satellite Communication Networks*. 2004. Vol. 22. Pp. 269-279.
 10. Proakis J.G. *Digital Communications*. 4th ed. N.Y.: McGraw-Hill, 2000. 928 p.
 11. Morelos-Zaragoza R.H. *The art of error correcting coding*. John Wiley & Sons, 2002. 232 p.
 12. Timofeyev G.S. Selection of error correction algorithm for digital wireless communication systems. *Materialy XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki"* [Proceedings of XII International scientific-practical conference "Actual problems of aviation and cosmonautics" (Krasnoyarsk ,11-15 April 2016)]. Krasnoyarsk: Sibirskiy gosudarstvennyy universitet nauki i tekhnologii imeni akademika M.F. Reshetneva Publ., 2016. Vol. 1. No. 12. Pp. 655-657. (In Russian)
 13. Sidorkina Yu. A., Shakhtarin B.I., Balakhonov K.A. Effectiveness analysis of modern error-control codes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2014. Vol. 6. No. 99. Pp. 108-116. (In Russian)
 14. Deundyak V. M., Kosolapov Yu.V. On the Berger-Loidreau cryptosystem on the tensor product of codes. *J. Comp. Eng. Math*. 2018. Pp. 16-33.
 15. Druzhinin V.I. Kuzmin O.V. Kody Reed – Solomon codes in systems errors detecting and correcting during data transfer. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2015. Vol. 1. No. 45. Pp. 116-124. (In Russian)
- INFORMATION ABOUT AUTHORS:**
 Kuznetsov V.S., Professor of the Department of Telecommunications, National Research University of Electronic Technology;
 Volkov A.S., Assistant Professor of the Department of Telecommunications, National Research University of Electronic Technology;
 Bykov A.V., Student of the Department of Telecommunications, National Research University of Electronic Technology.

For citation: Kuznetsov V.S., Volkov A.S., Bykov A.V. Development and modeling of decoding method of error correction block code using the second Chase algorithm. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 5. Pp. 46-55. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10165 (In Russian)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10166

Вероятностно-временные характеристики функционирования защищенной агрегативной автоматизированной системы управления сложной организационно-технической системой в условиях интенсивных кибератак

БУРЕНИН

Андрей Николаевич¹

ЛЕГКОВ

Константин Евгеньевич²

ПЕРВОВ

Михаил Сергеевич³

АННОТАЦИЯ

В современных условиях при функционировании корпоративных и ведомственных сложных организационно-технических систем наблюдаются регулярные попытки различных нарушителей негативно повлиять на нормальное их функционирование с помощью разного рода кибератак (системных, сетевых и компьютерных атак). В связи с чем, резко возрастает вероятность существенного изменения характера функционирования таких систем, под воздействием высокоинтенсивных кибератак на автоматизированные системы управления ими в целом или на наиболее критически важные подсистемы автоматизированной системы управления. Нарушение функционирования может привести к срыву управления корпоративной или ведомственной сложной организационно-технической системой, поэтому существует необходимость применение комплекса мер и программно-аппаратных комплексов, обеспечивающих безопасность их функционирования. Требуемый уровень противодействий кибератакам на автоматизированные системы управления сложных организационно-технических систем может быть обеспечен созданием эффективной системы комплексной безопасности совместно с созданием специальных комплексов управления безопасностью, образующих в совокупности систему защиты функционирования автоматизированных систем управления от кибератак. При создании такой комплексной системы защиты от кибератак необходимо оперировать определенными вероятностно-временными параметрами и характеристиками для того, чтобы быть уверенным в достаточности (или недостаточности) выделяемых средств для обеспечения устойчивого функционирования системы управления и устойчивого процесса управления самой организационно-технической системой. Рассматриваются задачи получения основных вероятностно-временных характеристик создаваемой системы защиты от кибератак. Требуемые вероятностно-временные характеристики в обстановке воздействующих на нее широкого класса кибератак и при условии реализованной системы защиты от них, зависят, при прочих равных условиях, от вариантов построения этой системы защиты, от того как подключены ее компоненты к каждому агрегату автоматизации управления.

Сведения об авторах:

¹д.т.н., доцент, главный специалист Акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Рубин», г. Санкт-Петербург, Россия, konferencia_asu_vka@mail.ru

²к.т.н., доцент, начальник кафедры автоматизированных систем управления Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, constl@mail.ru

³Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кибератака; . вероятностно-временны характеристики; автоматизированная система управления; система защиты; программные воздействия.

Для цитирования: Буренин А.Н., Легков К.Е., Первов М.С. Вероятностно-временные характеристики функционирования защищенной агрегативной автоматизированной системы управления сложной организационно-технической системой в условиях интенсивных кибератак // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 5. С. 56–63. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10166

Введение

В современных условиях резко возрастает вероятность существенного изменения характера функционирования корпоративных и ведомственных сложных организационно-технических систем (СОТС) специального назначения [1, 2], под воздействием высокоинтенсивных кибератак на автоматизированные системы управления ими в целом или на наиболее критически важные подсистемы автоматизированной системы управления (АСУ), нарушение работы которых разного рода кибератаками может привести к срыву управления СОТС.

Требуемое противодействие разного рода кибератакам на АСУ СОТС не может быть обеспечено только созданием эффективной системы комплексной безопасности, поэтому, обычно, также создаются специальные подсистемы управления безопасностью, которые в совокупности образуют систему защиты АСУ от кибератак [1, 3].

При создании такой неуправляемой или управляемой комплексной системы защиты АСУ СОТС от кибератак необходимо оперировать определенными вероятностно-временными параметрами и характеристиками для того, чтобы быть уверенным в достаточности (или недостаточности) выделяемых средств для обеспечения устойчивого функционирования АСУ и устойчивого процесса управления СОТС.

Место и роль системы защиты АСУ СОТС от кибератак нарушителей

Система защиты АСУ СОТС от кибератак, как правило, носит распределенный по компонентам АСУ характер. Поэтому и система обеспечения комплексной безопасности будет содержать несколько серверов безопасности и управления безопасностью и будет также распределенной.

Из множества способов декомпозиции архитектур АСУ СОТС можно выделить особый класс подсистем (агрегатов автоматизации управления), функционирование которых критически важно для АСУ и каждый из которых имеет специальные устройства защиты от кибератак, являющихся компонентами системы защиты. В защищаемой АСУ СОТС в каждом агрегате автоматизации управления (ААУ) целесообразно выделить вызванные кибератаками временные отказы (сбои, зависания, приостановки работы) и длительные отказы или аварии. При этом, к временным киберотказам или киберсбоям в работе, будем относить отказы, при которых нормальное функционирование агрегата прекращается, но это не сопровождается большими его повреждениями и существенными затратами на его восстановление.

Длительные отказы или кибераварии характеризуются не только значительной величиной времени неработоспособности, но и значительными функциональными повреж-

дениями самого агрегата управления, а также связанного с ним другого оборудования АСУ и влекут за собой как большой ущерб работоспособности, так и большие (в основном временные) затраты на восстановление. Длительный отказ, как правило, возникает не мгновенно. Сначала в результате воздействий кибератак на отдельные элементы самого агрегата или изменения внешних условий его работы создается некоторая предаварийная ситуация, которая имеет объективные симптомы и может быть своевременно обнаружена. Эту задачу и выполняет тот компонент системы защиты, который выполняет функции обеспечения комплексной безопасности. При отсутствии в нем требуемых элементов каждая предаварийная ситуация переходит в длительный отказ или кибераварию ААУ. Таким образом, система защиты АСУ СОТС переводит потенциальные длительные отказы (кибераварии) во временные отказы или киберсбои, при которых ААУ восстанавливаются за конечное время.

Вероятностно-временные характеристики

Очевидно, что кратковременные отказы (киберсбои) и длительные отказы (кибераварии), вызванные кибератаками нарушителей, можно рассматривать как независимые случайные события. При этом безотказное функционирование каждого i -го ААУ АСУ СОТС наиболее полно можно описать двумя функциями времени: $P_{isb}(t)$ и $P_{iav}(t)$ — вероятностями соответственно бессбойной и безаварийной работы в течение времени t , которые можно задать следующим образом [4–6]:

$$P_{isb}(t) = 1 - F_{isb}(t) \quad (1)$$

$$P_{iav}(t) = 1 - F_{iav}(t),$$

где $F_{isb}(t)$ и $F_{iav}(t)$ — соответственно функции распределения времени возникновения сбойной ситуации или аварийной ситуации в i -м ААУ АСУ СОТС, вызванной кибератаками.

Система защиты от кибератак оказывает двойное влияние на кибербезотказность функционирования каждого i -го ААУ АСУ СОТС [1, 2, 6]. С одной стороны, снижается вероятность возникновения кибераварий при неизменной вероятности возникновения аварийной ситуации $P_{iav}(t)$, т.к. аварийная ситуация может перейти в кибераварию только в том случае, если система защиты сама будет находиться в неработоспособном состоянии (состояние «несрабатывание» по неработоспособности) или если она не содержит требуемые компоненты защиты (состояние «несрабатывание» по недостаточной функциональности). В противном случае аварийная ситуация переходит в состояния киберсбоя и восстановления.

С другой стороны, увеличивается вероятность возникновения сбойных ситуаций: во-первых, кибераварии

(по крайней мере, часть из них) переводятся в сбойные ситуации и, во-вторых, при возникновении отказов типа «ложное срабатывание» возможны необоснованные отключения ААУ. Поэтому показателями кибербезотказности системы защиты АСУ СОТС от кибератак являются функции распределения времени возникновения киберотказов системы типа «несрабатывание» и «ложное срабатывание» или соответственно $F_{nsr}(t)$ и $F_{lsr}(t)$.

Показатели киберустойчивости АСУ СОТС с системой защиты, очевидно, должны быть аналогичны показателям для каждого i -го ААУ АСУ СОТС. Поэтому по аналогии с ААУ для всей АСУ СОТС с системой защиты от кибератак при соответствующей трактовке состояний АСУ можно записать:

$$P_{ASCsb}(t) = 1 - F_{ASCsb}(t) \quad (2)$$

$$P_{ASCav}(t) = 1 - F_{ASCav}(t),$$

где $F_{ASCsb}(t)$ и $F_{ASCav}(t)$ — соответственно функции распределения времени возникновения сбойной ситуации или аварийной ситуации в АСУ СОТС из-за воздействия кибератак с системой защиты АСУ от них.

Часто для АСУ СОТС специального назначения с защитой от кибератак трудно получить полное выражение для функций $F_{ASCsb}(t)$ и $F_{ASCav}(t)$. Тогда в качестве показателей киберустойчивости АСУ СОТС с системой защиты от кибератак можно использовать некоторые числовые характеристики этих распределений или связанные с ними параметры (интенсивность потока аварийных λ_{ASCav} или сбойных λ_{ASCsb} ситуаций, среднее время бессбойной $t_{ASCбоср}$ или безаварийной $T_{ASCбоср}$ работы АСУ, несмотря на кибератаки на нее и т. п.). Такие показатели киберустойчивости удобны в тех случаях, когда рассматриваемая АСУ является функционально восстанавливаемой и отрезок времени τ_{ASCcp} , в расчете на который ведется оценка ее киберустойчивости, значительно превышает среднее время ее безотказной работы T_{ASCcp} , т. е. $\tau_{ASCsb} \gg T_{ASCcp}$.

Для АСУ СОТС с системой защиты от кибератак по-настоящему аварийная ситуация, вызванная информационными атаками нарушителей, явление достаточно редкое, и, как правило [1–18], средняя наработка на одну кибераварию даже в условиях интенсивных кибератак может достигать во время функционирования СОТС сотен или тысяч часов. Расчетный же отрезок времени зависит от условий, в которых функционирует СОТС. В нормальных условиях этот отрезок составляет от нескольких месяцев до года, а в чрезвычайных, в зависимости от выполняемых СОТС задач — от десятков часов до нескольких суток.

Поэтому, в чрезвычайных условиях функционирования СОТС выполняется неравенство $\tau_{ASCsb} \gg T_{ASCcp}$ и можно воспользоваться параметрами λ_{ASCav} , λ_{ASCsb} , $t_{ASCбоср}$

и $T_{ASCбоср}$. В нормальных условиях функционирования необходимо оценить киберустойчивость АСУ СОТС с системой защиты на переходном участке, т. е. определить вероятность безаварийной работы АСУ до первой кибераварии. Поэтому в общем случае, основными показателями бессбойного и безаварийного функционирования АСУ с системой защиты от кибератак следует считать функции распределения времени безаварийной и бессбойной работы за время t , а также среднее время восстановления компонентов системы защиты, которое при наличии отказов типа «несрабатывание» соответствует среднему времени профилактики. С учетом критической важности каждого i -го ААУ для функционирования всей АСУ СОТС допустимо рассматривать вероятностно-временные характеристики функционирования отдельного агрегата автоматизированного управления.

Варианты построения систем защиты АСУ СОТС от кибератак

При организации системы защиты АСУ СОТС от кибератак нарушителей возможны три способа включения элементов компонентов системы защиты в компоненты защищаемого ААУ АСУ:

- последовательное включение, т. е. когда все элементы i -го агрегатного компонента системы защиты включены последовательно с компонентами защищаемого ААУ;
- параллельное включение, т. е. когда все элементы i -го агрегатного компонента системы защиты включены параллельно компонентам защищаемого ААУ и не влияют на их функционирование;
- смешанное включение, представляющее собой комбинацию из двух первых способов включения элементов i -го агрегатного компонента системы защиты.

При последовательном включении компонентов подсистемы защиты вероятность безотказной работы защищенного i -го ААУ АСУ СОТС составит

$$P_{ibos}(t) = P_{ibo}(t) P_{boisz}(t), \quad (3)$$

где $P_{ibo}(t)$ и $P_{boisz}(t)$ — вероятности безотказной работы за время t соответственно i -го защищаемого ААУ АСУ СОТС и i -го компонента системы защиты.

Ясно, что такое включение компонентов системы защиты АСУ СОТС от кибератак имеет ряд недостатков. Во-первых, отказ i -го компонента системы защиты (например, типа «обрыв цепи») ведет к отказу всего защищенного i -го ААУ АСУ СОТС. Таким образом, АСУ СОТС теряет работоспособность i -го ААУ за счет отказов как самого незащищенного ААУ, так i -го компонента системы защиты от кибератак, что приводит к ряду ложных остановок i -го ААУ по вине системы защиты, что является недостатком последовательно включенных устройств защиты.

Вместе с тем вероятность безаварийной работы при последовательном включении i -го компонента системы защиты в цепь функционирования незащищенного i -го ААУ АСУ СОРТС повышается, так как ситуация, при которой компонент защиты отказал, а ААУ продолжает работать незащищенным, просто невозможна. Примером подобной защиты являются локальные анализаторы трафика. Они включены последовательно как с точки зрения телекоммуникационных цепей, так и с точки зрения кибербезопасности. Выход из строя такого компонента системы защиты (обрыв цепи передачи информации) приведет к отключению защищаемого ААУ. Ситуация же, при которой компонент защиты отказал, а защищаемый ААУ продолжает функционировать, исключена.

При параллельном включении i -го ААУ АСУ СОРТС и соответствующего компонента системы защиты его отказ не сопровождается аварией данного ААУ и АСУ в целом. Защита может отказать, а агрегат будет продолжать работать. В этом случае возникновение аварийной ситуации в i -м ААУ АСУ СОРТС неизбежно приводит к кибераварии.

Следует отметить, что для большинства АСУ СОРТС СН имеет место (используется наиболее часто) параллельное включение компонентов системы защиты от кибератак с защищаемыми ААУ. При этом характеристики безаварийности и безотказности таких АСУ существенно зависят от режима обслуживания каждого ААУ при возникновении сбойной или аварийной ситуации. Возможно применение двух моделей обслуживания каждого ААУ АСУ СОРТС при использовании неуправляемой системы защиты АСУ от кибератак:

- аварийный ААУ до истечения расчетного времени τ не восстанавливается и вновь в работу не запускается;
- аварийный ААУ мгновенно восстанавливается и вновь включается в работу, в результате чего за время τ он может восстанавливаться многократно (время восстановления после кибератак обычно невелико по сравнению с расчетным временем τ и его влиянием на безаварийность каждого i -го ААУ АСУ СОРТС можно пренебречь).

Различие приведенных двух моделей обслуживания ААУ проявляется в том, что в первой модели к концу отрезка времени τ каждый i -й ААУ АСУ СОРТС может находиться в одном из трех состояний — работоспособности, сбойной ситуации и аварийной ситуации, а во второй модели обслуживания ААУ таких состояний только два — работоспособность и авария ситуация. Рассмотрим данные модели раздельно.

Если i -й аварийный ААУ АСУ СОРТС не восстанавливается, то в качестве исходных данных для анализа будем считать заданными функции распределения $F_{isb}(t)$, $F_{iav}(t)$, $F_{insr}(t)$, $F_{ilsr}(t)$ и их производные (плотности распределения) $f_{isb}(t)$, $f_{iav}(t)$, $f_{insr}(t)$, $f_{ilsr}(t)$.

Время работы i -го ААУ АСУ СОРТС с компонентом защиты до возникновения кибераварии T_{iav} представляет собой функцию «отставания» от случайных аргументов T_{iavsb} и T_{insr} :

$$T_{iav} = \begin{cases} T_{iavsb} & \rightarrow t_{iavsb} \geq t_{insr} \\ 0 & \rightarrow t_{iavsb} < t_{insr} \end{cases} \quad (4)$$

Функция распределения времени работы i -го ААУ АСУ СОРТС с компонентом системы защиты до кибераварии будет определяться следующим выражением:

$$F_{iav}(\tau) = \int_0^{\tau} F_{insr}(t) f_{iav}(t) dt. \quad (5)$$

С учетом предположений, что:

- вероятность одновременного возникновения аварийной ситуации и отказа i -го компонента системы защиты от кибератак равна нулю;
- отказ i -го компонента системы защиты от кибератак как следствие развития аварийной ситуации исключается (в противном случае следовало бы признать, что идеология защиты и сама система защиты просто неправильно спроектированы, так как не может работать в условиях, для которых она предназначена) получим, что вероятность безаварийной работы i -го ААУ АСУ СОРТС будет равна

$$P_{iav}(\tau) = 1 - F_{iav}(\tau) = 1 - \int_0^{\tau} F_{insr}(t) f_{iav}(t) dt. \quad (6)$$

Выражение (6) — достаточно общее, позволяющее определить функцию распределения времени безаварийной работы i -го ААУ АСУ СОРТС с компонентом системы защиты при любых известных законах распределения аварийных ситуаций и отказов типа «несрабатывание» в этом компоненте защиты i -го ААУ АСУ СОРТС.

Нередко на АСУ СОРТС воздействуют кибератаки, для которых характерным является, что приведенные функции распределения имеют экспоненциальный вид: $F_{insr}(t) = 1 - e^{-\lambda_{insr}t}$ и $F_{iav}(t) = 1 - e^{-\lambda_{iav}t}$. При этом выражение (6) принимает следующий вид:

$$P_{iav}(\tau) = e^{-\lambda_{iav}\tau} + \frac{\lambda_{iav}}{\lambda_{iav} + \lambda_{insr}} [1 - e^{-(\lambda_{iav} + \lambda_{insr})\tau}]. \quad (7)$$

Если учесть, что к АСУ СОРТС с системами защиты от кибератак, как правило, предъявляются весьма высокие требования по безаварийности (вероятность безаварийной работы должна быть выше 0,99), то значения λ_{iav} и λ_{insr} достаточно малы. Тогда допустимы следующие приближения:

$$e^{-\lambda_{iav}\tau} \approx 1 - \lambda_{iav}\tau + 0,5(\lambda_{iav}\tau)^2. \quad (8)$$

$$e^{-(\lambda_{iav} + \lambda_{insr})\tau} \approx 1 - (\lambda_{iav} + \lambda_{insr})\tau + 0,5(\lambda_{iav} + \lambda_{insr})^2\tau^2. \quad (9)$$

После подстановки выражений (8) и (9) в уравнение (7), выражение для вероятности безаварийного функционирования i -го ААУ АСУ СОТС примет достаточно простой и удобный для практических расчетов вид:

$$P_{iav}(\tau) = e^{-\lambda_{iav}\tau} + \frac{\lambda_{iav}}{\lambda_{iav} + \lambda_{insr}} [1 - e^{-(\lambda_{iav} + \lambda_{insr})\tau}] = 1 - 0,5\lambda_{iav}\lambda_{insr}\tau^2. \quad (10)$$

Из (10) следует, что при $\tau \rightarrow 0$ значение $P_{iav}(\tau) \rightarrow 1$, а при $\tau \rightarrow \infty$ значение $P_{iav}(\tau) \rightarrow \frac{\lambda_{iav}}{\lambda_{iav} + \lambda_{insr}}$. Это совершенно естественный результат для принятой модели эксплуатации каждого i -го ААУ АСУ СОТС. Если i -й ААУ в случае сбойной ситуации не восстанавливается, то это значит, что при достаточно длительном наблюдении он придет либо в состояние кибераварии (с вероятностью $P_{iav}(\tau) = \frac{\lambda_{insr}}{\lambda_{iav} + \lambda_{insr}}$), либо в состояние сбойного состояния (киберсбой с вероятностью $P_{iav}(\tau) = \frac{\lambda_{iav}}{\lambda_{iav} + \lambda_{insr}}$).

Если же отказавший из-за кибератаки i -й ААУ АСУ СОТС мгновенно восстанавливается, то выражение для вероятности возникновения аварийной ситуации в интервале (t, τ) , будет:

$$P_{iav}(t, \tau) = F_{iav}(\tau - \theta) - F_{iav}(t - \theta), \quad (12)$$

где θ — момент возникновения последнего (перед отказом компонента системы защиты типа «несрабатывание») сбойной ситуации i -го ААУ АСУ СОТС.

Учитывая, что θ есть величина случайная в общем случае с произвольным законом распределения, расчет $P_{iav}(t, \tau)$ сопряжен со значительными трудностями. В связи с чем, на практике рассматривается весьма распространенное экспоненциальное распределение во времени аварийных ситуаций.

В этом случае сам момент времени проведения последнего восстановления i -го ААУ АСУ СОТС безразличен, а имеет значение лишь сам факт нахождения i -го ААУ в работоспособном состоянии в момент отказа компонента системы защиты. Для вероятности возникновения аварий-

ной ситуации в интервале (t, τ) , т.е. после отказа компонента системы защиты АСУ СОТС от кибератак, можно записать:

$$P_{iav}(t, \tau) = F_{iav}(0, \tau - t). \quad (13)$$

Соответствующие функция и плотность распределения (при экспоненциальном распределении времени возникновения аварийных ситуаций и отказов компонентов системы защиты АСУ от кибератак) будут иметь следующий вид:

$$F_{iav}(0, \tau - t) = \int_0^{\tau-t} \lambda_{iav} e^{-\lambda_{iav}t} dt = 1 - e^{-\lambda_{iav}\tau} e^{-\lambda_{iav}t}. \quad (14)$$

$$f_{insr}(t) = \lambda_{insr} e^{-\lambda_{insr}t}. \quad (15)$$

Тогда выражение для вероятности безаварийного функционирования i -го ААУ АСУ СОТС примет следующий вид:

$$P_{iav}(\tau) = \begin{cases} e^{-\lambda_{insr}\tau} + \frac{\lambda_{insr}}{\lambda_{insr} - \lambda_{iav}} (e^{-\lambda_{iav}\tau} - e^{-\lambda_{insr}\tau}) & \forall \lambda_{iav} \neq \lambda_{insr}; \\ e^{-\lambda_{insr}\tau} + \lambda_{insr}\tau e^{-\lambda_{iav}\tau} & \rightarrow \lambda_{iav} = \lambda_{insr}. \end{cases} \quad (16)$$

Если ведущие функции распределений $\lambda_{iav}\tau \ll 1$, $\lambda_{insr}\tau \ll 1$, то справедливо следующее выражение для вероятности $P_{iav}(\tau)$

$$P_{iav}(\tau) \approx 1 - 0,5\lambda_{iav}\lambda_{insr}\tau^2. \quad (17)$$

Таким образом, если выполняются условия $\lambda_{iav}\tau \ll 1$, $\lambda_{insr}\tau \ll 1$, то выражение для вероятности безаварийного функционирования i -го ААУ АСУ СОТС за время τ в условиях массового применения нарушителем широкого класса кибератак для модели с мгновенным восстановлением каждого ААУ идентично выражению (10) для модели с невозстанавливаемым ААУ, что объясняется тем, что при высокоустойчивых к кибератакам ААУ (выполнение условия $\lambda_{iav}\tau \ll 1$) маловероятно наличие больше одного его киберотказа (от удачно проведенной кибератаки) за время τ и расчетные формулы для обеих моделей совпадают.

Выводы

Обеспечение безопасности функционирования АСУ СОТС, гарантирующей предоставления требуемых услуг управления, предполагает осуществление процедур организации комплексной защиты информации, информа-

ционных ресурсов и всех подсистем АСУ, выполняющих активные функции по управлению объектами СОТС.

Эта задача усложняется в условиях использования разного рода нарушителями высокоинтенсивных кибератак на автоматизированные системы управления СОТС в целом или на наиболее критически важные подсистемы АСУ (агрегаты управления), нарушение работы которых разного рода кибератаками может привести к срыву управления.

Требуемое противодействие разного рода кибератакам на АСУ СОТС не может быть обеспечено только созданием эффективной системы комплексной безопасности, поэтому, обычно, также создаются специальные подсистемы управления безопасностью, которые в совокупности образуют систему защиты АСУ от кибератак, а при создании такой неуправляемой или управляемой комплексной системы защиты АСУ СОТС необходимо иметь определенные вероятностно-временные характеристики, определяющие достаточность (или недостаточность) выделяемых средств для обеспечения устойчивого функционирования АСУ и устойчивого процесса управления СОТС. При этом требуемые вероятностно-временные характеристики процесса функционирования АСУ СОТС в обстановке воздействующих на нее широкого класса кибератак и при условии реализованной системы защиты АСУ от них, зависят, при прочих равных условиях, от вариантов построения этой системы защиты, от того как подключены ее компоненты к каждому ААУ АСУ.

В работе для двух возможных вариантов подключения компонентов системы защиты к каждому агрегату автоматизации управления (параллельно и последовательно), а также для различных моделей обслуживания каждого ААУ, предложен и получен ряд таких характеристик, задав определенные значения которых можно быть уверенным, что создаваемая система защиты АСУ СОТС от кибератак нарушителей обеспечит устойчивое управление системой и, следовательно, устойчивое функционирование СОТС в условиях широкого класса кибератак различных нарушителей.

Литература

1. Буренин А.Н., Легков К.Е. Современные инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения и управления. М.: Медиа Паблишер, 2015. 348 с.
2. Ушаков И.А. Вероятностные модели надежности информационно-вычислительных систем. М.: Радио и связь, 1991. 132 с.
3. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения: пер. с англ. М.: Мир. 1984. 1 т. 528 с.

4. Шнепс-Шнеппе М.А. Системы распределения информации. Методы расчета. М.: Связь. 1979. 342 с.
5. Емельянов А.В., Легков К.Е., Оркин В.В. Анализ проблем информационной безопасности информационных систем специального назначения при управлении ими // Труды II Межвузовской научно-практической конференции «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». СПб.: Военная академия связи, 2017. С. 122–126.
6. Шаньгин В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. М.: ДМК Пресс, 2012. 592 с.
7. Ерохин С.Д., Артамонова Я.С., Легков К.Е. К вопросу о методике выявления угроз информационной безопасности в пограничном пространстве // I-methods. 2013. Т. 5. № 2. С. 19–22.
8. Бабошин В.А., Сиротенко Ф.Ф. Модель процесса мониторинга транспортной сети специального назначения на основе нечеткой логики // I-methods. 2013. Т. 5. № 1. С. 20–25.
9. Ерохин С.Д., Легков К.Е. Информационные угрозы автоматизированных систем управления технологическими процессами // I-methods. 2014. Т. 6. № 1. С. 24–26.
10. Корсунский А.С., Масленникова Т.Н., Ерышов В.Г. Модель системы анализа защищенности информации в автоматизированных системах // I-methods. 2015. Т. 7. № 4. С. 30–34.
11. Mitra D., Ramakrishnan K.G. Technics for traffic enginering of multiservice in priority networks // BLTJ. 2001. Vol. 1. Pp. 123–130.
12. Зима В.М., Молдовян А.А., Молдовян Н.А. Безопасность глобальных сетевых технологий. СПб.: СПбУ, 1999. 234 с.
13. Буренин А.Н., Курносков В.И. Теоретические основы управления современными телекоммуникационными сетями. М.: Наука. 2011. 464 с.
14. Котенко И.В., Степаишкин М.В., Богданов В.С. Анализ защищенности компьютерных сетей на раз личных этапах проектирования и эксплуатации // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 5. С. 3–8.
15. Gorodetsky V., Kotenko I., Karsayev O. The Multi-agent Technologies for Computer Network Security: Attack Simulation, Intrusion Detection and Intrusion Detection Learning // The International Journal of Computer Systems Science &Engineering. 2003. Vol. 18. № 4. Pp. 191–200.
16. Harmer P., Williams P., Gunsch G., Lamont G.B. An artificial immune system architecture for computer security applications // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6. No. 3. Pp. 252–280.
17. Al-Kasassbeh M., Adda M. Network fault detection with Wiener filter-based agent // Journal of Network and Computer Applications. 2009. Vol. 32. No. 4. Pp. 824–833.

PROBABLE TIME RESPONSE CHARACTERISTICS OF FUNCTIONING OF PROTECTED AGGREGATE AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR DIFFICULT ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEM IN THE CONDITIONS OF INTENSIVE CYBER ATTACKS

ANDREY N. BURENIN,

St. Petersburg, Russia, konferencia_asu_vka@mail.ru

KONSTANTIN E. LEGKOV,

St-Petersburg, Russia, constl@mail.ru

MIKHAIL S. PERVOV,

Saint-Petersburg, Russia

KEYWORDS: cyber attack; probable time response characteristics; automated control system; protection system; program impacts

ABSTRACT

In the modern conditions regular attempts of different violators to influence negatively their normal functioning by means of any cyber-attacks (the system, network and computer attacks) are watched in functioning enterprise and departmental difficult organizational and technical systems. In this situation, the probability of essential change of nature of functioning of such systems, as a result of high-intensity cyber-attacks to automated control systems for them in general or on the most crucial subsystems of an automated control system sharply increases. Violation of functioning can lead to failure of control of enterprise or departmental difficult organizational and technical system therefore there is a need application of a package of measures and the hardware and software systems providing safety of their functioning. The required level of counteractions to cyber-attacks on the automated control systems of difficult organizational and technical systems can be provided with creation of effective system of complex safety together with creation of special complexes of security management forming in total the system of protection of functioning of automated control systems against cyber-attacks. During creation of such complex system of protection against cyber-attacks it is necessary to operate with certain probable and temporal parameters and characteristics to be sure of sufficiency (or insufficiency) the allocated funds for support of steady functioning of management system and steady administrative process with the most organizational and technical system. Tasks of receiving the main probable time response characteristics of the created system of protection against cyber-attacks are considered. The required probable time response characteristics in the conditions of the cyber-attacks influencing it a wide class and on condition of the realized system of protection against them, depend on options of creation of this system of protection, with other things being equal.

They depend on connection its components to each aggregate of control automation. For two possible options of connection of components of system of protection to each aggregate of control automation (parallelly and sequentially) and for different models of service of each aggregate, a row of such characteristics is offered and received. Having set certain values of these characteristics it is possible to be sure that the created system of protection of an automated control system against cyber-attacks of violators will provide steady system management and, therefore, steady functioning with the most organizational and technical system. For the purpose of a specification of tasks, reviewing is restricted to the system of the protection consisting only of safety complexes.

REFERENCES

1. Burenin A.N., Legkov K.E. *Sovremennyye infokommunikatsionnyye sistemy i seti spetsial'nogo naznacheniya. Osnovy postroyeniya i upravleniya: Monografiya*. [Modern infocommunication systems and special purpose networks. Basics of creation and control]. Moscow: Media Publisher, 2015. 348 p. (In Russian)
2. Ushakov I.A. *Veroyatnostnyye modeli nadezhnosti informatsionno-vychislitel'nykh sistem* [Probabilistic models of reliability of information-computing systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1991. 132 p. (In Russian)
3. Feller W. *An Introduction to Probability Theory and its Applications*. 3rd ed. 1968. Vol. 1. 528 p.
4. Shneps-Shneppe M.A. *Distribution System information. Calculation methods*. Moscow: Svyas', 1979. 342 p. (In Russian)
5. Emel'yanov A.V., Legkov K.E., Orkin V.V. Analiz problem informatsionnoy bezopasnosti informatsionnykh sistem spetsial'nogo naznacheniya pri upravlenii imi [Proceedings of the II Interuniversity

scientific and practical conference "Problems of technical support of troops in modern conditions"]. *Trudy II Mezhdvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voysk v sovremennykh usloviyakh"* [Proceedings of the II Inter-university scientific and practical conference "Problems of technical support of troops in modern conditions"]. St. Petesburg: Voennaya akademiya svyazi, 2017. Pp. 122-126. (In Russian)

6. Shan'gin V.F. *Zashchita informatsii v komp'yuternykh sistemakh i setyakh* [Information Protection in computer systems and networks]. Moscow: DMK Press, 2012. 592 p. (In Russian)

7. Erokhin S.D., Artamonov Y.S., Legkov K.E. To the question about the methods of identification of information security threats in the border space. *I-methods*. 2013. Vol. 5. No. 2. Pp. 19-22. (In Russian)

8. Baboshin V.A., Sirotenko F.F. The model of the process of monitoring the transportation network for special purposes based on fuzzy logic. *I-methods*. 2013. Vol. 5. No. 1. Pp. 20-25. (In Russian)

9. Erokhin S.D., Legkov K.E. Information threats are automated systems of control of technological processes. *I-methods*. 2014. Vol. 6. No. 1. Pp. 24-26. (In Russian)

10. Korsun A.S., Maslennikova T.N., Erychov V.G. Model system analysis of information security in automated systems. *I-methods*. 2015. Vol. 7. No. 4. Pp. 30-34. (In Russian)

11. Mitra D., Ramakrishnan K.G. Technics for traffic engineering of multiservice in priority networks. *BLTJ*. 2001. Vol. 1. Pp. 123-130.

12. Zima V.M., Moldovyan A.A., Moldovyan N.A. *Bezopasnost' global'nyh setevykh tehnologij* [The global security network technologies]. St. Petesburg: SPbU, 1999. 234 p. (In Russian)

13. Burenin A.N., Kurnosov V.I. *Teoreticheskie osnovy upravleniya sovremennymi telekommunikatsionnymi setyami* [Theoretical bases of management of modern telecommunications networks]. Moscow: Nauka, 2011. 464 p. (In Russian)

14. Kotenko I.V., Stepashkin M.V., Bogdanov V.S. Vulnerability Analysis of Computer Networks on Design Stages and Maintenance. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2006. Vol. 49. No. 5. Pp. 3-8. (In Russian)

15. Gorodetsky V., Kotenko I., Karsayev O. The Multiagent Technologies for Computer Network Security: Attack Simulation, Intrusion Detection and Intrusion Detection Learning. *The International Journal of Computer Systems Science & Engineering*. 2003. Vol. 18. No. 4. Pp. 191-200.

17. Harmer P., Williams P., Gunsch G., Lamont G.B. An artificial immune system architecture for computer security applications. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002. Vol. 6. No. 3. Pp. 252-280.

18. Al-Kasassbeh M., Adda M. Network fault detection with Wiener filter-based agent. *Journal of Network and Computer Applications*. 2009. Vol. 32. No. 4. Pp. 824-833.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Burenin A. N., PhD, Docent, Chief specialist of Aktsionernogo obshchestv «Research Institute «Rubin»;

Legkov K. E., PhD, Head of the Department of automated systems of control of the Military Space Academy;

Pervov M.S., Military academy of communication of Marshall of the Soviet Union S. M. Budenny.

For citation: Burenin A.N., Legkov K.E., Pervov M.S. Probable time response characteristics of functioning of protected aggregate automated control system for difficult organizational and technical system in the conditions of intensive cyber attacks. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 5. Pp. 56-63. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10166 (In Russian)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10167

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОГО АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОЙ ТОНОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ МОНОХРОМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

НЕЙДОРФ

Рудольф Анатольевич¹

АГАДЖАНЯН

Альберт Грантович²

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена исследованию эффективности нового гибридного алгоритма оптимальной тоновой аппроксимации монохромных мультитоновых изображений в сравнении с применяемыми в настоящее время алгоритмами. Все такие алгоритмы построены на замене тонов исходного изображения, выполненного в палитре с определенным количеством тонов, тонами аппроксимирующей палитры, содержащей меньшее количество тонов, наиболее важных для передачи изображения. Гибридная модель оптимизации построена как комбинация эвристического эволюционно-генетического алгоритма субоптимизации результата аппроксимации монохромных мультитоновых изображений и детерминированного алгоритма, обеспечивающего нахождение экстремального результата для той же задачи. Для оценки качества аппроксимации используется нестандартный критерий минимума суммы модулей отклонений, более высокая эффективность которого, в сравнении с традиционным квадратичным, доказана предыдущими исследованиями. Целью эволюционно-генетического алгоритма в составе гибридного является нахождение области поиска оптимума используемого критерия и максимальное ее сокращение. Попадание в область структур аппроксимирующей палитры, близкую к оптимальной, сокращает путь поиска экстремума качества аппроксимации детерминированному алгоритму, который работает значительно медленнее, т.к. пользуется, хоть и модифицированным, но все равно ресурсозатратным алгоритмом перебора. Для сравнения использованы два наиболее распространенных подхода к решению данной задачи: алгоритм медианного сечения и метод k -средних. Сравнение осуществлено на разнородной выборке изображений. Оно продемонстрировало весомое преимущество гибридной модели оптимальной аппроксимации перед альтернативными методами, показав от 5% до 15% улучшения качества аппроксимации. Кроме того, в рамках исследования разработаны новые подходы определения стартовой позиции алгоритма k -средних, что дает перспективы расширения области сравнительного исследования гибридной модели оптимизации, а также возможности по разработке новых моделей тоновой аппроксимации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тоновая аппроксимация; монохромные изображения; оптимизация; гибридный алгоритм; эволюционно-генетический алгоритм; k -средних.

Сведения об авторах:

¹д.т.н., профессор, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, Россия, ran_pro@mail.ru

²аспирант кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Донского государственного технического университета, Ростов-на-Дону, Россия, foralbert92@gmail.com

Для цитирования: Нейдорф Р.А., Агаджанян А.Г. Сравнительное исследование гибридного алгоритма оптимальной тоновой аппроксимации монохромных изображений // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 5. С. 64-74. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10167

Введение

В настоящее время потоки цифровой графической информации очень масштабны и их потоки продолжают возрастать в связи с расширением и охватом цифровыми технологиями все больших сфер деятельности человека. Это оказывает весомую нагрузку на хранение и передачу цифровых данных и вычислительные ресурсы управления ими. Таким образом, алгоритмы обработки цифровых графических данных, облегчающие реализацию основных этапов их обработки имеют большую актуальность.

Изображения занимают значительную часть в общем объеме передаваемой и обрабатываемой в мире цифровой информации. Обработка цифровых изображений может иметь множество целей, например, художественную обработку [1], фильтрацию от помех, восстановление искажений, распознавание образов многие другие [1–3]. При этом важное место среди процессов обработки информации перед ее передачей, или перед решением основной задачи, например, распознавание образов [1, 3], занимает сегментация и сжатие [1–3]. Это объясняется тем, что оно оказывает прямую разгрузку памяти для хранения, и времени для передачи цифровых изображений, а также упрощает реализацию основной задачи. Это относится к упомянутому процессу распознавания образов и весьма актуально для таких задач, как, например, создание систем технического зрения.

В данной работе рассматривается задача оптимальной или субоптимальной тоновой аппроксимации монохромных мультитоновых¹ изображений (ММИ), которая заключается в понижении размерности яркостной палитры изображения при условии обеспечения максимально или достаточной близости аппроксимированного изображения к оригиналу. Задача тоновой аппроксимации возникает, на-

пример, в связи с необходимостью отображения или обработки изображений на аппаратах, имеющих ограничения по воспроизведению тонов или объема памяти [2]. Однако она может решать и более тонкие технологические задачи, например, устранять избыточность отображения исследуемой картины и др. Поэтому данная процедура актуальна и в наше время [4–11], поскольку может быть применена не только для сжатия [2, 4, 7], но и в распознавании образов [3, 4, 8–10] и ряде других высокотехнологичных задач обработки изображений [2, 4].

Задача оптимальной тоновой аппроксимации рассматривается применительно к ММИ по двум причинам. Во-первых, цифровые изображения данного вида очень часто используются в науке и, особенно, в технике, например, в системах технического зрения [3, 12]. Во-вторых, для успешного развития науки об оптимальной тоновой аппроксимации вообще, важно выявить её базовые закономерности применительно к ММИ. Актуальность данной научно-технической задачи подтверждается современными исследованиями применительно не только к цветным [4–6], но и к монохромным [7–11] изображениям.

Тоновая аппроксимация базируется на поэлементной замене в изображении тонов его исходной палитры (ИП) большого размера, образующих оригинальное ММИ, на, по возможности, наиболее близкий тон из аппроксимирующей палитры (АП), содержащей значительно меньше тонов. В результате формируется аппроксимированное ММИ. Сама процедура проста в реализации, однако проблемой является подбор эффективной (а лучше, оптимальной) АП, которая обеспечит достаточное (или оптимальное) качество аппроксимации, т. е. на близость аппроксимированного ММИ к оригиналу. Таким образом, возникает оптимизационно-поисковая задача формирования структуры АП.

На рис. 1 приведен пример тоновой аппроксимации ММИ, воспроизведенного стандартной палитрой размерностью в 256 тонов, до 8 тонов. Представлен увеличенный

¹Монохромное мультитоновое изображение (ММИ) для воспроизведения графической информации использует один цвет, но различные его градации (тона). Стандартной палитрой ММИ является 256 градаций, где 0 кодирует наиболее темный тон (фактически абсолютно черный), а 255 наиболее яркий тон (фактически абсолютно белый).



Рис. 1. Пример тоновой аппроксимации на основе различных подходов

фрагмент оригинального изображения, а также аппроксимированного на основе двух АП, полученных известным алгоритмом медианного сечения и методом k -средних.

Этот пример показывает необходимость в обеспечении оптимизации процедуры тоновой аппроксимации ММИ, поскольку это, с одной стороны, позволяет добиться эффективного сжатия [2, 4, 7] информации в связи с одинаковой размерностью палитры двух аппроксимированных изображений (см. рис. 1), с другой стороны, позволяет эффективно упростить изображение (сегментировать), что может использоваться в алгоритмах распознавания образов [8–10].

Поэтому в настоящей статье исследуется результат решенной авторами задачи оптимизации тоновой аппроксимации ММИ, предполагающая минимизацию порождаемых визуальных потерь в результате выполнения процедуры тоновой аппроксимации за счет подбора корректной структуры АП [2]. Для оптимизации процедуры тоновой аппроксимации ММИ предложен, разработан и экспериментально исследован гибридный алгоритм, обеспечивающий оптимизацию рассматриваемой процедуры [13–18].

Положительный результат такого исследования поможет разработчикам выработать направления для будущих исследований и разработок по модификациям разработанного алгоритма. Это потенциально позволит добиться нового качественного уровня реализации оптимизации тоновой аппроксимации ММИ.

Постановка задачи. Для подтверждения эффективности и результативности нового метода необходимо рассмотреть и проанализировать основные существующие методы формирования АП для реализации тоновой аппроксимации ММИ и экспериментально сравнить их результаты с результатом применения гибридного метода оптимизации, предложенного авторами.

Применяемые алгоритмы тоновой аппроксимации ММИ. Существует множество алгоритмов тоновой аппроксимации, которые в общем случае согласно можно разделить на «пред-кластерные» и «пост-кластерные». Пред-кластерные методы предполагают единичное вычисление АП, а пост-кластерные подразумевают итеративное вычисление с улучшением качества АП на каждой новой итерации алгоритма [2]. Для продекларированного в постановке задачи сравнительного анализа разработанного авторами алгоритма субоптимальной аппроксимации далее описываются основные из них, применяемые в настоящее время.

1. Алгоритм медианного сечения. Данный алгоритм относится к группе пред-кластерных методов и был предложен Полом Хэкбертом, который в своей работе [2] рассмотрел множество различных подходов к то-

вой аппроксимации. но наибольшую популярность получил именно алгоритм медианного сечения. Это в первую очередь связано с простотой реализации и высокой вычислительной скоростью. В общем случае для цветного изображения алгоритм медианного сечения реализуется следующим образом:

1. Все цвета изображения образуют куб из трех каналов цвета.

2. Определяется доминантный цветовой канал, т.е. канал, имеющий самый широкий диапазон.

3. Реализуется сечение куба, согласно показателю доминантного канала, ровно по середине, т.е. оставляя одинаковое количество цветов в обоих субкубах, который представляют собой прямоугольные блоки.

4. Шаги 2 и 3 рекурсивно повторяются для полученных блоков, пока не определено их необходимое число, которое равно заданному размеру АП.

5. В конце для каждого блока вычисляется средний цвет, который и будет включен в структуру АП.

Применительно к ММИ, который фактически представляется одним каналом, определение доминантного диапазона на каждом шаге не требуется, что приводит к дополнительному упрощению алгоритма, т.е. выполняется сечение яркостной шкалы на приблизительно равные блоки, количество которых соответствует размеру АП, и вычисляется среднее значение тона для каждого блока.

Основной недостаток данного метода заключается в том, что алгоритмическая схема, основанная на равномерном распределении, оказывается неэффективной при аппроксимации изображения, имеющего существенно неравномерную частотную диаграмму яркости (ДЯ). В большинстве случаев ММИ имеют именно неравномерную яркостную структуру. Примеры таких ДЯ представлены на графиках (рис. 2), где по оси абсцисс отложены значения тонов в яркостной палитре, а по оси ординат количество пикселей этих тонов в изображении.

2. Алгоритм взвешенного сечения. Алгоритм был впервые предложен в коллективе проф. Р.А. Нейдорфа, и применен А.А. Скляренко в диссертации «Методы решения задачи попиксельной S -аппроксимации мультитоновых изображений и их оптимизация» (стр. 74). Он подробно экспериментально исследован в работе [15], где было установлено, что алгоритм взвешенного сечения в среднем демонстрирует улучшение результата по сравнению с алгоритмом медианного сечения. Для достаточно равномерных ДЯ ММИ результаты алгоритмов практически сравниваются.

Алгоритм взвешенного сечения выполняет разделение исходных тонов на соответствующие подмножества, покрываемые одним аппроксимирующим тоном, основываясь на анализе яркостной диаграммы изображения. Реализуется алгоритм следующим образом:

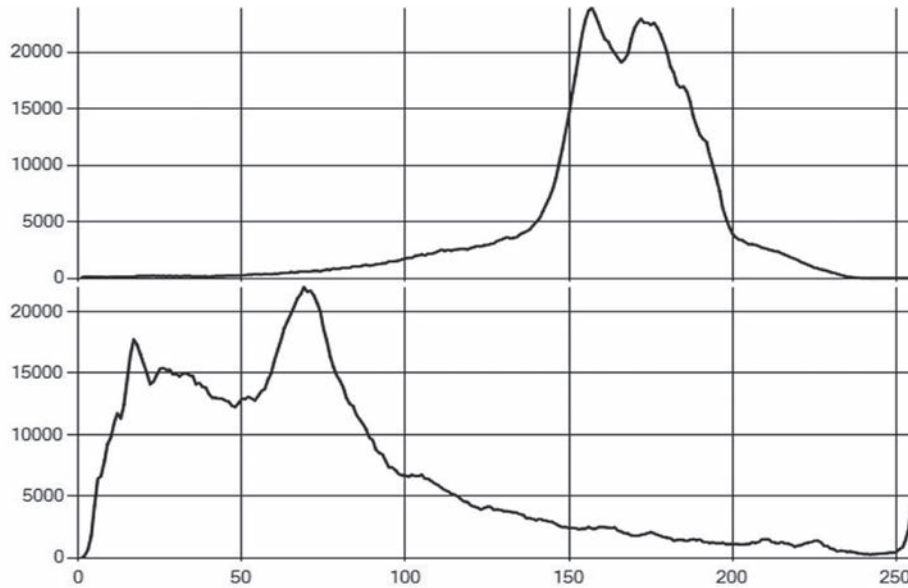


Рис. 2. Частотные диаграммы яркости ММИ

1. Определение количества всех пикселей N .
2. Нахождение среднего количество пикселей N_A диапазона аппроксимации пикселей ИП для принятого размера S^A АП в тонах по формуле $N_A = N/S^A$.
3. Перестроение частотной диаграммы яркости в интегральную диаграмму яркостей путем построения графика монотонной кривой накопленного количества пикселей начиная с наименьшего тона с добавлением их количества для каждого очередного тона вплоть до максимального.
4. Сканирование интегральной диаграммы яркостей с выделением диапазонов, содержащих полные количества ΔN_j пикселей исходной палитры, где $\Delta N_j \approx N_A$.

Рассмотрим пример разбиения на диапазоны посредством алгоритма взвешенного сечения для АП размерностью в пять тонов (рис. 3). На интегральной диаграмме по оси абсцисс отложена стандартная шкала ИП, а по оси

ординат относительное n_i количество пикселей отдельного тона, нормированное в диапазоне от 0 до 1 по формуле $n_i = N_i / N$, где N_i — количество пикселей, накопленное к i -му тону шкалы ИП.

Таким образом, алгоритм взвешенного сечения сужает диапазон покрытия для участков с большим количеством тонов и расширяет для диапазонов с малым количеством тонов. Такой подход позволит понизить общую визуальную погрешность за счет понижения отклонения для тонов, которые большего всего используются в отображении изображения.

3. Алгоритм k -средних. Данный метод относится к пост-кластерной группе и считается одним из наиболее популярных методов кластеризации, который был предложен еще в 50-х годах [2, 8, 20]. Однако, актуальность

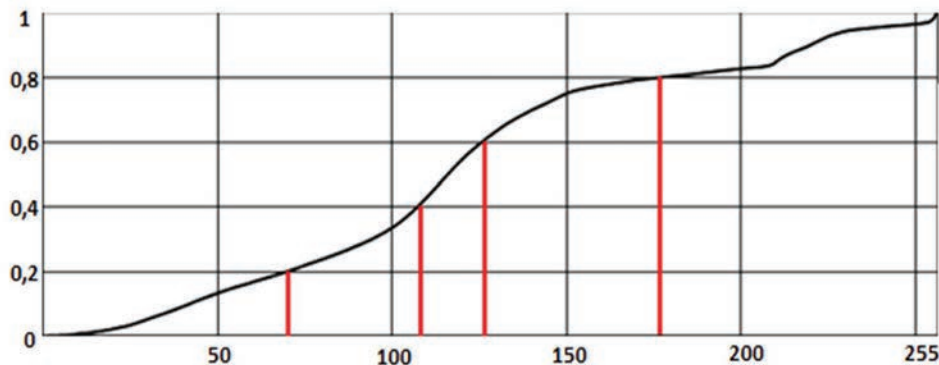


Рис. 3. Интегральная диаграмма ММИ с диапазонами, определенными на основе алгоритма взвешенного сечения

исследования аспектов использования данного метода в тоновой аппроксимации подтверждается множеством современных исследований [4, 8, 10]. Также популярность алгоритма k -средних связана с достаточной простотой реализации. Алгоритм k -средних реализуется следующими действиями:

1. Выбираются «центроиды», представляющие собой точки в пространстве, которые рассматриваются как центры кластеров.
2. Формируются соответствующие кластеры наиболее близких к «центроидам» элементов, где количество кластеров равно размеру АП.
3. Вычисляется центр масс каждого кластера, что позволяет получить новые «центроиды».
4. Шаги 2 и 3 итеративно повторяются до тех пор пока значения «центроидов» изменяются, после чего алгоритм завершается.

Рассмотрим визуальный пример одной итерации метода k -средних применительно к тоновой аппроксимации (см. рис. 4). На рисунке 4а диапазон палитры разделен на четыре кластера (условная АП состоит из 4 тонов), где красным отмечены границы каждого кластер, а значения начальных центроидов указаны в скобках. В рамках границ кластеров вычисляется центр масс, значение которого в итоге становится новым центроидом. Результат новой вычисленные, т.е. итерации метода k -средних, указан ниже (см. рис 4б). Необходимо отметить, что данный алгоритм не гарантирует глобальный экстремум минимума суммарного отклонения всех кластеров.

Основным недостатком метода k -средних является проблема определения начальных значений центроидов,

поскольку именно от них зависит оптимальность выходного результата в связи с детерминированной сущностью самого алгоритма [3, 8, 10]. Одним из подходов к решению этой проблемы является одновременная обработка алгоритмом k -средних некоторого набора альтернативных центроидов [8, 21], что также ведет к повышению вычислительной нагрузки. Существуют различные модификации и подходы к вычислению центроидов [8, 21], тем не менее необходимо учитывать специфику предметной задачи применения.

Учитывая специфику тоновой аппроксимации при анализе и сравнении алгоритма k -средних используются три его модификации, различающихся подходам к определению центроидов для алгоритма k -средних. Различие заключается в используемой стартовой АП, где тона являются центроидами. Используются АП, полученные алгоритмами медианного сечения, взвешенного сечения, а также путем параллельной обработки пяти АП, полученных в рамках заданных диапазонов случайным образом. Таким образом, в рамках исследования будет экспериментально изучено три варианта модификации метода k -средних применительно к тоновой аппроксимации ММИ.

4. Гибридная модель оптимизации (ГМО).

Учитывая недостатки описанных выше существующих методов тоновой аппроксимации ММИ авторами разработан метод, существенно повышающий точность и быстродействие данного преобразования. К началу разработки метода авторы уже располагали двумя достаточно мощными и эффективными инструментами субоптимальной тоновой аппроксимации ММИ [13–16].

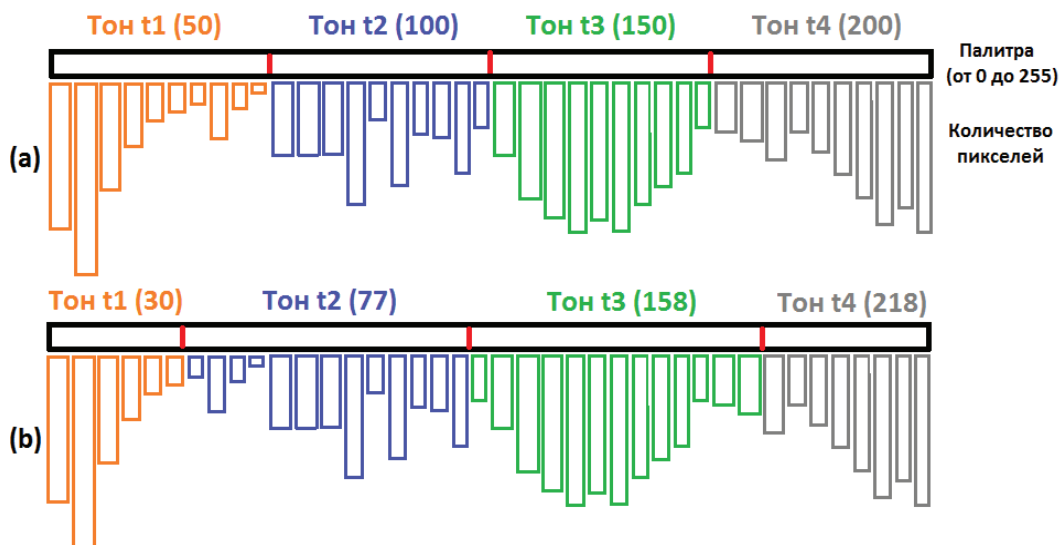


Рис. 4. Демонстрационный пример метода k -средних

Для сравнительно быстрой субоптимизации АП был разработан эволюционно-генетический алгоритм (ЭГА), высокая эффективность которого, с точки зрения качества аппроксимации, доказана исследованиями в работах [13–15].

Однако вероятностный характер ЭГА, как эвристического алгоритма обуславливает его недостаточную эффективность. Применение ЭГА не гарантирует нахождение не только глобального, но и достаточно близкого к нему локального экстремума. При этом, многовариантность ММИ как объекта оптимизации снижает быстродействие ЭГА при стремлении к максимально точному решению. Для оценки качества аппроксимации на произвольной стадии работы ЭГА был разработан детерминированный алгоритм проверки экстремальности АП [16]. Суть метода состоит в исследовании ближайшей окрестности оптимизируемой АП [16, с. 5]. Полный перебор соседних с тонами исследуемой АП в поиске лучшей точки с оценкой их качества позволяет сравнительно быстро сделать вывод об ее экстремальности. Исследования с использованием этого алгоритма показал [16], что ЭГА не всегда дает «экстремальный» выходной результат. Однако его можно довести до экстремальности, последовательно проверяя этим алгоритмом наилучшие точки окрестности очередного АП.

В результате сформировался подход к оптимизации АП на основе совмещения обоих алгоритмов. Объединение детерминированного алгоритма с ЭГА позволило построить гибридную модель оптимизации (ГМО) структуры АП [17–18]. В нем ЭГА реализует быстрое сужение области поиска субоптимальной АП, а алгоритм поиска ближайшего экстремума обеспечивает фактическую оптимальность решения. Поскольку алгоритм поиска экстремума, входящий в гибридный алгоритм, основан на полном переборе, общее быстродействие поисковой-оптимизации гибридным алгоритмом зависит от близости к субоптимальному решению, найденного ЭГА. Это связано с тем, что эффективный результат ЭГА влечет за собой сокращение количества поисковых итераций нахождения экстремального АП. Это позволяет существенно сократить общее время работы ГМО в целом.

Интересен тот факт, что разработанная ГМО [17–18] обнаруживает свойство дуальности оптимизации, в том смысле, что гибридный алгоритм обеспечивает, как субоптимизацию быстродействия, так и гарантированную экстремальность точности аппроксимации [17–18]. Это позволяет при экспериментальной настройке ГМО в качестве критерия субоптимизации использовать лишь общее вычислительное время.

4. Оценка качества тоновой аппроксимации ММИ. Для решения рассматриваемой оптимизационно-поисковой задачи и сравнительной оценки различных

методов построения АП использовался объективный критерий оценки качества тоновой аппроксимации ММИ, основанный на выработанной в ходе исследований модульной оценке попиксельного расхождения изображений [13–18]. Поскольку любое растровое ММИ представляется матрицей, чьи элементы (пиксели) хранят построчно и постолбцово информацию о цвете (тоне) в конкретных координатных точках:

$$P[i, k, l] = \begin{bmatrix} \cdot & \vdots & \cdot \\ \dots & (t_i^o)_{kl} & \dots \\ \cdot & \vdots & \cdot \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где k — номер строки, а l — номер столбца матрицы; i — индекс, тона t_i^o в исходной палитре, то оценкой и критерием качества аппроксимации является суммарное отклонение тонов координатно идентичных элементов аппроксимированного и исходного изображений:

$$\Delta t = \sum_{k=1}^n \left(\sum_{l=1}^m \left| (t_{j0}^a)_{kl} - (t_{i0}^o)_{kl} \right| \right). \quad (2)$$

Выражение удобно применять в силу целочисленности его результата, но применять для сравнения только для ММИ одинаковых размеров (по количеству пикселей). При сравнении результатов аппроксимации ММИ различных размеров корректной является взвешенная оценка, вычисляемая по формуле

$$\Delta t = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^n \left(\sum_{l=1}^m \left| (t_{j0}^a)_{kl} - (t_{i0}^o)_{kl} \right| \right). \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) n — число строк, m — число столбцов, а $N = n \cdot m$ — количество пикселей в ММИ. Обращает внимание, что в (2) вычисляется абсолютное отклонение по модулю, тогда как стандартно используется, обычно, квадрат отклонения [2, 5]. Однако, исследованием [15] авторами показана целесообразность использования применительно к изображениям типа ММИ именно модуля отклонения.

5. Сравнительное исследование разработанного метода тоновой аппроксимации ММИ с наиболее распространенными в практике обработки графической информации. Экспериментальное сравнение проводилось обработкой 30 случайно отобранных ММИ, различающихся как визуальными сценами отображения (космические объекты, военная техника, тех. производства, фотографии людей и т.д.), что гарантировало различие структур ДЯ, так и размерами (от 600 на 340 до 1920 на 1280 пикселей).

Поскольку первичной целью разработки сравнительного эксперимента является оценка эффективности алгоритма ГМО, использованы следующие сравниваемые параметры двух видов. Количественная оценка качества аппроксимации X_1 исчисляется как относительное (в процентах) увеличение оценки (2) или (3) по сравнению с результатом применения ГМО. Количественная оценка вероятности проявления преимущества ГМО X_2 — это количество изображений из исследуемой выборки, для которых ГМО был получен результат лучше, чем у алгоритма сравнения (отнесенное к объему выборки 30, это даст экспериментальную оценку вероятности преимущества ГМО — дана в скобках). Результаты представлены в таблице.

Проведенный эксперимент продемонстрировал, что разработанный алгоритм ГМО в среднем (для использованной выборки) значительно улучшает качество тоновой аппроксимации, вычисляемого на основе критерия (2). Выигрыш по сравнению с алгоритмом МС составляет ~15%, а по сравнению с алгоритмом МСК — от ~5% до ~6,5%, в зависимости от подхода к определению начальных центроидов (см. табл. 1).

Существенным результатом также является то, что исследование позволило определить потенциальную эффективность модели, предполагающей использование МС в качестве инструмента определения «центроидов» для алгоритма k -средних применительно к тоновой аппроксимации ММИ, по меньшей мере, в условиях малого временного ресурса. Использование для этой цели алгоритма ВС, а также ПСК оказалось менее успешным (см. табл.). Однако, значительное увеличение количества параллельно обрабатываемых АП в модели ПСК потенциально может продемонстрировать улучшение результата по среднему показателю. Тем не менее необходимо отметить, что в этом случае возрастает и вычислительная нагрузка.

Для наглядности проявления положительного эффекта применения ГМО для всех 4 алгоритмов на рис. 2

построены сравнительные графики, где по оси абсцисс отложены номера изображений, а по оси ординат процент ухудшение результата применения алгоритма в сравнении с ГМО. Максимальное улучшение результата тоновой аппроксимации алгоритмом ГМО в сравнении с МС составило 57,7%, а по сравнению с МСК 27,4%. Обращает внимание, что алгоритм МС, базирующийся на равномерном распределении, в некоторых изображениях показал небольшое отклонение от ГМО (минимальное отклонение составило 0,9%). Это связано с тем, что эти изображения характеризуются относительно равномерной яркостной диаграммой, что позволяет алгоритму МС добиться достаточно эффективного результата тоновой аппроксимации.

На представленных графиках (см. рис. 2), как и в таблице 1, показано, что алгоритмы ВСК и ПСК, несмотря на менее успешный результат по среднему показателю, позволили, в случае с ВСК, превзойти результат тоновой аппроксимации по сравнению с ГМО в изображении № 4, а в случае с ПСК в изображениях № 4 и № 14. Данный феномен демонстрирует необходимость дополнительных исследований параллельной модели ПСК и ее последующего сравнения с ГМО.

Заключение

1. Исследованием репрезентативной выборки разнотипных изображений показана очевидная и достаточно высокая эффективность применения гибридной модели для оптимизации тоновой аппроксимации монохромных мультитоновых изображений в сравнении с применяемыми в настоящее время методами медианного сечения (на ~15%) и метода k -средних (на ~5–6,5%).

2. В ходе исследования в качестве попутного результата предложены и количественно оценены три подхода к определению стартовых «центроидов» для метода k -средних применительно к задаче тоновой аппроксимации ММИ, что можно рассматривать как улучшающую модификацию метода k -средних

Таблица

Результаты сравнительного эксперимента

	Алгоритм тоновой аппроксимации			
	Медианное сечение (МС)	МС + k -средних (МСК)	Взвешенное сечение + k -средних (ВСК)	Параллельный случайный + k -средних (ПСК)
X_1	14,8%	5,09%	6,57%	5,24%
X_2	30 (1)	30 (1)	29 (0,967)	28 (0,933)

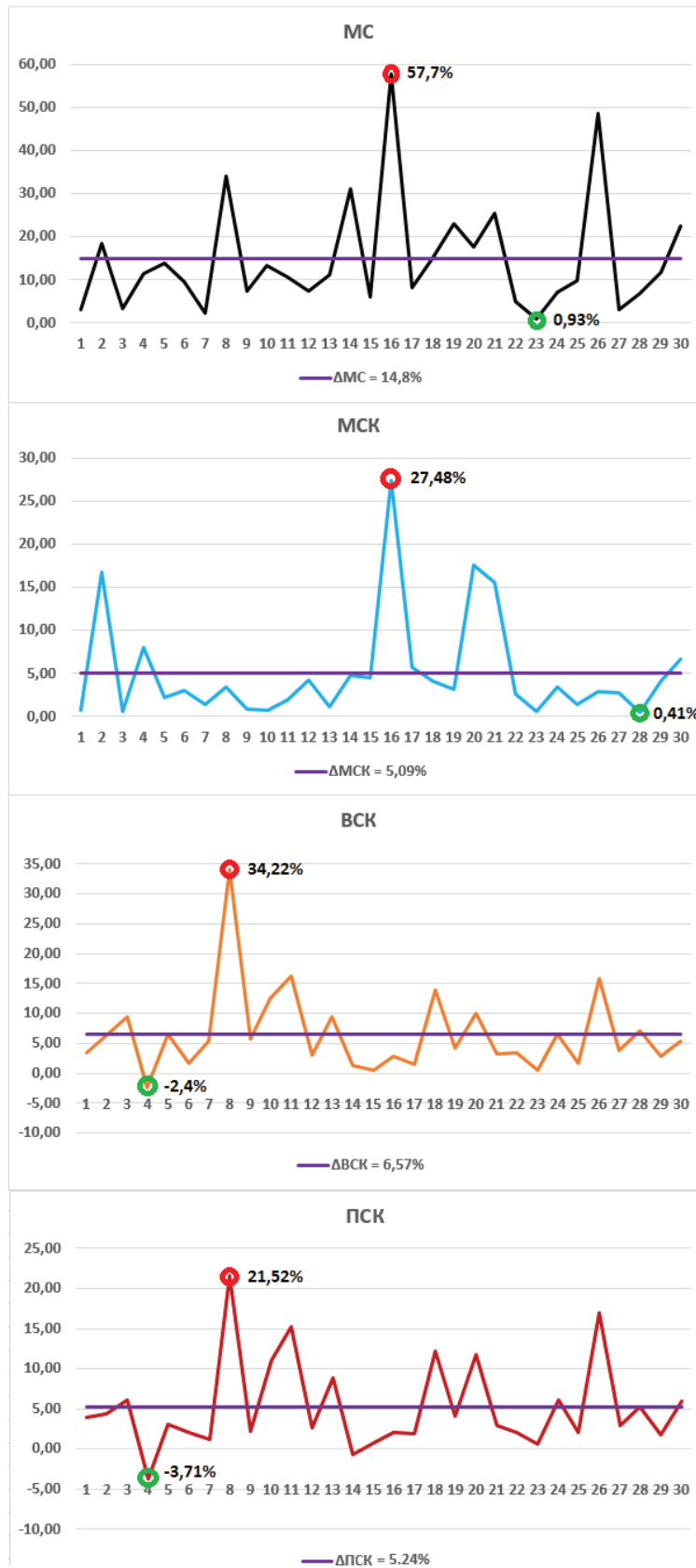


Рис. 5. Графики с результатами эксперимента

Литература

1. *Ежова К. В.* Моделирование и обработка изображений. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. 93 с.
2. *Sharma G.* (Ed.). Digital Color Imaging Handbook. The Electrical Engineering and Applied Signal Processing Series. NYC: CRC Press, 2003. 764 p.
3. *Шапуро Л., Стокман Дж.* Компьютерное зрение: пер. с англ. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2013. 752 с.
4. *Emre C.* Improving the Performance of K-Means for Color Quantization // Image and Vision Computing. 2011. Vol. 29. Pp. 260–271.
5. *Burger W., Burge M.* Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction Using Java. Series: Texts in Computer Science. London: Springer, 2016. 811 p.
6. *Yue X.D., Miao D.Q., Cao L.B., Wu Q., Chen Y.F.* An efficient color quantization based on generic roughness measure // Pattern Recognition. 2014. Vol. 47. Pp. 1777–1789.
7. *Hu Y.-C., Chen W.-L., LO C.-C., Chuang J.-C.* Improved vector quantization scheme for grayscale image compression // Opto-Electronics Review. 2012. Vol. 20. Pp. 7–193.
8. *Ramirez E., Jimenez O., Perez A., Pogrebnyak O.* Grayscale Image Segmentation Based on Associative Memories // Computations in Systems. 2011. Vol. 15. Pp. 149–162.
9. *Харинов М. В.* Обобщение трех подходов к оптимальной сегментации цифрового изображения // Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 25. С. 294–316.
10. *Kharinov M.* Reclassification formula that provides to surpass K-means method // Computer Vision and Pattern Recognition. 2012. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1209/1209.6204.pdf> (дата обращения: 15.07.2018).
11. *Деревянкина А. А.* Автоматизация исследования изображений методом s-аппроксимации // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ): Сборник трудов XXIII Международной научной конференции (Саратов, 22–25 июня 2010 г.): в 12 т. Т. 6. Секции 6,7/ под общ. ред. В. С. Балакирева. Саратов: СГТУ, 2010. С. 37–43.
12. *Kanan C., Cottrell G.* Color-to-Grayscale: Does the Method Matter in Image Recognition // PLoS One. 2012. Vol. 7. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029740> (дата обращения: 27.07.2018).
13. *Neydorf R.A., Aghajanyan A. G., Vucinic D.* Monochrome Multitone Image Approximation on Lowered Dimension Palette with Sub-optimization Method based on Genetic Algorithm // Improved Performance of Materials. Springer International Publishing, 2016. Pp. 143–154.
14. *Neydorf R.A., Aghajanyan A. G., Vucinic D.* Monochrome multitone image approximation with low-dimensional palette // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Yerevan, Armenia, 2016. Pp. 1–4. doi:10.1109/EWDTS.2016.7807743
15. *Нейдорф Р. А., Агаджанян А. Г.* Исследование аспектов возможного применения субоптимальной тоновой аппроксимации изображений в задачах технического зрения средств автономной навигации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 1–2 (186–187). С. 133–145.
16. *Нейдорф Р. А., Агаджанян А. Г., Нейдорф А. Р.* Оптимизация результатов аппроксимации растровых изображений и оценка их экстремальности // Математические Методы в Технике и Технологиях- ММТТ: Сборник трудов Международной научной конференции. 2017. Т. 1. С. 19–26.
17. *Neydorf R.A., Aghajanyan A. G., Vucinic D.* A high-speed hybrid algorithm of monochrome multitone images approximation // 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Novi Sad, Serbia, 2017. Pp. 1–4. doi:10.1109/EWDTS.2017.8110160
18. *Neydorf R.A., Aghajanyan A. G., Vucinic D.* Improved Bi-optimal Hybrid Approximation Algorithm for Monochrome Multitone Image Processing // ADVCOMP 2017, The Eleventh International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences. IARIA. 2017. Pp. 20–25.
19. *Heckbert P.* Color image quantization for frame buffer display // SIGGRAPH'82 Proceedings of the 9th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. Boston: ACM. 1982. Pp. 297–307.
20. *Lloyd S.* Least square quantization in PCM's // Bell Telephone Laboratories Paper. 1982. Pp. 129–137.
21. *Jain A. K.* Data clustering: 50 years beyond K-means // Pattern Recognition Letters. 2010. Vol. 31(8). Pp. 651–666.



AN INVESTIGATION COMPARING THE HYBRID ALGORITHM OF OPTIMAL TONE APPROXIMATION OF MONOCHROME IMAGES

RUDOLF A. NEYDORF,

Rostov-on-Don, Russia, ran_pro@mail.ru

ALBERT G. AGHAJANYAN,

Rostov-on-Don, Russia, foralbert92@gmail.com

KEYWORDS: tone approximation; monochrome images; hybrid algorithm; optimization; evolutionary-genetic algorithm; *k*-means.

ABSTRACT

The paper consider investigation of the effectiveness of new hybrid algorithm of optimal tone approximation for monochrome multitone images compared to commonly used algorithms. Such algorithms replacing the initial tones of image, which displayed by original palette with some number of tones, on tones from approximating palette that contain less number of tones, but most significant for image displaying. The hybrid model of optimization consist in combination of heuristic evolutionary-genetic algorithm of tone approximation suboptimization for monochrome images and deterministic algorithm that provides extreme result for the same problem. For estimation the quality of approximation a non-standard criterion of the total module of deviations is used, whose effectiveness compared to traditional square deviation shown in previous investigations. The main goal of evolutionary-genetic algorithm in hybrid model is finding the area of searching optimum according to applied criterion and maximization of reduction that area. Hitting to area of approximating palette structures that are near to optimal, allow to reduce the path of extreme searching for deterministic algorithm, which processing time is much higher, because of using modified, but still brute-force algorithm. For comparison experiments two most common algorithms for tone approximation is used: median cut algorithm and *k*-means algorithm. The comparison was made based on set of different images. The investigation demonstrated significant advantage of hybrid algorithm against alternative methods and showed increase of approximation quality from 5% to 15%. In addition, different approaches to define the starting position of *k*-means algorithm were investigated for considered application field, which gives perspectives to make deeper comparative investigations of hybrid algorithm and opportunities to develop new models for tone approximation.

REFERENCES

1. Ejova E.V. *Modelirovanie i obrabotka izobrazheni. Uchebnoe posobie* [Modeling and image processing]. St. Petesburg: NIU ITMO, 2011. 93 p. (In Russia)
2. Sharma G. (Ed.). *Digital Color Imaging Handbook. The Electrical*

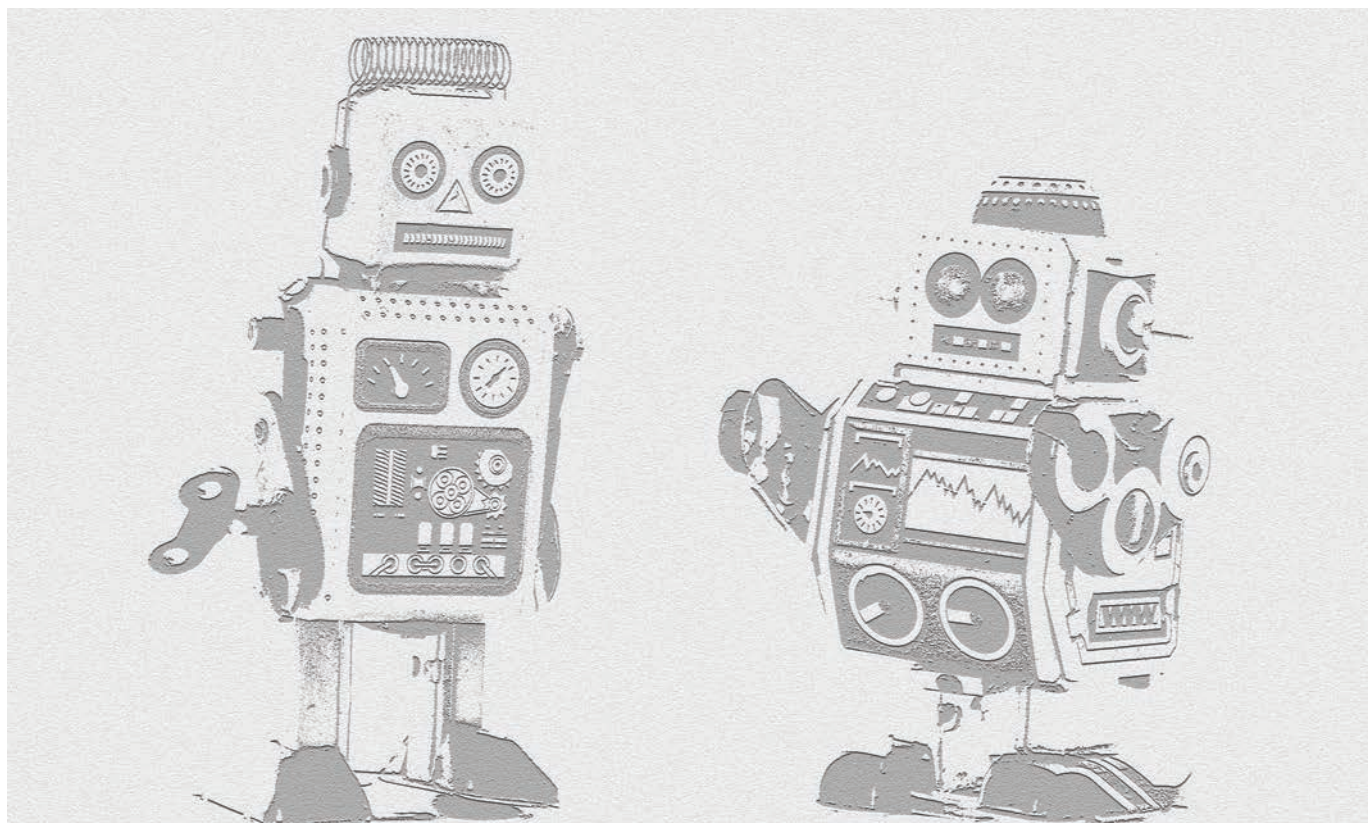
- Engineering and Applied Signal Processing Series*. NYC: CRC Press, 2003. 764 p.
3. Shapiro L.G., Stockman G.C. *Computer vision*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001. 609 p.
4. Emre C. Improving the Performance of K-Means for Color Quantization. *Image and Vision Computing*. 2011. Vol. 29. Pp. 260-271.
5. Burger W., Burge M. *Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction Using Java. Series: Texts in Computer Science*. London: Springer, 2016. 811 p.
6. Yue X.D., Miao D.Q., Cao L.B., Wu Q., Chen Y.F. An efficient color quantization based on generic roughness measure. *Pattern Recognition*. 2014. Vol. 47. Pp. 1777-1789.
7. Hu Y.-C., Chen W.-L., LO C.-C., Chuang J.-C. Improved vector quantization scheme for grayscale image compression. *Opto-Electronics Review*. 2012. Vol. 20. Pp. 187-193.
8. Ramirez E., Jimenez O., Perez A., Pogrebnyak O. Grayscale Image Segmentation Based on Associative Memories. *Computations in Systems*. 2011. Vol. 15. Pp. 149-162.
9. Kharinov M.V. Obobshenie trex podxodov k optimalnoy segegmentatsii cifrovix izobrazheni. *Proceedings of SPIIRAN*. 2013. Vol. 25. Pp. 294-316. (In Russia)
10. Kharinov M. Reclassification formula that provides to surpass K-means method. *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2012. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1209/1209.6204.pdf> (access date: 15.07.2018).
11. Derevyankina A.A. Avtomatizatsia issledovaniya izobrazheni metodom s-approximatsii [Automation of image research by s-approximation method]. *Cbornik trudov XXIII Mezhdunarodnoy nauchoy konferentsii (Saratov, 25 iyun'2010): v 12 t. T. 6. Sektsii 6,7* [Mathematical methods in engineering and technology (MTT) proceedings of the XXIII International scientific conference (Saratov, 25 June 2010): in 12 vol. Vol. 6. Sections 6,7]. Saratov: SGTU, 2010. Pp. 37-43. (In Russia)
12. Kanan C., Cottrell G. Color-to-Grayscale: Does the Method Matter in Image Recognition. *PLoS One*. 2012 Vol. 7. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029740> (date of access: 27.07.2018).

13. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G., Vucinic D. Monochrome Multitone Image Approximation on Lowered Dimension Palette with Sub-optimization Method based on Genetic Algorithm. *Improved Performance of Materials*. Springer International Publishing: 2016. Pp. 144-154.
14. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G., Vucinic D. Monochrome multi-tone image approximation with low-dimensional palette. *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Yerevan, Armenia, 2016. Pp. 1-4. doi:10.1109/EWDTS.2016.7807743
15. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G. The research of the application possibilities of tones approximation in a technical vision for the autonomous navigation objects. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2017. No. 1-2 (186-187). Pp. 133-145. (In Russia)
16. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G., Neydorf A.R. Optimizatsia rezultatov approximationsi rastrovix izobrazeniy i otsenka ix ekstremalnosti [Optimization of results of approximation of raster images and assessment of their extremeness] *Cbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchoy konferentsii "Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT"* [Mathematical methods in engineering and technology (MTT): Proceedings of the International scientific conference]. St: Petersburg: Saint-Petersburg of Polytechnic University Publ., 2017. Vol. 1. Pp. 19-26. (In Russia)
17. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G., Vucinic D. A high-speed hybrid algorithm of monochrome multitone images approximation. *2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Novi Sad, Serbia, 2017. Pp. 1-4. doi:10.1109/EWDTS.2017.8110160
18. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G., Vucinic D. Improved Bi-optimal Hybrid Approximation Algorithm for Monochrome Multitone Image Processing. *ADVCOMP 2017, The Eleventh International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences*. IARIA. 2017. Pp. 20-25.
19. Heckbert P. Color image quantization for frame buffer display. *SIGGRAPH'82 Proceedings of the 9th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Boston: ACM. 1982. Pp. 297-307.
20. Lloyd S. Least square quantization in PCM's. *Bell Telephone Laboratories Paper*. 1982. Pp. 129-137.
21. Jain A.K. Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*. 2010. Vol. 31(8). Pp. 651-666.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Neydorf R.A., PhD, Full Professor, Professor of Don State Technical University "Software engineering and automatized systems" department; Aghajanyan A.G., PhD, student of Don State Technical University.

For citation: Neydorf R.A., Aghajanyan A.G. An investigation comparing the hybrid algorithm of optimal tone approximation of monochrome images. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 5. Pp. 64-74. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10167 (In Russian)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10168

ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ АПРИОРНОЙ ИСТИННОСТИ ИНФОРМАЦИИ

НОВИКОВ

Владимир Александрович¹

ДЕМИХОВ

Евгений Николаевич²

АННОТАЦИЯ

В настоящее время лица, принимающие решения, вынуждены обрабатывать большой объем информации за ограниченное время и, как правило, время на анализ информации не остается. И, хотя, с результатами анализа информации связаны серьезные организационные последствия, однако при принятии решения должностное лицо должно исходить только из информации, которой он располагает, и не допускать тенденциозности под давлением ответственности. Итогом аналитической деятельности является принятие информационного решения. Основным элементом этого решения является отделение правильной информации от неправильной, а также разумное обобщение и устранение лишних деталей. Никакое решение не может увеличить количество деталей. Оценка информации должна проводиться непрерывно, так как одна и та же информация в разные промежутки времени, в разных задачах и условиях принятия решения может оцениваться различно. Информационное решение принимается на основе информационного обеспечения лица принимающего решение и восприятия им этой информации. Рассмотрены возможные варианты результата процесса информирования должностных лиц органа управления, раскрыты подходы по анализу информации, заключающиеся в оценке характеристик точности и достоверности источника информации, канала связи и их взаимного влияния, а также в разбитии любого сообщения на элементы, для каждого из которых следует принять двухальтернативное решение, характеризующее его истинность или ложность. В свою очередь, многоальтернативное решение можно представить множеством взаимосвязанных двухальтернативных решений, в комплексе характеризующих информационную модель с точки зрения ее соответствия истинной обстановке. Преобразование многоальтернативных решений в минимально возможное количество независимых двухальтернативных является частью общей методики подготовки информационных решений.

Сведения об авторах:

¹д.в.н., профессор, профессор кафедры оперативного искусства и тактики Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, kadet78-80@mail.ru,

²адъюнкт кафедры оперативного искусства первой и тактики Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, dmhvz@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: анализ информации; селекция данных; информационное решение; достоверность информации.

Введение

Одним из значимых этапов управления организационно-техническими системами специального назначения является анализ полученной информации лицами, принимающими решение. Основным элементом, на основе которого осуществляется аналитическая деятельность, является информационная модель обстановки, формируемая в результате ее мониторинга. Информационная модель — это модель объекта, представленная в виде информации, описывающей существенные для данного рассмотрения параметры и переменные величины объекта, связи между ними, входы и выходы объекта и позволяющая путем подачи на модель информации об изменениях входных величин моделировать возможные состояния объекта. Итоговым актом аналитической деятельности является принятие информационного решения, представляющего собой единичный акт восприятия должностным лицом органа управления текущей информации об обстановке и классификации ее на предмет отнесения к какому-либо сведению информационного кадастра. То есть должностное лицо совершает акт деятельности по выбору и утверждению оптимального (рационального) варианта решения. Основным элементом этого решения является селекция истинных данных, то есть данных, соответствующих условиям реальной обстановки.

В зависимости от количества информации модель обстановки может характеризоваться большей или меньшей степенью детализации, однако абсолютным отражением ситуации она быть не может, поскольку модель обстановки, по своему определению, предусматривает упрощение. Существенным моментом здесь является соответствие степени детализации модели характеру задачи, решаемой системой управления.

Таким образом, принятие искомого решения предусматривает отделение достоверных сведений от дезинформации, а также разумное обобщение данных об обстановке.

Предложения по анализу информации

Характеризуя результативность информационного обеспечения управления через эффективность реализации процессов информирования органа управления и восприятия органом управления, необходимо обозначить возможные варианты сочетания априорной истинности информации, целевых установок источников информации на представление истинных или ложных данных и суждений органа управления об истинности информации при ее восприятии.

В процессе информирования должностных лиц органа управления, под которым принято понимать передачу от источников определенной информации об обстановке, возможны следующие варианты [7]:

– правильное информирование — передача должностным лицам органа управления неискаженной информации об истинной обстановке;

– правильное дезинформирование — передача должностным лицам органа управления неискаженной информации о ложной обстановке;

– трансинформирование — передача должностным лицам органа управления информации об истинной обстановке, трансформированной в информацию о ложной обстановке;

– трансдезинформирование — передача должностным лицам органа управления трансдезинформации, то есть информации о ложной обстановке, трансформированной в информацию об истинной обстановке.

Дезинформирование в свою очередь подразделяется на следующие виды:

Симуляционное дезинформирование. Например: ложное обнаружение или опознание объекта обзорно-поисковой системой из-за несовершенства ее действий, ошибочное срабатывание регуляторов, предохранителей, отдельных блоков и т.п. в технических системах. Симуляционное дезинформирование применяется в целях пропаганды, когда сообщается о несуществующих событиях («газетное или радио — утки»), а также имеет широкое распространение в искусстве и литературе.

Диссимуляционное дезинформирование. Нашло широкое применение в целях пропаганды в связи с развитием средств массовой информации, которые, с одной стороны, позволяют быстро доводить определенные факты сразу до большого числа людей, а с другой стороны, не позволяют отдельному человеку по своему желанию оперативно получить полную картину событий.

Конфузионное дезинформирование. Также используется в целях пропаганды и рекламы, при этом, одни факты сообщаются, другие — умалчиваются, а третьи «факты» выдуманы.

Необходимо учитывать возможность возникновения ситуации, при которой информирование отсутствует, как правило, вследствие блокирования или критического запоздывания информации.

В процессе восприятия информации у должностных лиц органа управления формируются представления об обстановке, которое является ключевым элементом процесса выработки и принятия информационного решения. Процесс восприятия однозначно предполагает необходимость оценки информационного решения посредством определения значений параметров, характеризующих его достоверность и уровень обобщения. Наиболее существенными характеристиками при этом являются отличительные признаки истинных и ложных элементов информационной модели обстановки, которые являются основанием для возникновения различных ситуаций

в процессе дальнейшего использования информации при выработке и принятии решения. Количество таких ситуаций будет зависеть от степени соответствия априорной и текущей информации, отображаемой информационной моделью обстановки.

При этом необходимо отметить важное свойство информационных решений, заключающееся в том, что всякое решение представляет собой акт обобщения информации и не может увеличить количество деталей.

По функциональному предназначению могут быть информационные решения о:

- реальной обстановке;
- наличии информации у противоборствующей стороны;
- намерениях противоборствующей стороны.

Специфика каждого типа решения обуславливает необходимость определения достаточного количества источников информации и применения различных методов анализа информации.

Наука и практика выработали различные методические подходы к анализу информации, важнейшие из них следующие: системный анализ; экономический анализ; метод декомпозиции; метод последовательной подстановки; метод сравнений; метод структуризации целей; динамический метод; экспертно-аналитический метод; параметрический метод; нормативный метод и другие.

Метод декомпозиции позволяет расчленить сложные явления на более простые [9]. Например, декомпозиция расчленяет систему управления на подсистемы, функции, процедуры, операции, далее осуществляется исследование, однако затем необходимо синтезировать элементы в единое целое. При этом используется декомпозиционное моделирование, модели могут быть логическими, графическими, цифровыми.

Метод сравнения позволяет сравнить существующую информацию с подобной в прошлом периоде. Важное условие сопоставимости и однородности.

Динамический метод предусматривает расположение данных в динамическом ряду и исключение из него случайных отклонений. В этом случае ряд позволяет выявить устойчивые тенденции. Используется при исследовании количественных показателей. Например, при исследовании кадрового потенциала в аппарате управления.

Метод структуризации целей предусматривает количественное и качественное обоснование целей организации в целом, целей системы управления, целей подсистем с точки зрения их соответствия целям организации. Анализ целей осуществляется на основе построения дерева целей, то есть формирования иерархической структуры целей, установление системы ответственности подразделений за конечные результаты работы, устранение дублирования в работе.

Параметрический метод — задачей метода является установление зависимостей между элементами производственной системы и системой управления с целью выявления степени их соответствия. С точки зрения кибернетики параметры системы — это количественные характеристики свойств среды, существенные для функционирования системы. В общем случае каждому набору значений параметров соответствует определенная траектория или множество траекторий системы, или, как еще называют, поле поведения. Эффективным параметром системы принято называть такой параметр, изменение которого ведет к изменению поля поведения системы. Значения параметров системы оказывают влияние на устойчивость системы. Система устойчива при одном значении, при другом может стать неустойчивой. Анализ устойчивости системы фактически является анализом соотношений между ее параметрами.

Из вышеизложенного можно сформулировать подход по анализу информации, которое заключается в том, что важной составной частью предварительного анализа сообщения является оценка характеристик точности и достоверности источника информации, канала связи и их взаимного влияния.

Свойства источника информации характеризуются с помощью следующих показателей качества:

- актуальность источника информации;
- область или зона действия источника;
- полнота отображения обстановки;
- точность и степень детализации;
- достоверность отображения обстановки;
- ценность источника информации.

Под актуальностью источника информации понимается его значимость, важность, насущность в настоящий момент времени.

Область или зона действия источника определяет зону действия, в которой информация может быть ограничена по пространству, времени и составу признаков.

Полнота отображения обстановки определяет способность источника информации обнаружить и отобразить все объекты, признаки и свойства, находящиеся в зоне действия.

Точность и степень детализации отображения определяется на основании некоторой заранее введенной шкалы, которая может быть пространственной, временной, специальной (со шкалой признаков значимых для управления ситуацией) и т.д. Точность — это степень близости информации к реальному состоянию вещей, явлений, процессов, объектов. Чем точнее информация, тем она важнее для лица принимающего решения. Также с понятием точности информации связано понятие о ее полноте. Информация считается полной, если ее количество достаточно для правильного осмысливания и понимания, для

верного принятия решений. Неполная информация способна привести к ошибочному пониманию и к неправильным выводам.

Под достоверностью данных понимается их безошибочность, которая измеряется вероятностью появления ошибок в данных. По другому достоверность можно определить как правдивость и истинность. Объективная информация всегда будет достоверной, но достоверная не всегда будет объективной, она может носить и субъективный характер. Недостоверной информация становится в том случае, когда ее смысл искажен по разным причинам: преднамеренно или непреднамеренно, из-за недостаточной точности, вследствие воздействия помех.

Ценность источника информации — это его полезность, насколько хорошо информация полученного с данного источника удовлетворяет потребностям лица принимающего решение.

Показатели качества источников информации имеют большое значение в процессе отождествления при формировании обобщенной информационной модели обстановки от большого количества различны по своим характеристикам источников [4].

Помимо показателей качества источников информации необходимо учитывать влияние средств связи. С целью формирования качественной информационной модели обстановки каналы связи характеризуются пропускной способностью и вероятностью искажения информации. В основном искажения информации имеют технический или смысловой характер. Технические искажения приводят к снижению полноты и точности отображения информации, а смысловые — к снижению достоверности. Смысловые искажения наиболее опасны. При использовании технических средств выше вероятность возникновения технических искажений, а при передаче сообщения людьми — вероятность возникновения смысловых искажений. В качестве результата каждому сообщению должна быть поставлена степень его достоверности.

Для принятия информационного решения по завершении процесса анализа информации важно знать его логическую структуру [11,14]. По своей природе оно является многоальтернативным, то есть требующий от лица принимающего решение сделать выбор из некоторого числа возможных вариантов действий. Поэтому можно сформулировать второй подход к анализу информации, который облегчит процесс анализа любого сообщения путем разбития его на элементы, для каждого из которых следует принять двухальтернативное решение, характеризующее его истинность (ложность). Затем необходимо ввести критерии по тем или иным ограничениям или желательным характеристикам, а последнее ранжировать по их относительной ценности. Список критериев необходимо преобразовать в абсолют-

ную шкалу измерения, что позволит каждую альтернативу оценивать саму по себе. Многоальтернативные решения предлагают несколько равноправных способов действия, ведущих к заданному результату. Поэтому приходится формулировать систему технических, экономических, социальных и иных критериев, позволяющих сделать выбор.

Таким образом, многоальтернативное решение можно представить множеством взаимосвязанных двухальтернативных решений, в комплексе характеризующих информационную модель с точки зрения ее соответствия истинной обстановке. Преобразование многоальтернативных решений в минимально возможное количество независимых двухальтернативных является частью общей методики подготовки информационных решений.

Заключение

При формировании окончательного решения большое значение необходимо придавать полноте и цельности информации. И, хотя, как правило, с результатами анализа информации связаны серьезные организационные последствия, однако при принятии решения должностное лицо должно исходить из информации, которой оно располагает, и не допускать тенденциозности под давлением ответственности.

Литература

1. Афанасьев С.В., Яреценко В.Н. Эффективность информационного обеспечения управления. М.: Экономика, 2007. 217 с.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972. 552 с.
3. Воробьев И.Н. Тактика — искусство управления // Военная мысль. 2003. № 1. С. 29–36.
4. Голинцев Э.П., Клименко И.В. Информационное обеспечение систем управления. М.: Феникс, 2016. 320 с.
5. Гурин Л.С., Дымарский Я.С., Меркулов А.Д. Задачи и методы оптимального распределения ресурсов. М.: Сов. радио, 1968. 464 с.
6. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Идея, алгоритм, решение (Принятие решений и автоматизация). М.: Воениздат, 1972. 328 с.
7. Запечников С.В., Милославская Н.Г., Толстой А.И., Ушаков Д.В. Информационная безопасность открытых систем. В 2-х т. Т. 2 Средства защиты в сетях. М.: ГЛТ, 2008. 558 с.
8. Кабаков В.С., Порховник Ю.М., Зубов И.П. Менеджмент: проблемы-программа-решение. Л.: Лениздат, 2009. 275 с.
9. Казиев В.М. Введение в анализ, синтез и моделирование систем. М.: Интернет-университет информационных технологий. 2006. 20 с.

10. *Казиев В. М.* Информация: понятия, виды, получение, измерение и проблема обучения // Информатика и образование. 2000. № 4. С. 12–22.

11. *Ларичев О. И.* Наука и искусство принятия решений. М.: Наука, 1979. 197 с.

12. *Ларичев О. И.* Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах. М.: Логос, 2000. 294 с.

13. *Малюк А. А.* Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации. М.: ГИИТ, 2004. 280 с.

14. *Трофимова Л. А., Трофимов В. В.* Управленческие решения (Методы принятия и реализации). СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2011. 190 с.

15. *Мамиконов А. Г.* Принятие решений и информация. М.: Наука, 1983. 184 с.

APPROACH TO SUBSTANTIATION OF MANAGEMENT DECISIONS BASED ON A PRIORI TRUTH OF INFORMATION

VLADIMIR A. NOVIKOV,

St-Peterburg, Russia, kadet78-80@mail.ru

EVGENIY N. DEMIKHOV

St-Peterburg, Russia, dmhvz@mail.ru

KEYWORDS: information analysis; selection of data; an information solution; the accuracy of the information.

ABSTRACT

Currently, decision makers have to process a large amount of information for a limited time and usually the time analyzing the information remains. Although the results of the analysis of the information associated serious organizational consequences, however, when deciding officer should only come from the information which it holds and to prevent bias under the pressure of responsibility. The result of the analytical work is the adoption of information solutions. The main element of this solution is to separate the correct information from wrong as well as a reasonable generalization, and the elimination of unnecessary details. No no decision may increase the number of parts. Assessment information should be carried out continuously, as one and the same information in different time intervals in different tasks and conditions, the decision can be evaluated differently. Information the decision is based on information support of decision makers and the perception of this information. The article considers possible variants of the result of the process of informing officials of the governing body, revealed approaches for data analysis, evaluating characteristics of the accuracy and reliability of information source, communication channel and their mutual influence, as well as in the development of any of the message elements, each of which

should take two alternative solution, characterizing its truth or falsity. And, in turn, multialternative decision to present complex solutions, two alternative interrelated with many characterizing the information model from the point of view of its correspondence to the true situation. Conversion of a multialternative solutions in the minimum possible number of independent two alternatives is part of the General preparation techniques information solutions.

REFERENCES

1. Afanasief S.V., Yareshenko V.N. *Effectivnost informatsionnogo obespechenie upravleniya* [The efficiency of information management]. Moscow: Economy, 2007. 217 p. (In Russian)
2. Venttsel E.S. *Issledovanie operatsiy* [Operations research]. Moscow: Soviet Radio, 1972. 552 p. (In Russian)
3. Vorobev I.N. *Taktika – iskusstvo upravleniy* [Tactics is the art of management]. *Voennaya mysl'* [Military thought]. 2003. No.1. Pp. 29-36. (In Russian)
4. Golinishchev E.P., Klimenko I.V. *Informatsionnoe obespechenie sistem upravleniya* [Information support of control systems]. Moscow: Phoenix, 2016. 320 p. (In Russian)

5. Gurin L.S., Dymarskii Y.S., Merkulov A.D. *Zadachi i metody optimal'nogo raspredeleniya resursov* [Problems and methods of optimal allocation of resources]. Moscow: Soviet Radio, 1968. 464 p. (In Russian)
6. Druzhinin V.V., Kontorov D.S. *Ideya, algoritm, resheniya (Prinyatie resheniy i avtomatizatsiya)* [The idea, algorithm, solution (Decision making and automation)]. Moscow: Military issue, 1972. 328 p. (In Russian)
7. Zapechnikov S.V., Miloslavskaya N.G., Tolstoy A.I., Ushakov D.V. *Informatsionnaya bezopasnost otkrytykh sistem* [Information security of open systems]. In 2 books. Moscow: Hotline Telekom, 2008. 558 p. (In Russian)
8. Kabakov V.S., Porhovnik Y.M., Zubov I.P. *Menedzhment: problem-programma-reshenie* [Management: problems-program-solution]. Leningrad: Lenizdat, 2009. 275 p. (In Russian)
9. Kaziev V.M. *Vvedenie v analiz, sintez i modelirovanie sistem* [Introduction to the analysis, synthesis and modeling of systems]. Moscow: Internet University information technology, 2006, 20 p. (In Russian)
10. Kaziev V.M. *Informatsiya: ponyatiya, vidy, polucheniya, izmerenie i problema obucheniya* [Information: concept, types, acquisition, measurement and problem of learning]. *Informatika i obrazovanie* [Computer science and education]. 2000. No. 4. Pp. 12-22. (In Russian)
11. Larichev O.I. *Nauka i iskusstvo prinyatiya resheniy* [Science and the art of decision making]. Moscow: Science, 1979. 197 p. (In Russian).
12. Larichev O.I. *Teoriya i metody prinyatiya resheniy, a tazhe Khronika sobytij v Volshebnykh stranakh* [Theory and methods of decision-making, as well as a chronicle of events a fairyland]. Moscow: Logo. 2000. 294 p. (In Russian)
13. Malyuk A.A. (Ed.) *Informacionnaya bezopasnost: konceptualnie i metodologicheskie osnovy zashity informacii* [Information security: conceptual and methodological foundations of information security]. Moscow: Hotline Telekom, 2004. 280 p. (In Russian)
14. Trofimova L.A., Trofimov V.V. *Upravlencheskie resheniya (Metody prinyatiya i realizatsii)*. Saint-Petersburg: St. Petersburg state University of Economics and Finance Publ., 2011. 190 p. (In Russian)
15. Mamikonov A.G. *Prinyatie reshenij i informaciya* [Decision making and information]. Moscow: Science, 2008. 184 p. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Novikov V.A., doctor of military sciences, full professor, professor at the Department of Operational art and tactics of the Military Space Academy;

Demikhov E.N. adjunct of the Department of Operational art and tactics of the Military Space Academy.

For citation: Novikov V.A., Demikhov E.N. Approach to substantiation of management decisions based on a priori truth of information. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 5. Pp. 75-80. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10168 (In Russian)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10169

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКИХ ПРОГРАММ ПОТОКОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

ШМЕЛЕВ

Валентин Валерьевич¹

КАРГИН

Виктор Александрович²

ПОПОВ

Дмитрий Вячеславович³

АННОТАЦИЯ

Рассматривается задача мониторинга состояния технической системы в условиях воздействия возмущающих факторов. Представлена математическая постановка задачи. Для семантического описания решения задачи предложена концептуальная модель специального языка высокого уровня. Назначение разрабатываемого языка – описание («программирование») вычислительных процессов обработки технической и технологической информации в предметной области. Модель на основе привлекаемых разделов теорий вычислений, моделирования систем, идентификации и технической диагностики доказывает существование, единство и устойчивость решения поставленной задачи. Для этого, соответственно, изложены три концепции. Первая концепция – концепция полимодельного комплекса мониторинга состояния процессов функционирования технической системы на основе сетей Петри и G-сетей с предикативно-операторным расширением. Вторая концепция – концепция метода синтеза функционально-логических программ потоковых вычислений с верификацией корректности компенсации возмущений. Третья концепция – концепция организации потоковых вычислений с использованием модификаций цветных сетей Петри на основе интерпретации этапов функционального диагностирования состояния технической системы. Объединяющим концепции понятием является понятие интеллектуальной системы, включающей подсистему представления данных и знаний о контролируемой технической системе и подсистему манипуляции ими. Новизной материала является объединение в единых теоретических положениях синтеза программ потоковых вычислений, процедур их формальной верификации и поиска ошибок на основе интерпретации свойств сетей Петри и G-сетей. Практическая значимость и актуальность интеллектуального мониторинга заключаются в учете различных факторов, искажающих процесс мониторинга состояния технической системы. Предлагаются меры по компенсации факторов технической сложности контролируемых процессов в технической системе, структурной, вычислительной, временной, логической сложности мониторинга состояния системы, доверительной сложности исходной информации и структурной и параметрической динамики экземпляров контролируемых процессов. Направлением применения представленной концепции является проектирование схем вычислительных процессов, связанных с обработкой больших данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теория вычислений; функционально-логическое программирование; потоковые вычисления; обработка измерительной информации; мониторинг состояния.

Сведения об авторах:

¹к.т.н., заместитель начальника кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, valja1978@yandex.ru

²к.т.н., доцент кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, vic_kargin@mail.ru

³начальник учебной лаборатории кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, 707dim707@gmail.com

Для цитирования: Шмелёв В.В., Каргин В.А., Попов Д.В. Концептуальная модель интеллектуального мониторинга технических систем на основе функционально-логических программ потоковых вычислений // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2018.Т. 10. № 5. С. 81-88. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10169

Современное развитие информационных технологий позволяет реализовать на практике концепцию единого информационного пространства в различных, технически и организационно сложных областях деятельности, в том числе и в космической деятельности [1–2]. Единство информационного пространства является необходимым условием «сквозного», т.е. на протяжении всего жизненного цикла технической системы (ТС), автоматизированного мониторинга процессов проектирования, изготовления, испытаний, применения, а также обработки и анализа информации ТС. Основной проблемой, подлежащей решению, является отсутствие единых принципов моделирования и последующего контроля процессов целевого функционирования ТС.

Одним из решений указанной проблемы является предлагаемая информационная технология интеллектуального мониторинга. Под интеллектуальным мониторингом понимается автоматизированный синтез, контроль и корректировка моделей процессов анализа информации при производстве, испытаниях и применении технической системы в различных предметных областях [3]. При этом ставится задача по обеспечению возможности оперативного учета данных и знаний о предметной области ТС. Информационная технология — это совокупность программно-алгоритмических средств использования информации различного рода без привязки к конкретным аппаратно-техническим требованиям и особенностям.

Теоретической основой такой информационной технологии является метод интеллектуального мониторинга ТС на основе функционально-логических программ потоковых вычислений. Данный метод представляется совокупностью следующих элементов:

1. Концептуальная модель интеллектуального мониторинга состояния ТС с компенсацией возмущающих факторов на основе функционально-логических моделей вычислений.

2. Модели интеллектуального мониторинга с использованием вычислительных сетей Петри [4] и G -сетей [5] с предикативно-операторным расширением.

3. Метод синтеза функционально-логических программ потоковых вычислений на основе системы эквивалентных преобразований с верификацией корректности вычислимости.

4. Метод организации потоковых вычислений с использованием модифицированных цветных сетей Петри.

Настоящая статья посвящена подробному рассмотрению первой составляющей — концепции интеллектуального мониторинга. Предназначением данной концепции является четкое ограничение и обоснование круга научно-технических и практических задач, которые необходимо решить для создания метода интеллектуального монито-

ринга состояния ТС с использованием функционально-логических программ потоковых вычислений.

В работе вводится или доопределяется ряд понятий. Программой называется система вычислений, которая для некоторого набора исходных данных позволяет по однозначно определенной последовательности действий, выполняемых «механически» без участия человека, получить некоторый результат [6–7]. Функционально-логической программой называется программа, создаваемая в результате применения принципов функционального программирования [8] (в данном случае используется вызов единой функции с различными параметрами) с реализацией логических взаимосвязей между операторами (операциями). Под потоковыми вычислениями понимается обработка информации различного рода (измерительной, технологической), характеризующей техническую систему. Особенностью процесса обработки такой информации является необходимость обеспечения возможности параллелизма и асинхронности выполнения отдельных операций и их совокупностей, т.е. потоков [9–11].

Для математической постановки задачи интеллектуального мониторинга использован теоретико-множественный подход.

Данные для мониторинга:

1. Исходная спецификация программы мониторинга контролируемого процесса R (кратко программа R) — кортеж:

$$R = \langle S, L \rangle,$$

где $S = \{S_k \mid k = 1 \dots \text{card}(I_s)\}$ — множество операций программы R , I_s — множество номеров операций, операция программы может быть проинтерпретирована как распределенный в некотором пространстве длительности выполнения оператор;

$L = \{l_k \mid k = 1 \dots \text{card}(I_s)\}$ — множество кортежей, обуславливающих выполнение операции S_k .

2. Кортеж l_k :

$$l_k = \langle K_k, t_k, \tau_k \rangle,$$

где $K_k = \langle B_b^{(k)}(x), B_f^{(k)}(x) \rangle$ — управляющий кортеж операции S_k , состоящий из предикатов;

$B_b^{(k)}(x)$ — предикат начала выполнения операции, b — «begin»;

$B_f^{(k)}(x)$ — предикат окончания выполнения операции, f — «finite»;

$x \in X$ — аргумент $B_b^{(k)}(x)$ и $B_f^{(k)}(x)$;

$X = X_1 \cap X_2 \cap X_3$, X_1 — множество первичных результатов измерений параметров ТС, X_2 — множество вторичных (вычисляемых) характеристик ТС,

$X_3 = \{f(B_b^{(k)}), f(B_f^{(k)}) \mid k = 1 \dots \text{card}(I_s)\}$, X — множество возможных типов аргумента x ;

t_k — момент начала выполнения операции S_k ;

τ_k — длительность операции S_k . Величины t_k и τ_k могут быть представлены и с помощью предикатов: $t_k - B_b^{(k)}, \tau_k - B_f^{(k)}$.

3. Система показателей качества мониторинга состояния ТС:

$P = \{p_i \mid i = 1 \dots \text{card}(P)\}$ — частные показатели;

$P_{ir} = \{p_{ir} \mid i = 1 \dots \text{card}(P_{ir})\}$ — требуемые значения частных показателей;

$P_\Sigma = f(P)$ — единый комплексный интегральный показатель качества.

Требуется найти:

1. S — структуру формального описания унифицированной модели типовой операции (УМТО) программы потоковых вычислений, такую что:

$$\exists S(t) \rightarrow y, S(t') \rightarrow y', y \neq y' \rightarrow S(t) \neq S(t'),$$

где y и y' — текущее и последующее ее выходные параметры, $S(t)$ и $S(t')$ — текущее на момент t и последующее на момент t' состояния модели;

$$\exists u(t) : S(t) \rightarrow S(t'),$$

где $u \in U$ — вариант управлений моделью, множество вариантов управлений $U = \{\text{«Старт»}, \text{«Стоп»}, \text{«Приостановка»}, \text{«Возобновление»}, \text{«Изменение состояния операции»}\}$.

2. R' — структуру формального описания функционально-логической программы потоковых вычислений, такую что:

$$S_k \in R', k = 1 \dots \text{card}(I_s);$$

на $\{S_k \mid k = 1 \dots \text{card}(I_s)\}$ для отношений следования (O_1), независимости (O_2), несовместности (O_3) и совместности (O_4) выполняются аксиомы, определяющие наличие свойства частичного порядка:

$S_k(S_k O_j S_k)$ — свойство рефлексивности;

$S_{k_1, k_2, k_3}(S_{k_1} O_j S_{k_2}) \cap (S_{k_2} O_j S_{k_3}) \rightarrow (S_{k_1} O_j S_{k_3})$ — свойство транзитивности;

$S_{k_1, k_2}(S_{k_1} O_j S_{k_2}) \cap (S_{k_2} O_j S_{k_1}) \rightarrow (S_{k_1} = S_{k_2})$ — свойство антисимметричности, $\forall k, j = 1..4$;

3. Q — структуру формального описания технических ограничений программы или контролируемого процесса, такую что:

$$Q = \{q_k \mid k = 1 \dots \text{card}(Q)\} : q_k(t) \rightarrow q_k(t') \Rightarrow \\ \Rightarrow Q(t) \rightarrow Q(t') \Rightarrow R'(t) \rightarrow R'(t')$$

$q_k \mid k = 1 \dots \text{card}(Q)$ — нестационарная конечномерная конечная функция с дискретными значениями [7].

4. $O: R \rightarrow R'$ — оператор преобразования модели R в конструкцию R' — оператор синтеза функционально-логической программы R' , такой что:

$\mu: R' \rightarrow R - \mu$ — оператор ресинтеза R исходной спецификации по синтезированной программе R' для проверки частичной правильности программы по идентичным пред и пост условиям и проверки завершаемости программы;

$$(\exists \eta = \{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}) \cap (\eta_1 = 1) \cap (\eta_2 = 1) \cap (\eta_3 = 1),$$

где η_1 — предикат проверки непротиворечивости программы R' , η_2 — корректности и η_3 — активности.

5. $M: R' \times R' \times R' \times u \rightarrow Re$, оператор интеллектуального мониторинга с принятием решения Re о состоянии контролируемой системы, $Re = M(R'(t_0), R'(t), R'(t_{rr}), u(t))$, $R'(t_0)$ — начальное состояние, $R'(t)$ — текущее состояние, $R'(t_0)$ — требуемое состояние, $u(t)$ — управление процессом, такой что будет выполнено условие пригодности оператора M :

$$Pr(p_i \mid i = 1 \dots \text{card}(P_{ir})) = \text{«истина»},$$

где $Pr(p_i \mid i = 1 \dots \text{card}(P_{ir})) : (p_1 \geq p_{1rr} \cap \dots \cap p_{\text{card}(P)} \geq p_{\text{card}(P)rr})$.

Вследствие сложности решаемой задачи искомым оператор M может не иметь строгого формального выражения в виде функции, содержащей аргументы и значения. Он может быть представлен как совокупность действий или программа (алгоритм) потоковых вычислений по преобразованию исходных данных в искомым вид.

Концептуальная модель интеллектуального мониторинга технических систем должна включать в соответствии с определением интеллектуальной системы [12] подсистему представления данных и знаний в предметной области и подсистему манипуляции указанными данными и знаниями (рис. 1).

На верхнем уровне представлены возмущающие факторы, оказывающие влияние на весь жизненный цикл ТС, искажающие процесс мониторинга. Под искажениями процесса мониторинга понимается при этом не только фактическое искажение значений измеряемых параметров, а комплексное паразитное изменение всего процесса мониторинга: от непосредственного влияния на измерения до нарушения процесса их обработки и анализа вследствие временных ограничений на получение результата соответствующих процессов.

Блоками коричневого цвета представлены привлекаемые теории для синтеза полимодельного комплекса. Блоками серого цвета представлены подразделы соответствующих теорий, обеспечивающие формирование частных свойств искомого комплекса. В блоках синего цвета представлены свойства комплекса, которые в совокупности определяют его пригодность. Целесообразно рассмотреть подсистему представления данных и знаний

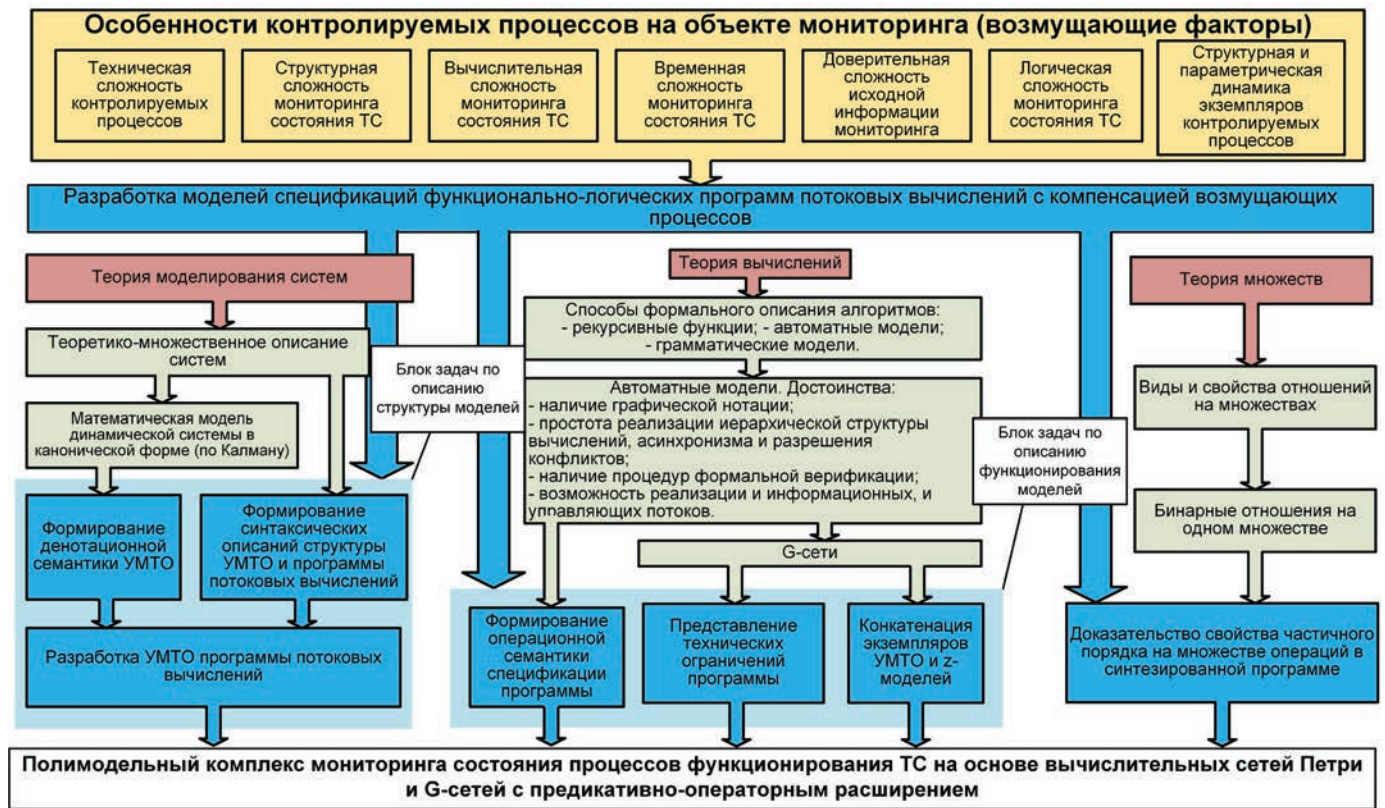


Рис. 1. Подсистема представления данных и знаний об интеллектуальном мониторинге состояния ТС

как результат решения совокупности задач по достижению соответствующих свойств подсистемы.

Теория моделирования систем предоставляет способ решения задачи описания структуры полимодельного комплекса. С этой целью привлекается теоретико-множественное описание систем для составления денотационной семантики, а также синтаксического описания структуры унифицированной модели типовой операции.

Задача описания функционирования моделей интеллектуального мониторинга решается с помощью положений теории вычислений. В качестве инструментальной и методической основы функционирования полимодельного комплекса используется способ формального описания алгоритма с помощью автоматной модели. Непосредственно используется инструмент потоковых вычислений: G-сети и цветные сети Петри.

На основе теории множеств решается задача обеспечения пригодности предлагаемого полимодельного комплекса в части выполнения свойства частичного порядка на множестве операций моделируемого процесса функционирования ТС.

Подсистема манипуляции данными и знаниями состоит из двух частей. Первая часть (рис. 2) заключается в преобразовании информации о процессах функциониро-

вания ТС в соответствии с предложенной структурой описательного полимодельного комплекса (рис. 1).

Представленная подсистема (см. рис. 2) базируется на положениях теории вычислений и теории моделирования систем. Данные теории предоставляют удовлетворительные средства решения подзадач по компенсации возмущающих факторов.

Привлекается инструмент сетей Петри с модификациями (G-сети) с целью компенсации факторов структурной и параметрической динамики экземпляров контролируемых процессов, логической и вычислительной сложности мониторинга. Привлечение положений теории вычислений по формальной верификации вычислительных алгоритмов позволяет решить задачу по компенсации факторов технической, структурной и доверительной сложности мониторинга. Снижение вычислительной сложности мониторинга является актуальной задачей во многих предметных областях, где контролируемые технические системы являются большими и сверхбольшими по объему циркулируемой в них информации.

Теория моделирования систем позволяет получить решение подзадачи формирования исходного представления информации о контролируемом процессе [13]. Оно базируется на рекурсивной модели дискретного па-

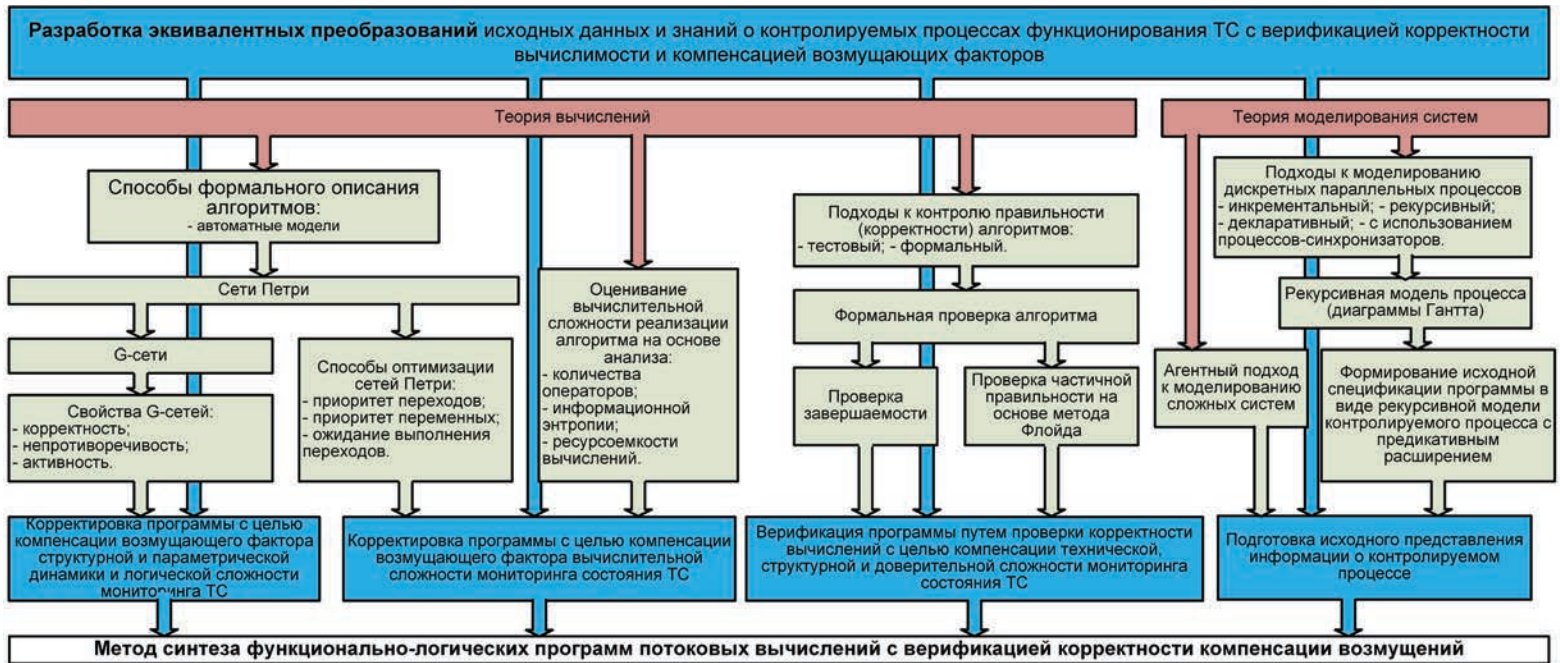


Рис. 2. Подсистема преобразования моделей

параллельного процесса [14] и является «первоначальной» спецификацией программы потоковых вычислений, по которой в дальнейшем будет верифицироваться синтезированная программа.

Таким образом, синтезируемая программа является описанием процесса мониторинга на собственном языке программирования, который можно отнести к языкам верхнего уровня.

Вторая часть подсистемы манипуляции данными и знаниями (рис. 3) и заключается в использовании преобразованной информации с целью мониторинга состояния ТС.

Подсистема манипуляции непосредственно организует мониторинг состояния ТС. Мониторинг вследствие привлекаемых при синтезе программы теорий заключается на внутреннем уровне в функционировании модифицированных цветных сетей Петри. На внешнем уровне мониторинг заключается в интерпретации этапов функционального диагностирования ТС на основе циклической совокупности операций:

1. Сопоставления свойств контролируемого процесса и его модели.
2. Контроля и интерпретации выходных переменных модели.

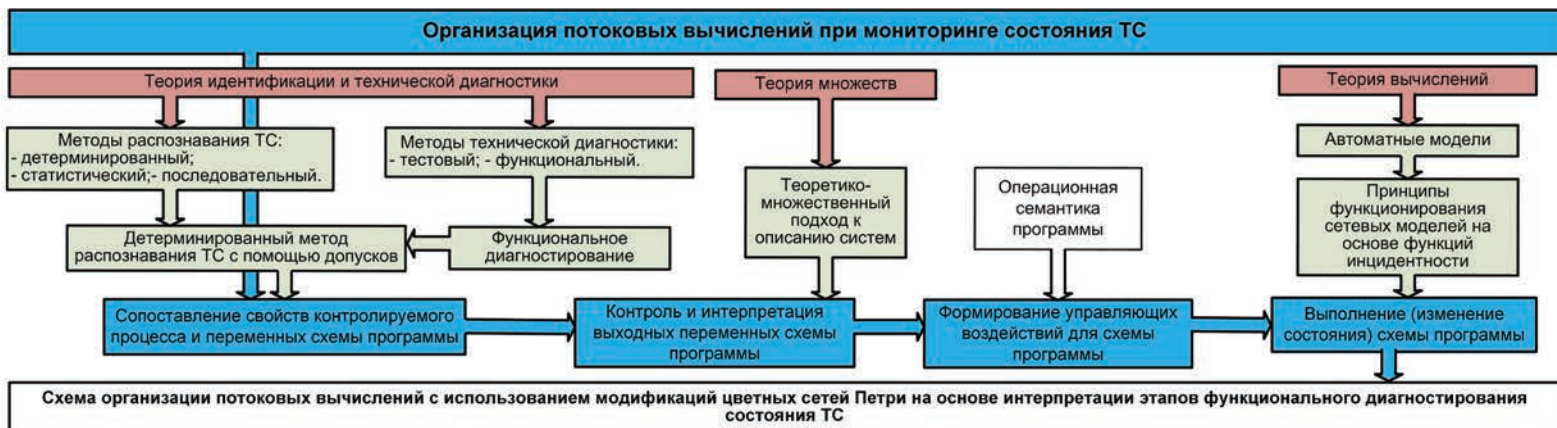


Рис. 3. Подсистема манипуляции моделями

3. Формирования управляющих воздействий для модели.

4. Выполнения (изменения) состояния модели.

Положения теории вычислений применяются в части принципов функционирования сетевых моделей, а также принципов формирования операционной семантики программы потоковых вычислений, сформулированных в подсистеме описания полимодельного комплекса.

Для практической проверки правильности привлечения подразделов теории моделирования систем в части сетей Петри и G -сетей в качестве теоретической базы интеллектуального мониторинга использована среда *CPN Tools* [15–17]. В данной системе создавались необходимые модели, которые показали удовлетворение предъявленных требований по компенсации рассматриваемых возмущающих факторов.

Таким образом, рассмотрена в полном объеме концептуальная модель интеллектуального мониторинга. Данная модель позволяет определить средства достижения глобальной цели мониторинга, а именно определение состояния контролируемой ТС, причем будут компенсированы возмущающие факторы процесса мониторинга.

Ставится и решается задача разработки концептуальной модели интеллектуального мониторинга состояния ТС на основе функционально-логических программ потоковых вычислений. Представленные программы являются языком верхнего уровня при «программировании» процессов обработки технической и технологической информации, характеризующей ТС.

Представленный материал базируется на положениях теории вычислений, моделирования систем, теории множеств. Представленная концептуальная модель языка «программирования» вычислительных процессов отличается:

- разработкой полимодельного комплекса интеллектуального мониторинга, сохраняющего на множестве операций контролируемого процесса свойство частичного порядка и охватывающего класс частично-рекурсивных функций;
- реализацией подхода функционального программирования при синтезе программы потоковых вычислений на основе модифицированных цветных сетей Петри;
- формализацией процедур поиска и устранения ошибок на основе интерпретации и проверки свойств сетей Петри и G -сетей,
- разработкой процедуры верификации синтезированной программы на основе проверки свойства ее полной (тотальной) правильности.

Практическая значимость и актуальность функционально-логических программ потоковых вычислений заключается в учете при их синтезе различных факторов, искажающих процесс мониторинга состояния ТС. Предусматриваются процедуры корректировки синтези-

рованной программы, которые компенсируют факторы логической, технологической, технической и подобные им сложности мониторинга.

Направлением применения представленного метода синтеза программ потоковых вычислений является проектирование схем вычислительных процессов, связанных с обработкой больших данных (*Big Data*) в сложных условиях. Например, предметной областью внедрения информационной технологии интеллектуального мониторинга может стать космическая деятельность, а именно мониторинг в реальном или близком к нему масштабе времени технического состояния ракетно-космической техники при выполнении ею целевых задач.

Литература

1. Ахметов Р.Н., Васильев И.Е., Капитонов В.А., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В. Концепция создания и применения перспективной АСУ подготовкой и пуском ракеты космического назначения «Союз-2»: новые подходы к интеграции, интеллектуализации, управлению // *Авиакосмическое приборостроение*. 2015. № 4. С. 3–54.
2. Концепция информатизации Роскосмоса (2010–2015 гг.). Федеральное космическое агентство. URL: <http://www.federalspace.ru/2158>.
3. Майданович О.В., Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексная автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий // *Информационные технологии*. 2011. № S10. С. 1–32.
4. Peterson J.L. Petri net theory and the modeling of systems. Englewood Cliffs. N.Y., Prentice-hall, 1981. 288 p.
5. Охтилев М.Ю. Основы теории автоматизированного анализа измерительной информации в реальном времени. Синтез системы анализа: монография. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 1999. 162 с.
6. Kalman R. E., Falb P.L., Arbib M.A. Topics in Mathematical System Theory. N.Y.: McGraw-Hill, 1969. 358 p.
7. Парийская Е.Ю. Сравнительный анализ математических моделей и подходов к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем // *Дифференциальные уравнения и процессы управления*. 1997. № 1. URL: <http://www.math.spbu.ru/diffjournal/RU/numbers/1997.1/article.1.4.html> (дата обращения: 20.07.2016).
8. Кларк Э.М., Гамбург О., Пелед Д. Верификация моделей программ: Model Checking: пер. с англ. М.: МЦНМО, 2002. 416 с.
9. Усталов Д.А. Коллективные потоковые вычисления: реляционные модели и алгоритмы // *Моделирование и анализ информационных систем*. 2016. Т. 23. № 2. С. 195–210.
10. Лацис А.О. Параллельная обработка данных. М.: Академия. 2010. 336 с.

11. *Левин В. К.* Тенденции развития суперкомпьютеров // *Computational nanotechnology*. 2014. № 1. С. 35–38.

12. *Лектауэрс А. И., Охтилев М. Ю., Потрясаев С. А., Соколов Б. В., Чуприков А. Ю., Шмелев В. В.* Анализ перспективных подходов к решению задач комплексного моделирования технологий самоуправляемых вычислений в критических приложениях // *Труды СПИИРАН*. 2013. Вып. 6(29). С. 144–169.

13. *Шмелев В. В.* Модели технологических процессов функционирования космических средств // *Авиа-космическое приборостроение*. 2015. № 4. С. 78–93.

14. *Лескин А. А., Мальцев П. А., Спиридов А. М.* Сети Петри в моделировании и управлении. Л.: Наука, 1989. 133 с.

15. *Westergaard M., Kristensen L. M.* The Access/CPN Framework: A Tool for Interacting with the CPN Tools

Simulator // *Proc. of 30th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2009)*. Lecture Notes in Computer Science 5606. Berlin: Springer-Verlag, 2009. Pp. 313–322.

16. *Jensen K., Kristensen L. M., Wells L.* Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems // *International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)*. 2007. No. 9(3–4). Pp. 213–254.

17. *Ratzer A. V., Wells L., Lassen H. M., Laursen M., Qvortrup J. F., Stissing M. S., Westergaard M., Christensen S., Jensen K.* CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets // *Proc. of 24th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2003)*. Lecture Notes in Computer Science 2679. Berlin: Springer-Verlag, 2003. Pp. 450–462.

CONCEPTUAL MODEL OF INTELLIGENT MONITORING OF TECHNICAL SYSTEMS BASED ON FUNCTIONAL-LOGIC PROGRAMS OF FLOW CALCULATIONS

VALENTIN V. SHMELEV,

St. Petersburg, Russia, valja1978@yandex.ru

VICTOR A. KARGIN,

St. Petersburg, Russia, vic_kargin@mail.ru

DMITRY V. POPOV,

St. Petersburg, Russia, 707dim707@gmail.com

KEYWORDS: theory of computations; functional-logical programming; Stream computing; processing of measurement information; condition monitoring.

ABSTRACT

The task of monitoring the state of a technical system under the influence of disturbing factors is considered. A mathematical statement of the problem is presented. For a semantic description of the solution of the problem, a conceptual model of a special high-level language is proposed. The purpose of the developed language is the description ("programming") of the computing processes for processing technical and technological information in the subject area. The model on the basis of the attracted sections of the theory of computation, system modeling, identification and technical diagnostics proves the existence, unity and stability of the solution of the task. For this, re-

spectively, set out three concepts. The first concept is the concept of a poly-model complex for monitoring the state of the processes of the technical system functioning on the basis of Petri nets and G-networks with predicative-operator extension. The second concept is the concept of a method for synthesizing functional-logical programs of stream computing with verifying the correctness of compensation for disturbances. The third concept is the concept of organizing stream computing using modifications of color Petri nets based on the interpretation of the stages of functional diagnosis of the state of the technical system. The concept that unifies the concept is the concept of an

intellectual system, which includes a subsystem for presenting data and knowledge about a controlled technical system and a subsystem for manipulating them. The novelty of the material is the integration in unified theoretical positions of the synthesis of flow calculation programs for formal verification procedures and error search based on the interpretation of the properties of Petri and G networks. The practical importance and relevance of intelligent monitoring are to take into account various factors that distort the process of monitoring the state of the technical system. Measures are proposed to compensate for the technical complexity of controlled processes in the technical system, the structural, computational, temporal, logical complexity of monitoring the state of the system, the confidentiality of the initial information, and the structural and parametric dynamics of instances of controlled processes. The direction of application of the presented concept is the design of schemes of computing processes associated with the processing of large data.

REFERENCES

1. Akhmetov R.N., Vasiliev I.E., Kapitonov V.A., Okhtilev M. Yu., Sokolov B.V. Concept of creation and applying perspective ACS preparation and launch of a space rocket "Soyuz-2": new approaches to integration, intellectualization and management. *Aerospace instrument-making*. 2015. No. 4. Pp. 3-54.
2. The Concept of information of Russian Space Department (2010-2015). Federal space agency [The Electronic resource]. URL: <http://www.federalspace.ru/2158>.
3. Maidanovich O.V., Okhtilev M. Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Integrated automation of space mean's state monitoring based on intelligent information technology. *Information Technologies*. 2011. No. S10. Pp. 1-32.
4. Peterson J.L. *Petri net theory and the modeling of systems*. Englewood Cliffs, N.Y., Prentice-hall, 1981. 288 p.
5. Okhtilev M. Yu. *Osnovy teorii avtomatizirovannogo analiza izmeritel'noj informacii v real'nom vremeni. Sintez sistemy analiza: monografiya* [Fundamentals of the theory of automated analysis of measurement information in real time. Synthesis of the analysis system: monograph]. St. Petersburg: VKA them. AF Mozhaiskiy, 1999. 162 p.
6. Kalman R.E., Falb P.L., Arbib M.A. *Topics in Mathematical System Theory*. N.Y.: McGraw-Hill, 1969. 358 p.
7. Parijskaia E. Yu. Mathematical models and simulating approaches for continuous-discrete systems. *Differential equations and control processes*. 1997. No. 1. URL: <http://www.math.spbu.ru/diffjournal/RU/numbers/1997.1/article.1.4.html> (date of access: 20.07.2016).
8. Clark E.M., Grumberg O., Peled D. *Model checking*. MIT Press, 1999. 314 p.
9. Ustalov D.A. Dataflow-driven crowdsourcing: relational models and algorithms. *Modelling and analysis of information systems*. 2016. Vol. 23. No. 2. Pp. 195-210.
10. Latsis A.O. *Parallel processing of data*. Moscow: Academy. 2010. 336 p.
11. Levin V.K. Tendencies of development of supercomputers. *Computational nanotechnology*. 2014. No. 1. Pp. 35-38.
12. Lektuers A.I., Okhtilev M. Yu., Posturyaev S.A., Sokolov B.V., Chuprikov A. Yu., Shmelev V.V. Analysis of perspective approaches to solving problems of complex modeling of self-controlled computing technologies in critical applications. *Proceedings of SPIIRAN*. 2013. Vol. 6 (29). Pp. 144-169.
13. Shmelev V.V. Process models of functioning of space assets. *Aerospace instrument-making*. 2015. No. 4. Pp. 78-93.
14. Leskin A.A., Maltsev P.A., Spiridnov A.M. *Network of Petri in modelling and management*. Leningrad: Science, 1989. 133 p.
15. Westergaard M., Kristensen L.M. The Access/CPN Framework: A Tool for Interacting with the CPN Tools Simulator. *Proc. of 30th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2009). Lecture Notes in Computer Science 5606*. Berlin: Springer-Verlag, 2009. Pp. 313-322.
16. Jensen K., Kristensen L.M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)*. 2007. No. 9(3-4). Pp. 213-254.
17. Ratzer A.V., Wells L., Lassen H.M., Laursen M., Qvortrup J.F., Stissing M.S., Westergaard M., Christensen S., Jensen K. CPN Tools for Editing, Simulating, and Analysing Coloured Petri Nets. *Proc. of 24th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets (Petri Nets 2003). Lecture Notes in Computer Science 2679*. Berlin: Springer-Verlag, 2003. Pp. 450-462.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Shmelev V.V, PhD, Deputy Head of the Department of the Mozhaiskiy Military Aerospace Academy;
 Kargin V.A., Ph D., Associate Professor of the Mozhaiskiy Military Aerospace Academy;
 Popov D.V., Head of the educational Laboratory of the Department of the Military Space Academy.

КРУПНЕЙШИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ВУЗ ВС РФ ВОЕННО-КОСМИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ А.Ф.МОЖАЙСКОГО



ОБУЧЕНИЕ В
САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ



ВЫСОКИЙ СОЦИАЛЬНЫЙ
СТАТУС



ОГРОМНЫЙ ВЫБОР
СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ



ВЫСОКООПЛАЧИВАЕМАЯ
РАБОТА



ПОВЫШЕННАЯ
СТИПЕНДИЯ



ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ПИТАНИЕМ И
ФОРМЕННОЙ
ОДЕЖДОЙ



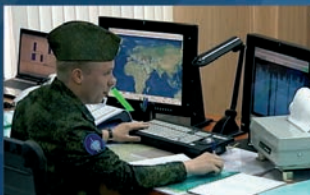
ПРОЖИВАНИЕ В
ОБЩЕЖИТИИ



ПРЕСТИЖНЫЕ
ПРОФЕССИИ
БУДУЩЕГО



ГАРАНТИРОВАННОЕ
ТРУДОУСТРОЙСТВО



ВОСТРЕБОВАННОСТЬ В
ВООРУЖЕННЫХ
СИЛАХ РФ



РОМАНТИКА
ВОЕННОЙ СЛУЖБЫ



БЕСКОНЕЧНЫЕ
ВОЗМОЖНОСТИ
КАРЬЕРНОГО РОСТА И
СОЦИАЛЬНЫЙ ЛИФТ

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПОСТУПАЮЩИХ

Почтовый адрес: 197198, г. Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13.

Телефоны приемной комиссии: (812) 347-96-59, 347-97-70.

Факс: (812) 237-12-49.

Сайт: www.mil.ru, www.academy-mozhayskogo.ru

Адрес электронной почты: srb.vka@yandex.ru.

doi: 10.24411/2409-5419-2018-10170

METHOD OF SCHEDULING DEPLOYMENT MEANS OF GROUND AUTOMATED CONTROL COMPLEX OF SPACECRAFT

MIKHAIL A. KOLPIN¹

PETR A. PROTSENKO²

ABSTRACT

Topical problem of scheduling deployment means of ground automated control complex of spacecraft is defined in this article. It is concluded that the use of the existing methods research backup in the field of application scheduling ground control means complex is difficult for operation scheduling of several ground control complex in integrated system. Complexity is due to high dimensionality of the optimization task and the problem of formalized accounting of technical and technological limitations system for control of miscellaneous spacecraft. The proposed method of means deployment scheduling of ground control complex is based on the statement of this problem in terms of graph theory. Multitude variants of means deployment of ground automated control complex of spacecraft is represented in the form of an undirected graph in which the vertices are control operations, and arcs reflect the possibility of joint assignment of corresponding control operations connected to vertices. The task of finding the optimal means deployment plan of ground automated control complex is formulated as the search for the maximum clique - the maximum set of vertices that form the complete subgraph of the initial graph. The algorithm of search the connected components of the graph, allowing the decomposition of the original problem into several independent scheduling sub-tasks, is used to reduce the dimension of the problem. It is estimated that to find the maximum clique of graphs with less than 70 vertices, it is expedient to use the Bron-Kerbosh algorithm. In other cases, it is recommended suboptimal procedures to find acceptable solutions in polynomial time. The developed methodology is brought to the software and mathematical support, to obtain rational plans for engaging the ground control complex and assessing the effectiveness of their possible implementation based on the composition and structure of ground automated control complex.

Information about authors:

¹PhD, Head at the laboratory - Senior Researcher
of the Military Space Academy,
St. Petersburg, Russia, kolpin-ma@mail.ru

²PhD, Head at the laboratory - Senior Researcher
of the Military Space Academy,
St. Petersburg, Russia, prosvka@gmail.com

KEYWORDS: spacecraft; technological control cycle; scheduling engagement means; graph theory; graph connectivity; maximum click.

1. Introduction

In the context of the variety and complexity of tasks to be solved in space and from space using spacecraft (SC) for various purposes, it is particularly important to ensure the effectiveness of their targeted operation.

The efficiency of the SC orbital groups (OG) operation directly depends on the quality of the SC control problem solution, which consists in the SC onboard systems control using ground-based technical means, which are organizationally integrated into the ground-based automated SC control complex (GACC). GACC is understood as a set of interrelated technical means, information, mathematical and software intended for the formation of ground control systems (GCS) of all types of domestic SCs. The tasks of ensuring the implementation of control programs for SC of a certain purpose, as well as the issuance of control actions based on the analysis of measuring information about the state of the SC are solved in the GCS.

Planning to involve the resource of GACC for operations management SC is characterized by cyclic technologically sophisticated multi-step procedure. The main purpose of planning the use of the GACC is a conflict-free distribution of its resource, and the result is a plan of operations for each SC for a day, which indicates the time of their implementation and the list of the involved SC controls.

Thus, from the structure of the GACC and the planning, allocation of resources directly affects the ability to meet the demands of mission control centres (MCC) for the involvement of some other means of control, i.e. the possibility of issuing control actions on Board the SC and the necessary volume measurements in the required time.

The existing technology of planning of attraction of means of GACC for management of SC consists in the decentralized planning of their involvement in MCC and the subsequent coordination of the received plans for resolution of conflict situations between applications of various MCC.

The methodological basis for planning and evaluating the effectiveness of such complex systems as GACC SC is based on the use of the methodology of the system approach, principles and methods of systems engineering, methods of optimal control theory and multimodel studies, as well as their applications to the management of space assets, called space Cybernetics. The development of this direction is devoted to the work of V.N. Kalinina, B.A. Reznikov, I.I. Delia and their students: B.V. Sokolov, Yu. s. Manuilov, A.N. Pavlov and other scientists [1–8]. A wide front of research in this direction were conducted and are conducted abroad. The most interesting results in the field of planning and management of complex technical systems were obtained by foreign scientists K. Schilling, M. Schmitt, R. Erwin and others [9–13].

However, most of these works are focused on planning the operation of the GCS SC of a certain purpose, for example, SC navigation or surveillance. The work of planning the oper-

ation of the GACC as a single SC control system, from which a resource is allocated for the operational time interval to solve the SC control problems of specific space complexes (systems) (SC(S)), is not given due attention.

This circumstance is due to the peculiarities of the extensive period of development of the GACC at the end of the twentieth century, which contributed to the emergence of a large range of types of onboard SC control systems and, accordingly, ground-based SC control, which led to a reasonable decomposition of the task of planning the operation of the GSC SC.

At the present stage of development of GACC there is a tendency to reduce the range of types of on-Board systems and ground controls, which together with the increase in the composition of the domestic OG SC leads to an increase in the number of conflicts between the MCC SC to use the General technical resource of GACC.

Results of the analysis of applicability of scientific and methodical reserve in the field of planning of functioning of separate GCS for ensuring management of SC show that their use is very problematic for planning of functioning of GACC as a whole.

First of all, this is due to the difficulties of formalization and solution of the problem of finding the optimal plan for the use of GACC funds to perform a set of operations of OG SC in the dynamic or static setting. These difficulties are due to the large dimension of the optimization problem and the problematic formalized accounting of the entire system of technological constraints imposed on the control process of SC for various purposes (different composition of control operations, sequence of operations, compatibility of operations, their duration, etc.).

In this regard, it becomes urgent to develop alternative approaches to plan the use of SC management tools, allowing on the basis of the composition, structure and parameters of the spacecraft, GACC, as well as the requirements and limitations of SC management technologies, to obtain rational, in the sense of the selected system of performance indicators, plans for the use of GACC SC.

2. Formalization of the tasks of the deployment means of ground automated control complex of spacecraft

SC control is carried out in accordance with the recommended by the developer cyclogram of planning and timely execution of the main SC control operations, which include:

- the holding and processing of measurements of current navigation parameters (MCNP) SC;
- reception from SC and processing telemetry information (TMI);
- loading of the command software information to the SC board (CSI);
- reconciliation of onboard time scale (RTS) and correction of on-Board SC generator.

Cyclically repeating sequence of specified operations with respect to the amount of their execution and relationships between them (of compatibility, incompatibility, route) is called manufacturing cycle management (MCM) SC [8].

The quality of the execution MCM SC depends on the ability to achieve the required values of indicators of efficiency of use of SSC(S). The management of SC is in the radio coverage zones (RCZ) of the GACC means. Each RCZ can be characterized by the following set of parameters:

- GACC tool number;
- SC number;
- RCZ entry time;
- RCZ output time;
- number visible by means of GACC daily round of the SC.

Within finding the SC in RCZ means the GACC may be operated to perform various control operations. Each management operation has a time standard run set in MCM by the specific SC. In this case, the control operation can be carried out if the time required to perform it is less than the duration of the corresponding RCZ. For a sufficiently large duration of the RCZ plan the conduction of several management operations. The start time of the control operation can be planned within the range of the SC in the radio visibility zone.

Thus, each zone of radio visibility of SC by means of GACC can be represented as a set of alternatives by types of the carried-out operations of management and times of the beginning of their performance. The set of these alternatives in all areas of coverage OG SC means GACC forms many alternatives to the use of funds GACC, to ensure control:

$$Z = \{z_i\}, \quad z_i = \{o_i, k_i, s_i, \tau_i, l_i\},$$

- where k_i — SC number;
 s_i — Tool number;
 o_i — Operation type;
 τ_i — The interval of staying in RCZ $\tau = (t_{\text{вх}}, t_{\text{вых}})$;
 l_i — Number of the SC revolution.

Due to the fact that the plan for the use of GACC means should reflect the control technology of the SC, up to z it can be narrowed to a variety of acceptable alternatives Z_A , considering a set of technological limitations imposed on the control process of the SC. For this MCM SC can be conveniently represented in the form of multiple applications for maintenance on funds of GACC:

$$T = \{t_j\},$$

- where $t_j = (k_j, o_j, l_j)$.
 Here k_j — SC number;
 o_j — Type of the control operation;
 l_j — Number of the SC revolution where the operation should be fulfilled.

Then the set of acceptable alternatives to the use of GACC means, considering the SC control technology, is presented as $Z_A = Z \cap T = \{z_n\}$, where $n = 1 \dots N$.

It should be noted that the generated set does not consider the temporary location of the control operation in the radio visibility zone. To take this fact into account, each acceptable alternative of activation is represented as a set Z_A of alternatives, which differs in the start times of the operation in the radio visibility zone. In order to take this fact into account each acceptable alternative of engagement z_n is presented as a set of alternatives z'_k , differs by the time of the beginning of the operation o_i in RCZ τ_p , i.e. $z_n = \{z'_k\}, k = \overline{1, N}$.

Considering the technical limitations of planning the use of GACC Z_A it is convenient to present as an undirected graph without loops G , in which the vertices are control operations, and the arcs reflect the possibility of joint assignment to the plan of using the GACC means corresponding to the connected vertices of control operations.

However, vertices cannot be connected by arcs if the control operations involve:

- simultaneous work with two funds GACC, one SC;
 - holding the work with one tool the GACC SC in two;
 - simultaneous means the GACC SC two control operations, one SC;
 - the use of the same means of GACC shall be carried out with an interval of time between the operations of the office not exceeding the time required for its preparation for work.
- This system of constraints is sufficient to account for technology loads CSI and reception of SC TMI. Technology of fulfillment the MCNP requires to measure two or three funds for several consecutive orbits. The complexity of accounting for this technology is the need for group management operations in a strictly specified sequence. For these purposes, you want to make the following transformations of the graph:

1. For each operation of the MCNP is determined by the number of possible inclusions in different schemes of the MCNP, which is determined by the amount of funds involved in the round. For example, to account for the control technology of three means on two consecutive revolutions $m=3$, two means on three consecutive revolutions $m=2$, with the possibility of using both control technologies $m=5$.

2. The Vertices of the graph that correspond to the operations of the MCNP are duplicated m , and they are assigned an attribute — the number of the copy.

3. The Vertices of the graph i and j are not connected by arcs if they are a copy of one vertex, belong to different schemes (technologies) of carrying out MCNP, and also in cases if the condition is fulfilled $|l_i - l_j| > n - 1$, where l — a loop number, where is the planned operation MCNP SC, but n — he number of consecutive revolutions in the scheme of the MCNP.

The generated graph contains many plans for the use of GACC funds. Each such plan is a complete subgraph, i.e. a

graph with all vertices connected to each other. Due to the fact that the plan for the use of funds of the GACC should contain the operations laid down in the MCM, the task of finding a rational plan for the use of funds of the GACC is to find in the constructed graph G the maximum complete subgraph (cliques) G^* such that:

$$G^* = \arg \max_{G_i \in G} |G_i|, \quad i = \overline{1..I},$$

where I — a number of cliques in graph G .

At the same time, it is proposed to assess the quality of planning the use of GACC tools using the indicator of completeness of the MCM SC Q , equal to the ratio of the number of planned operations to the specified number of operations in the MCM SC T :

$$Q = \frac{|G^*|}{|T|}.$$

3. Method of scheduling deployment means of ground automated control complex of spacecraft

It is known that the problem of finding the maximum clique is NP-complete [14]. To solve this problem, in 1973, the Bronn-Kerbosh algorithm was developed, the meaning of which is to find the most complete subgraph. Starting with a single vertex that forms a complete subgraph, the algorithm attempts to increment an already constructed complete subgraph by adding vertices from a set of candidates to it at each step.

The computational complexity of the algorithm is $O(3^{n/3})$, where n is the number of vertices. The dependence of the maximum clique search time on the number of vertices in the graph using the Bronn-Kerbosh algorithm is illustrated in fig. 1.

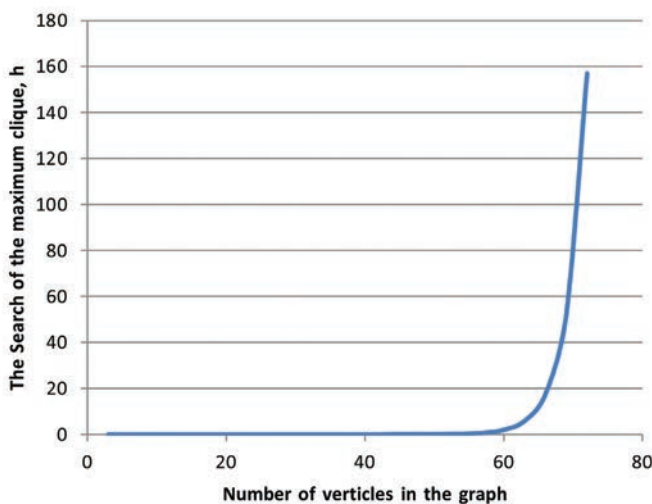


Fig. 1. The dependence of time of search of the maximum clique from graph power

In the task of finding a plan to use the existing composition of the GACC to control the orbital grouping of SC, numbering, for example, 20 SC, the number of vertices in the graph is several thousand, which greatly complicates the use of the armor-Kerbosh algorithm due to the unacceptably long time required for the relevant calculations (a few months on a supercomputer).

The analysis of mathematical approaches to solving the problem of finding the maximum clique for large graphs shows that the problem of dimension can be solved by constructing and working with the addition G' of the graph G . Due to the fact that the feature of the original graph G is its high connectivity, G' , in turn, is a sparse disconnected graph, in which the edges are connected only those vertices that cannot be simultaneously included in the plan of using the means of GACC.

Incoherence of G' is due to the presence of SC control operations, the planning of which should be carried out independently of each other. Such situations include, for example, planning of SC control operations on various visible revolutions, planning of SC control operations with GACC means intended for carrying out operations of only one type MCNP or TMI), etc.

Then the General approach to the search for the maximum clique is to construct an addition of the original graph, select a set of disconnected graphs for which additions are built, and then, in the search for the maximum clique. The formation of the maximum clique of the original graph is carried out by combining the maximum clique of its independent subgraphs.

On the basis of the presented methodological approach, the method of planning the use of GACC SC is developed, the structural and logical scheme of which is presented in fig. 2. The method consists of 6 main blocks.

The first block contains initial data on the composition, structure and parameters of the controlled OG SC, as well as the system of technical and technological limitations imposed on the SC control process.

Data on the orbital grouping contain information on the spatial position of each SC, the type of on-Board command and measurement system (CMS), as well as the structure and parameters of the process control cycle established by the SC manufacturer in the operational documentation.

In the presented technique MCM SC are set by mapping each operation of the control room visible diurnal round, which means the GACC got to do it.

Due to the fact that the duration of the operation of verification, phasing and correction of the onboard time scale in comparison with other control operations is small, and its implementation is usually carried out in conjunction with the operation of the CSI loading, these operations are combined into a single operation.

The ground-based automated control system of the SC is set by the geographical coordinates of the command measuring

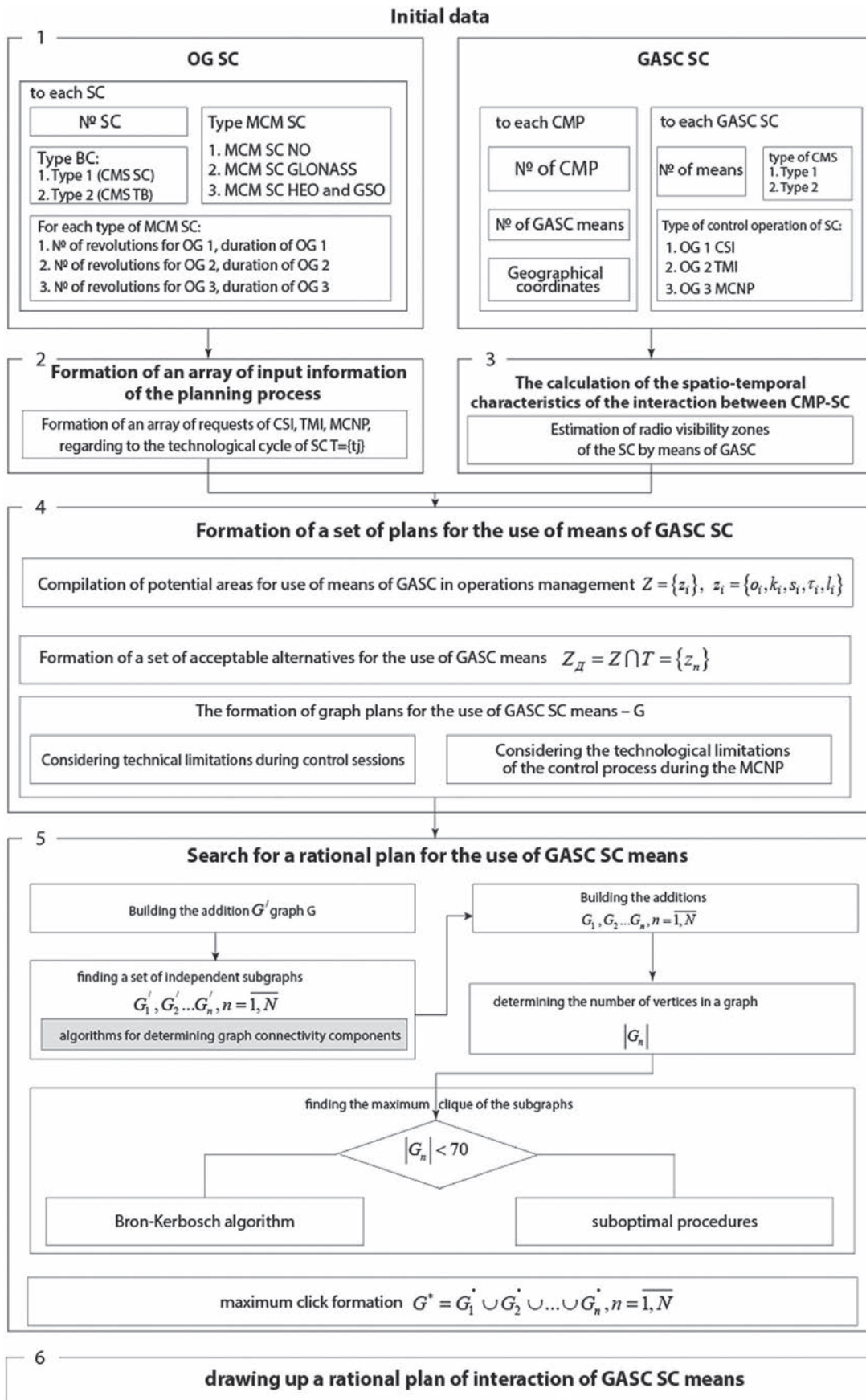


Fig. 2. Structural-logical scheme of the method

points (CSI) and their equipment by the SC control means. Each control tool is described by a certain functionality-the types of control operations that it performs, as well as the type of on-Board CMS, with which the tool interacts.

In the second block of the technique the formation of an array of applications for operations of laying CSI, receiving TMI and MCNP based on the technological cycle of control of each SC. The application includes the following set of parameters:

- SC number;
- the type of operation control;
- room visible diurnal revolution on which you want to perform the operation control;
- duration of the control operation.

In the third block, the spatial-temporal characteristics of the CMP-SC interaction are calculated. As a result of the calculations, an array of potential zones for the use of GACC means for control operations is compiled, considering the technical compatibility of the control means with the onboard CMS. Each potential zone of use of the GACC is defined by the following set of parameters:

- OCMS number;
- number of the control means;
- SC number;
- the type of operation control;
- time to enter the radio visibility zone;
- time of exit from the zone of radio visibility;
- number the daily round;
- number of the visible diurnal round (visible coils dustproof numbered sequentially).

In the fourth block of the technique the search of all zones of radio visibility of SC by means of GACC and formation on their basis of a set of alternatives on performance of operations of management is carried out. Each control operation is a set of parameters including the potential zone parameters and two additional parameters:

- time to start using the tool;
- the end time of the trigger means.

Thus, from each zone of involvement is formed a set of potential control operations, differing in one or more parameters. Each potential control operation becomes the vertex of the graph G . Vertices are not connected by edges if operations cannot be performed together.

In the fifth block of the methodology, the search for a rational plan for the use of GACC funds is carried out. The procedure for finding a plan is to do the following:

1) Building the add-on G' source graph G .

2) The allocation in G' of the aggregate of disconnected subgraphs $G'_1, G'_2 \dots G'_n, n = \overline{1, N}$. This action is performed using the graph connectivity algorithm to decompose the original problem into subtasks. To search for a set of unrelated subgraphs, it is convenient to use algorithms for finding graph

connectivity components (for example, in depth or width) [10], which are graph traversal methods that allow to identify such subsets of vertices in a graph that for any two vertices of these subsets there is a path from one vertex to another and there are no paths to vertices belonging to other subsets of vertices. The advantage of these algorithms is the linear convergence time relative to the number of vertices and edges in the graph

3) To find independent sub-graphs $G'_1, G'_2 \dots G'_n, n = \overline{1, N}$

the relevant additions are being built $G_1, G_2 \dots G_n, n = \overline{1, N}$ and the number of vertices in graphs is determined $|G_n|, n = \overline{1, N}$.

4) Search for maximum clicks $G_1^*, G_2^* \dots G_n^*, n = \overline{1, N}$. At the same time, to solve the problem of finding the maximum clicks of graphs with less than 70 vertices, it is proposed to use the Bron-Kerbosh algorithm [15]. In other cases, it is recommended to use suboptimal procedures to find acceptable solutions in polynomial time [16].

5) Formation of the maximum clique of the original graph according to the following rule:

$$G^* = G_1^* \cup G_2^* \cup \dots \cup G_n^*, n = \overline{1, N}.$$

Found clique G^* it will contain the desired rational plan for the use of GACC SC funds.

In the sixth block of the technique, a rational plan for the use of the GACC means is drawn up by comparing the vertices of the found greatest clique of control operations from the set of permissible alternatives to the use of the GACC means.

4. Analysis of the effectiveness of the method of scheduling deployment means of ground automated control complex of spacecraft

To study the effectiveness of the proposed method in the article developed a software tool that allows you to automate the process of searching for rational plans for the use of GACC SC.

On the basis of the developed software a number of experiments for different versions of the original data. The main goal of the experiment was the comparison of the values of the indicator of the completeness of control of the SC, obtained using the developed technique and methodological approaches to the formation of plans for the utilization of funds GACC, implementing the heuristic procedures of FIFO and LIFO [17].

The initial data for the experiments were considered:

1) Three variants of OG SC, consisting of 10, 15 and 20 low-orbit SC, which can have the first or second type of onboard CMS.

2) The technological cycle of control of SC including the CSI tab and reception of TMI at the beginning and the end of day of planning, and also carrying out sessions of MCNP two measuring means on three consecutive revolutions or three measuring means on two consecutive revolutions.

3) Means of GACC SC placed on 8 command and measuring points (CMP) evenly distributed on latitude along the territory of the Russian Federation. In this case, each CMP is placed on one set of tools that have the functionality to perform SC control operations, equipped with the first or second type of onboard CMS.

The modeling of the following configurations of the GACC SC is carried OUT:

- the full composition of the funds GACC (configuration 1);
- funds GACC4 CMP Western part of Russia (configuration 2);

- GACC means 4 CMP of the Eastern part of the Russian Federation (configuration 3).

The results of planning are displayed in a table (fig. 3) and graphic (fig. 4) forms. In addition, it is possible to observe the interaction of controls with the SC in the development of the resulting plan for the use of the NAC in 3D mode (fig. 5).

According to the results of the experiments were obtained the plans for the utilization of funds GACC SC for different variants of initial data on the composition of the OG SC and GACC, along with their assessment of the completeness of the execution MCM SC.

SC	OCMS	Mean type	Procedure	Start Time	End Time	Visible Revolution
SC7-2	CSI 8	TB	MCNP	11:44:00	11:45:40	7
SC7-2	CSI 7	TB	MCNP	11:45:45	11:47:25	7
SC7-2	CSI 8	TB	MCNP	13:14:50	13:16:30	8
SC7-2	CSI 7	TB	MCNP	13:16:45	13:18:25	8
SC7-2	CSI 6	TB	MCNP	14:50:15	14:51:55	9
SC7-2	CSI 5	TB	MCNP	14:52:25	14:54:05	9
SC7-2	CSI 7	TB	CSI	02:42:00	02:47:25	1
SC7-2	CSI 5	TB	TMI	04:15:55	04:19:10	2
SC7-2	CSI 2	TB	CSI	18:01:25	18:06:50	11
SC7-2	CSI 4	TB	TMI	19:29:15	19:32:30	12
SC7-1	CSI 5	MA9	NMI	03:28:00	03:31:15	2
SC7-1	CSI 4	SC	CSI	18:42:35	18:48:00	10
SC7-1	CSI 1	MA9	TMI	20:20:00	20:23:15	13
SC6-3	CSI 8	TB	MCNP	09:54:05	09:55:45	6

Fig. 3. Tabular presentation of the plan for the use of GACC means

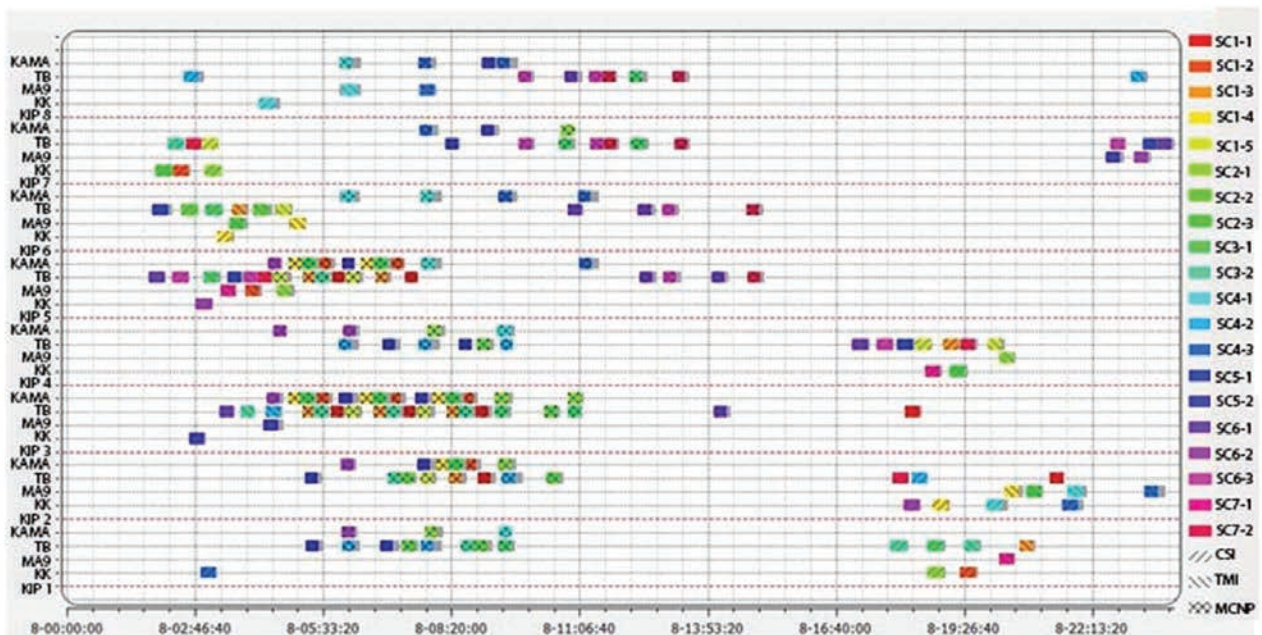


Fig. 4. Graphical representation of the plan for the use of GACC means

Comparative analysis of the results (Fig. 6) allows you to draw the following conclusions:

- in conditions of excess management SC values for the indicator completeness of the performance MCM SC for the resulting plans, leveraging funds GACC using the proposed methodology and the considered heuristic procedures differ slightly, with the developed method allows to increase Q on the level of 3–4%;

- in the conditions of the reduced composition of the SC control facilities, the values of the completeness index of MCM SC execution for the obtained plans of the GACC funds utilization according to the proposed method are on average 10–15%

higher than for the heuristic algorithms FIFO and LIFO, which is due to the use of optimization procedures in the developed method for solving the problem of finding the maximum clique;

- the time spent on the build plan of use of funds GACC SC using the developed technique, much higher (tens of minutes) than for the heuristics FIFO and LIFO (tens of seconds). Therefore, in the operational planning of the use of GACC TOOLS in conditions of lack of time or excessive composition of controls, it is rational to use heuristic algorithms FIFO or LIFO.

It should be noted that, despite the computational complexity, the proposed method has a number of significant advantages, the main ones are:



Fig. 5. The display in the 3D mode of implementation of the plan functioning of the GACC

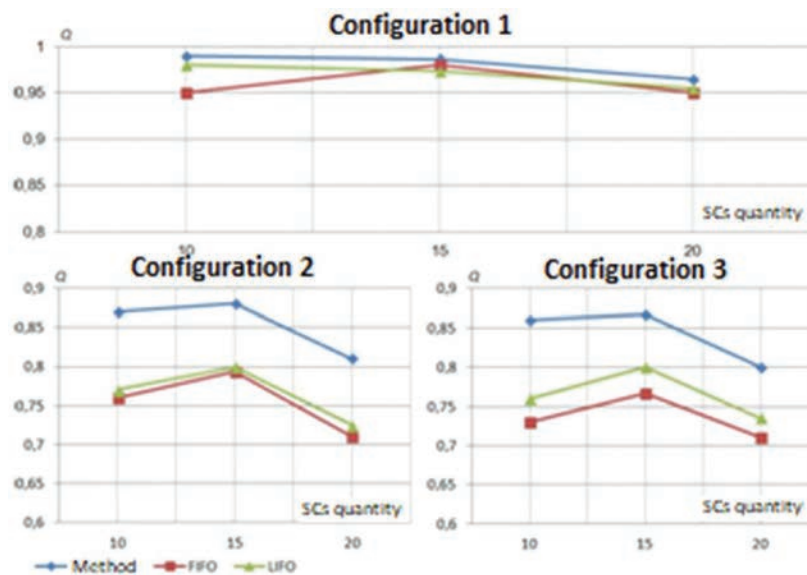


Fig. 6. Assessment of the completeness of the execution MCM SC for various compositions GACC and OG SC

- simplified procedure of formalized accounting of technological limitations differing in composition and structure imposed on the control process of different types of SC;
- optimization of the technology of constructing a plan for the use of GACC TOOLS through the possibility of using optimal and suboptimal methods for finding the maximum clique of the graph;
- the possibility of simultaneous conflict-free planning of the use of heterogeneous OG SC, which makes it possible to transform a complex multi-stage procedure of decentralized planning and coordination of GACC SC into a technology of planning and resource allocation of the SC controls from a single center.

Conclusion

The developed method is the development of scientific and methodological apparatus of planning and evaluation of the efficiency of the GACC SC and can be used to assess the target capabilities of different configurations of the GACC considering the complex system of technical, technological and space-time constraints imposed on the SC control process.

The proposed methodology allows to correctly formulate and solve a number of relevant scientific and practical problems of analysis and synthesis of automated control systems of SC:

- 1) assessment of the effectiveness of the GACC SC different conditions;
- 2) assessment of target opportunities promising GACC SC and promising technologies for SC control;
- 3) planning the use of funds of both individual GCS and the GACC SC a whole for the implementation of SC management programs;
- 4) the rationale for the various requirements as to particular types of controls SC, and to the GACC SC in General;
- 5) substantiation of the directions of development and improvement of the GACC SC, etc.

References

1. Kalinin V.N., Sokolov B.V. Dinamicheskaya model' i algoritm optimal'nogo planirovaniya kompleksa robot s zapretami na preryvanie [A dynamic model and an optimal scheduling algorithm for a set of activities with bans on interrupts] *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1987. No. 1. Pp. 106–144. (In Russian)
2. Reznikov B.A., Delij I.I. *Matematicheskoe obespechenie upravleniya podvizhnymi ob'ektami* [Mathematical software for control mobile object]. Leningrad: MO SSSR, 1986. 149 p. (In Russian)
3. Sokolov B.V. *Kompleksnoe planirovanie operatsij i upravlenie strukturami v ASU aktivnymi podvizhnymi ob'ektami* [Complex planning of operations and management of structures in automated control systems of mobile objects]. St. Petersburg: MO RF. 1992. 232 p. (In Russian)
4. Moskvina B.V., Mikhajlov E.P., Pavlov A.N., Sokolov B.V. Integrated Models of Structure Dynamic Control for Information Systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2006. Vol. 49. No. 11. Pp. 7–12. (In Russian)
5. Manujlov Y.S., Novikov E.A. Algoritm lokal'no-optimal'nogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami. [The algorithm is locally optimal control of technological process]. *Sbornik nauchnykh trudov Ehkonomicheskaya kibernetika: "Sistemnyj analiz v ehkonomie i upravlenii"* [Collection of proceedings "Economic cybernetics: system analysis in Economics and management"]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet ekonomiki i finansov Publ., 2005. Vol. 12. Pp. 56–61. (In Russian)
6. Kalinin V.N. Optimum planning of information interaction of a spacecraft with a discrete medium on surface of the Earth. *Informatsiya i kosmos* [Information and Space]. 2015. Vol. 3. Pp. 150–158. (In Russian)
7. Pavlov A.N., Sokolov B.V., Moskvina B.V., Verzilin D.N. *Voennaya sistemotekhnika i sistemnyj analiz* [Military systems engineering and systems analysis]. St. Petersburg: VKA imeni A.F. Mozhajskogo, 2010. 251 p. (In Russian)
8. Manujlov Y.S., Kalinin V.N., Goncharevskij V.S., Delij I.I. *Upravlenie kosmicheskimi apparatami i sredstvami nazemnogo kompleksa upravleniya* [Management of spacecraft and ground control facilities]. St. Petersburg: VKA imeni A.F. Mozhajskogo, 2010. 609 p. (In Russian)
9. Kleinschrodt A., Reed N., Schilling K. A comparison of scheduling algorithms for low cost ground station networks. 67st international astronautical congress. Guadalajara, Mexico, 2016. Pp. 1–15.
10. Schmidt M., Rybysc M., Schilling K. A scheduling system for small ground station networks. Space Ops 2008 Conference, 2008. Pp. 1–7.
11. Alvarez A., Erwin R. *An Introduction to Optimal Satellite Range Scheduling*. Springer, 2015. 162 p.
12. Zufferey N., Amstutz P., Giaccari P. Graph colouring approaches for a satellite range scheduling problem. *Journal of Sheduling*. 2008. No. 11(4). Pp. 263–277.
13. Preindl B., Seidl M., Mehnen L., Krinninger S., Stuglik S., Machnicki D. A performance comparison of different satellite range scheduling algorithms for global ground station networks. 61st international astronautical congress. Prague, Czech Republic, 2010. Pp. 253–257.
14. Emelichev V.A., Mel'nikov O.I., Sarvanov V.I., Tyshkevich R.I. *Lektsii po teorii grafov* [Lectures on graph theory]. Moscow: Nauka, 1990. 392 p. (In Russian)
15. Levitin A. *Algoritmy: vvedenie v razrabotku i analiz* [Algorithms: introduction to development and analysis]. Moscow: Vil'yams, 2006. 576 p. (In Russian)
16. Gribkov M.A., Alekseevskij A.V., Spirin S.A., Korotkova M.A. Vychislitel'nyj podkhod k resheniyu zadachi o poiske maksimal'noj kliki [Computational approach to solving the maximum clique search problem]. *Trudy Instituta sistemnogo analiza rossiyskoy akademii nauk* [Proceeding of the Institute for Systems Analysis of the Russian Academy of Science]. 2006. Vol. 25. Pp. 185–192. (In Russian)
17. Kolpin M.A., Protsenko P.A., Slashhev A.V. Effectiveness evaluation technique for ground automated control functioning of a spacecraft. *Trudy MAI*. 2017. No. 92. URL: <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=77144> (date of access 10.12.2017). (In Russian)

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАДЕЙСТВОВАНИЯ СРЕДСТВ НАЗЕМНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

КОЛПИН Михаил Александрович,
г. Санкт-Петербург, Россия, kolpin-ma@mail.ru

ПРОЦЕНКО Пётр Александрович,
г. Санкт-Петербург, Россия, prosvka@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: космический аппарат; технологический цикл управления; планирование задействования технических средств; теория графов; связность графа; максимальная клика.

АННОТАЦИЯ

В работе обоснована актуальность задачи планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами. Сделан вывод о том, что использование существующего научно-методического задела в области планирования средств отдельных наземных комплексов управления затруднительно для планирования задействования функционирования наземного автоматизированного комплекса управления в целом. Сложности обусловлены большой размерностью оптимизационной задачи и проблематичностью формализованного учета всей системы технических и технологических ограничений, накладываемых на процесс управления космическими аппаратами различного целевого назначения. Предложена методика планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления, основанная на постановке указанной задачи в терминах теории графов, что позволило применить алгоритмы данной теории для ее решения. Множество вариантов задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления для управления космическими аппаратами представлено в виде неориентированного графа без петель, в котором вершинами являются операции управления, а дуги отражают возможность совместного назначения в план соответствующих соединяемым вершинам операций управления. Задача поиска оптимального плана задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления сформулирована как поиск максимальной клики – максималь-

ного множества вершин, которые образуют полный подграф начального графа. Для уменьшения размерности задачи используется алгоритм поиска компонент связности графа, позволяющий провести декомпозицию исходной задачи на несколько независимых подзадач планирования. Установлено, что для отыскания максимальной клики графов, имеющих мощность менее 70 вершин, целесообразно использовать алгоритм Брона-Кербоша. В других случаях рекомендуется применять субоптимальные процедуры, позволяющие находить приемлемые решения за полиномиальное время. Разработанная методика доведена до уровня программно-математического обеспечения, позволяющего исходя из состава и структуры наземного автоматизированного комплекса управления, орбитальной группировки космических аппаратов, используемых технологий управления космическими аппаратами получать рациональные планы задействования наземного автоматизированного комплекса управления и оценки эффективности их возможной реализации.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Колпин М.А., к.т.н., начальник лаборатории – старший научный сотрудник военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского.

Проценко П.А., к.т.н., начальник лаборатории – старший научный сотрудник военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского.

Для цитирования: Колпин М.А., Проценко П.А. Методика планирования задействования средств наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 5. С. 90-99. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10170 (English)

ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ

Редакция журнала H&ES Research принимает к публикации статьи на русском и английском языках. Предоставляемая рукопись должна быть актуальной, обладать новизной, отражать постановку задачи, содержать описание основных результатов исследования, выводы, а также соответствовать указанным ниже правилам оформления. Текст должен быть тщательно вычитан автором, который несет ответственность за научнотеоретический уровень публикуемого материала.

Статья предоставляется в электронном виде, единым файлом, имеющим следующую структуру: заглавие статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, текст статьи (включая иллюстрации, таблицы и формулы), пристатейный список литературы, англоязычный блок. Также представляется отдельная папка с экспортированными изображениями рисунков в формате TIFF, EPS по требованиям указанным в п.7.

К статье прилагается экспертное заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати и две рецензии кандидатов или докторов наук по профилю планируемой публикации материалов (сканированные копии в электронном виде).

Все материалы высылаются электронной почтой в адрес журнала: HT-ESResearch@yandex.ru.

1. **Статья подготавливается** в редакторе MS Word. Шаблон статьи можно скачать на сайте журнала www.h-es.ru.

2. **Данные об авторе:** фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, должность и полное название организации – места работы, город, страна, адрес электронной почты и почтовый адрес каждого автора полностью.

3. **Объем аннотации** 200–250 слов. Аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов), без сокращений, структурированной, отражать основное содержание статьи: предмет, цель, методологию проведения исследований, результаты исследований, область их применения, выводы. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье. Предложения должны начинаться словами: показано, получено, исследовано, предсказано и т.д. и т.п.

4. **Ключевые слова:** от 5 до 7 слов (словосочетаний), разделенных точкой с запятой.

5. **Объем статьи** без аннотации – от 15 до 30 тыс. знаков с пробелами. Рисунки и таблицы в объеме статьи не учитываются.

6. **Формульные выражения** выполняются в редакторе Math Type. Формулы нумеруются в круглых скобках, источники – в прямых. Нумерация формул и приведение в списке источников, на которые нет ссылок по тексту, не допускается. Длина формулы в одну строчку 8–9 см.

Простые формулы и буквенные обозначения величин следует писать в строку обычным текстом. В формулах использовать только буквы латинского и греческого алфавита!

Размеры шрифтов (Size) предварительно перед набором первой формулы установить (в MathType) следующие: кегль основной – 10, крупный индекс – 7, мелкий индекс – 5, крупный символ – 12, мелкий символ – 8. Формулы, не содержащие специальных математических символов, должны быть набраны в тексте (в формате Word). Греческие обозначения, скобки (квадратные и круглые) и цифры всегда набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набираются курсивом

как в формулах, так и в тексте, кроме устойчивых форм (max, min, cos, sin, tg, log, exp, det ...).

Нельзя использовать сканированные формулы! Все формулы должны быть набраны вручную!

7. **Рисунки и таблицы** в статье должны быть пронумерованы и снабжены подписями, в тексте статьи должны иметься ссылки на каждый рисунок и таблицу (рис.1 и табл.1). Если рисунок или таблица единственные в статье, то их не нумеруют.

Рисунки должны быть четкими, с хорошо проработанными деталями. Избегать текстовых надписей на иллюстрациях. Заменять их цифровыми обозначениями, которые поясняются в подписи или в основном тексте. Все рисунки прилагаются в виде отдельных файлов в формате TIFF, EPS с разрешением не менее 300 dpi для оригинального размера в печатном издании (для больших рисунков ширина от 14 до 20 см, для маленьких от 7 до 9 см).

8. **Список литературы:** от 15 до 50 наименований. Из них самоцитирований не должно быть более 25%. В числе источников желательное не менее 50 % иностранных источников (для статей на английском языке – 15% российских). Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее 8 статей из научных журналов не старше 10 лет, из них 4 – не старше 3 лет.

Ссылки должны быть только на статьи, патенты, книги и статьи из сборников трудов. В списках литературы не размещать ГОСТы, рекомендации, диссертации, авторефераты и другую нормативную и непериодическую документацию. Эти данные можно указывать в теле статьи в скобках или в виде постраничных сносок (если автор непременно хочет указать нормативный документ или сослаться на свою диссертацию). Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.052008. **Образец оформления списка литературы размещен на сайте журнала www.h-es.ru.**

9. **На английском языке** предоставляется: название статьи, фамилия, имя, отчество, информация об авторах (должность, ученая степень, ученое звание, место работы), город, страна и электронный адрес всех авторов полностью, аннотация, ключевые слова и списки литературы.

Все названия издательств и журналов должны быть транслитерированы, а не переведены. Названия организаций в списках литературы (Труды Академии...) должны быть четко выверены с данными организации и иметь официальное английское наименование, которое указано на их сайте или также транслитерированы. Образец оформления списка литературы размещен на сайте журнала www.h-es.ru.

10. Структура статьи на английском языке

Introduction (введение)

Materials and methods (материалы и методы).

Results and Discussions (результаты и обсуждение).

Conclusions (вывод)

Acknowledgements (благодарности, необязательный раздел)

References (ссылки на использованную литературу)

На русском языке предоставляется: название статьи, фамилия, имя, отчество, информация об авторах (должность, ученая степень, ученое звание, место работы), город, страна и электронный адрес всех авторов полностью, аннотация, ключевые слова и списки литературы.

Внимание! Редакция оставляет за собой право отклонить представленные материалы, оформленные не по указанным правилам.