

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

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», 2019

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 2019



Учредитель:

ООО «ИД Медиа Паблшер»

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;
МОРОЗОВ А.В., д.т.н., профессор,
 Действительный член Академии
 военных наук РФ;
МОШАК Н.Н., д.т.н., доцент;
ПАВЛОВ А.Н., д.т.н., профессор;
ПРОРОК В.Я., д.т.н., профессор;
СЕМЕНОВ С.С., д.т.н., доцент;
СИНИЦЫН 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

Мосин Д.А., Дуга В.В.

Методика обоснования предпочтительного варианта применения ракетно-космических комплексов испытательного космодрома при решении задач запуска малых космических аппаратов..... 4

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Бабанов Н.Ю., Корсаков С.С., Ларцов С.В., Самарин В.П.

Об экспериментальном измерении уровня интенсивности вторичных нелинейных помех от электронных устройств с полупроводниковыми элементами 14

Буренин А.Н., Легков К.Е.

Модели стохастического управления современными инфокоммуникационными сетями 26

Дорогов А.Ю., Потапов И.А., Тутене А.С.

Моделирование протоколов беспроводных сетей в среде MatLab 32

Павликов С.Н., Убанкин Е.И.

Исследование автокорреляционной функции нового класса широкополосных сигналов..... 46

Чертова О.Г., Чиров Д.С.

Построение опорной сети связи на базе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с отсутствием наземной инфраструктуры 60

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Абдуллаева Л.Д.

Методы определения морской береговой линии с помощью бортовой многоканальной измерительной системы..... 72

Асадов Х.Г., Мамедова У.Ф.

Новый метод измерения общего количества водяных паров в атмосфере с помощью солнечных фотометров..... 81

Лобанов А. В., Ашарина И.В.

Унифицированный метод обеспечения сбое-и отказоустойчивости в распределенных автоматизированных цифровых системах управления специального назначения 89

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Захарова Е.А., Хомоненко А.Д., Барановский А.М.

Методика синтеза пригодной по достоверности программы диагностирования бортового оборудования космического аппарата с учетом точностных характеристик средств измерений 100



CONTENTS

AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

Mosin D.A., Duga V.V.

Method of justification of a preferred embodiment of the application of rocket-space systems testing spaceport in solving problems the launch of small satellites 4

RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

Babanov N.Y., Korsakov S.S., Lartsov S.V., Samarin V.P.

About the experimentation measurements of secondary non-linear interferences intensity level from the semiconductor electronic devices 14

Burenin A.N., Legkov K.E.

Models of stochastic management of modern infocommunication networks 26

Dorogov A.Yu., Potapov I.A., Tutene A.C.

Modeling of wireless network protocols in the environment of MatLab 32

Pavlikov S.N., Ubankin E.I.

Study of the autocorrelation function of a new class of broadband signals 46

Chertova O.G., Chirov D.S.

Building a core communication network which is based on small size unmanned aircraft vehicle without ground infrastructure 60

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Abdullayeva L.Dj.

Methods for determination of maritime coastline using aboard multichannel measuring system 72

Asadov H.H., Mamedova U.F.

New method for measuring of total amount of water vapors in atmosphere using sun photometers 81

Lobanov A.V., Asharina I.V.

Unified method for ensuring failure- and fault-tolerance to resistance in distributed automated digital control systems for special purpose 89

PUBLICATIONS IN ENGLISH

AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

Zaharova E.A., Khomonenko A.D., Baranovsky A.M.

Technique of synthesis of the suitable program of diagnosing of the onboard equipment of the spacecraft on reliability taking into account precision characteristics of measuring instruments 100

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;
MOROZOV A.V., PhD, Full Professor, Actual Member of the Academy of Military Sciences;
MOSHAK N.N., PhD, Docent;
PAVLOV A.N., PhD, Full Professor;
PROROK V.Y., PhD, Full Professor;
SEME NOV S.S., PhD, Docent;
SINICYN E.A., PhD, Full Professor;
SHATR AKOV 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: 10.24411/2409-5419-2018-10264

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО ВАРИАНТА ПРИМЕНЕНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОСМОДРОМА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЗАПУСКА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

МОСИН

Дмитрий Александрович¹

ДУГА

Вадим Вадимович²

АННОТАЦИЯ

Представлена методика позволяющая лицу принимающему решения обосновать выбор предпочтительного варианта применения ракетно-космических комплексов, входящих в состав испытательного космодрома как в условиях отсутствия предпочтений (критериальной неопределенности), так и в случаях наличия предпочтений. Каждый вариант применения ракетно-космического комплекса оценивается по трем показателям: оперативность, стоимость, ресурсоемкость. В качестве исходных данных для методики применяется множество допустимых вариантов применения ракетно-космических комплексов, получаемое с помощью научно-методического аппарата разработанного ранее. В зависимости от указанных условий обстановки, задача обоснования предпочтительного варианта применения решается в двух областях. В случае отсутствия у лица принимающего решения предпочтений, задача выбора предпочтительного варианта применения ракетно-космического комплекса решается с помощью метода идеальной точки, в случае отсутствия у лица принимающего решения предпочтений, указанная задача решается с помощью лексикографического метода. При решении указанной задачи в первой области, каждый вариант применения ракетно-космического комплекса представляется точкой в конечномерном Гильбертовом пространстве. Далее находится идеальная точка, как точка в пространстве имеющая координаты найденные, как совокупность наименьших значений из представленного множества. Далее рассчитывается расстояние между каждой из множества точек и предпочтительный вариант применения ракетно-космических комплексов испытательного космодрома. В случае наличия у лица принимающего решения информации о приоритетах задача выбора предпочтительного варианта применения решается с помощью лексикографического метода. Особенность этого метода заключается в выборе наиболее приоритетного показателя и сужение множества альтернатив до множества в котором максимальны значения по показателю имеющему первый приоритет. В соответствии с той же логикой множество сужается по показателям имеющим приоритет два и по показателю имеющему приоритет три находится предпочтительный вариант применения ракетно-космического комплекса. Применение указанной методики позволяет обосновать выбор предпочтительного вариант применения ракетно-космических комплексов в различных условиях обстановки.

Сведения об авторах:

¹к.т.н., доцент, докторант 101 кафедры Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, mosin-da@mail.ru

²научный сотрудник Научно-испытательного центра 1 Государственного испытательного космодрома Министерства обороны Российской Федерации, г. Мирный, Россия, dugavadim@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: испытательный космодром; ракетно-космический комплекс; ракета космического назначения; малые космические аппараты; методы многокритериальной оптимизации; метод идеальной точки; лексикографический метод.

Для цитирования: Мосин Д.А., Дуга В.В. Методика обоснования предпочтительного варианта применения ракетно-космических комплексов испытательного космодрома при решении задач запуска малых космических аппаратов // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 4-13. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10264

Введение

Основная задача космической деятельности РФ — «обеспечение гарантированного доступа России в космос со своей территории, обеспечение решения задач по использованию космических средств в интересах развития социально-экономической сферы и науки». Рассмотрим задачу обеспечения гарантированного доступа в космос, как задачу по запуску большого объема космических средств в сжатые временные рамки. Очевидно, что основным требованием в этом случае, будет повышение оперативности применения ракетно-космических комплексов (РКК). Наиболее простым ответом на вопрос о том каким образом повышать оперативность применения РКК, является создание дополнительных объектов наземной космической инфраструктуры испытательных космодромов (НКИ ИК). Вместе с тем, создание указанных объектов (технических, стартовых комплексов, заправочных станций) вариант чрезвычайно затратный и экономически оправдан лишь в случае увеличения количества пусков ракет космического назначения (РКН). Вместе с тем, в настоящее время существует тенденция по увеличению доли малых космических аппаратов (МКА) в общем количестве запускаемых КА, что положительно отражается на оперативности применения РКК [1, 8–10]. Однако, в части количества пусков РКН существует тенденция по их уменьшению, обусловлена увеличением сроков активного существования современных КА и расширением спектра решаемых каждым типом КА задач. Таким образом задача повышения оперативности усложняется требованием к минимизации затрат на реализацию вариантов повышения оперативности применения РКК. В рамках НИР «Регламент-216К» на 1 ГИК МО РФ разработана «Методика обоснования предпочтительного вариант применения РКК ИК при решении задач запуска МКА».

Методика приведенная далее «Методика обоснования...» представляет собой заключительный этап целого комплекса исследований. В рамках указанных исследований разработана «Система показателей эффективности РКК», по приведенным в данной системе показателям качества произведена оценка эффективности существующих РКК. Далее разработаны методики «Формирования массива исходных данных» [3] и «Формирования множества допустимых вариантов применения РКК» [4]. И уже имея в качестве исходных данных множество вариантов применения РКК возможно обосновать оптимальный вариант применения РКК.

Как отмечено выше, задача определения оптимального варианта применения РКК, входящих в состав ИК представляет собой многокритериальную задачу и решение данной задачи во многом зависит от области применения.

Для перехода к формализации решаемой задачи, прежде всего, дадим ее обобщенное теоретико-множественное описание. Для этого введем основные множества и отношения, перечисленные в предыдущем подразделе

ле концептуальной постановки и позволяющие описать функционирование ИК.

$A = \{a_i, i \in N^A \mid N^A = \{1, \dots, n^A\}\}$, $n^A = 28$ — множество РКН, которые должны быть подготовлены силами и средствами ИК к запуску. При этом каждая a_i РКН относится к определенному подмножеству A^l типа РКН l типа. Исходя из чего: $A = U_l A^l$.

$B = \{b_j, j \in N^B \mid N^B = \{1, \dots, n^B\}\}$, $n^B = 28$ — множество РКК в составе ИК. Тогда состав задействуемых на период подготовки РКК может быть представлен матрицей $x^B = \|x_{ij}^B\|$, элементы x_{ij}^B которой принимают значения $x_{ij}^B = 0$, если b_j РКК не задействуется в подготовке РКН a_i РКН и $x_{ij}^B = 1$, если b_j РКК задействуется в подготовке a_i РКН. Для $\forall \langle a_i, b_j \rangle$ (РКН, РКК) РКК соответствует свой набор параметров $\langle \bar{p}_{1i}, \bar{p}_{2i}, \bar{p}_{3i}, \bar{p}_{4i}, p_{5i} \rangle$, характеризующий особенности его задействования по подготовке РКН. Вектор $\bar{p}_{1i} = \|p_{1il}\|$ определяет РКН, которые могут быть подготовлены на b_j РКК, элементы p_{1jl} вектора \bar{p}_{1i} принимают значения $p_{1il} = 0$, если l тип РКН не может быть подготовлен b_j на РКК и $p_{1il} = 1$ — в противном случае.

Вектор $\bar{p}_{2i} = \left\| \begin{matrix} p_{2i1} \\ p_{2i2} \\ p_{2i3} \end{matrix} \right\|$ определяет количество персонала

необходимого для подготовки РКН соответствующей категории (1-й, 2-й и 3-й), работающего на b_j РКК.

Вектор $\bar{p}_{3i} = \|p_{3il}\|$ определяет количество топлива в b_j РКК для каждого l типа РКН.

Вектор $\bar{p}_{4i} = \left\| \begin{matrix} p_{4i1} \\ p_{4i2} \\ p_{4i3} \\ p_{4i4} \end{matrix} \right\|$ определяет состояние технической

готовности (ТГ) в котором находится составная часть РКН.

Таким образом, ИК представляет собой систему РКК, взаимосвязанных между собой единством цели.

В целом, теоретико-множественная модель планирования задействования РКК по подготовке СЧ РКН может быть представлена в виде математической структуры выбора с мультипредпочтением:

$$L(G), \Lambda_\beta, \{h_\beta^B, \beta \in \Gamma\}, \{h_\sigma^\alpha, \sigma \in \tilde{\Gamma}\}, \{F_\gamma, \gamma \in \Phi\} \quad (1)$$

где $L(G) Q(S)$ — исходная математическая структура типа S , которая определяет тип модели (статический, динамический и т.п.);

Λ_β — множество альтернатив (решений), на котором осуществляется решение задачи многокритериального выбора варианта применения НКИ ИК;

$\{h_{\sigma}^{\beta}, \vartheta \in \Gamma\}$ — множество отношений, ограничивающих выбор, к которым относятся следующие ограничения:

h_1^{β} — ресурсные (экономические) ограничения, формализующие требование к стоимости и ограниченности ресурса варианта применения НКИ ИК;

h_2^{β} — технические ограничения, формализующие требование к подготовке только одного типа СЧ РКН на местах на планируемый период времени;

h_3^{β} — технологические ограничения, формализующие требование p_3 к подготовке РКН на РКК;

$\{h_{\sigma}^{\alpha}, \sigma \in \tilde{\Gamma}\}$ — множество отношений предпочтения, связанных с рациональным выбором варианта задействования сил и средств ИК. В соответствии с проведенным военно-техническим анализом в подразделе 1.1 к показателям качества варианта задействования сил и средств ИКК относятся:

h_1^{α} — оперативность подготовки и запуска определенного количества КА;

h_2^{α} — стоимость;

h_3^{α} — ресурсоемкость.

$\{F_{\gamma}, \gamma \in \Phi\}$ — множество операторов, позволяющих задавать результирующее отношение предпочтения $h_{\text{рез}} = F_{\gamma}[\{h_{\sigma}^{\alpha}, \sigma \in \tilde{\Gamma}\}]$.

Описанные математические конструкции позволяют представить правило, в соответствии с которым осуществляется выбор рационального варианта задействования сил и средств ИК в следующем виде:

$$\omega^{ps} = \underset{\omega^r \in \Lambda_p}{\text{Argopt}} \{h_{\text{pe}}^z(\omega^r)\} \quad (2)$$

При планировании применения сложных технических систем (СТС) не редким бывает обстановка в которой у лица принимающего решения (ЛПР) нет дополнительной информации — условия полной неопределенности. Полная неопределенность в данной работе трактуется как не возможность определить, какой из показателей эффективности имеет приоритет над остальными.

В этом случае, задача решается описанным в работе [5] методом идеальной точки.

Область 1. Отсутствие у ЛПР дополнительной информации.

В случае отсутствия у ЛПР дополнительной информации схема методики выглядит следующим образом:

Шаг 1. Ввод множества допустимых вариантов применения РКК, входящих в состав ИК при решении задач запуска МКА.

В табл. 1 представлены результаты моделирования со следующими исходными данными: Необходимо запустить орбитальную группировку МКА в количестве восьми КА массой в 300 кг за промежуток времени в 90 суток. В составе ИК находятся пять РКК «Вид 1» (тип РКН 1–10), «Вид 2» (тип РКН 11), «Вид 3» (тип РКН 20), «Вид 4» (тип РКН 12–19) и РКК воздушного базирования «Вид 5» (тип РКН 21–22). В составе каждого

Таблица 1

Множество допустимых вариантов применения РКК

Номер варианта	Оперативность	Стоимость	Ресурсоемкость	Номер варианта	Оперативность	Стоимость	Ресурсоемкость
1	48,9	2168726144	8656,6874	14.	210	14306130044	1292,9926
2	210	4090521385	5607,7422	15.	437	14036877581	4341,9378
3	437	3821268922	8528,2148	16.	80,1	13189886924	1860,7923
4	80,1	2974278265	5607,7422	17.	210	12920634461	4781,2649
5	210	2705025802	8824,3421	18.	437	14842429702	1732,3197
6	437	4626821043	5207,5972	19.	80,1	23179886924	1707,331
7	75	1588782682	8528,2148	20.	210	22910634461	4627,8036
8	210	3510577923	5103,5795	21.	437	24832429702	1578,8584
9	437	5432373164	2222,289	22.	58	21794391341	4523,7859
10	48,9	11578782682	8166,7181	23.	210	23716186582	1881,8481
11	210	13500577923	4846,1005	24.	75	22599943462	1370,823
12	437	15422373164	2068,8277	25.	437	24252486240	1242,3504
13	23,45	12384334803	5117,7729				

Таблица 2

Множество допустимых вариантов применения РКК после проведения нормирования

Номер варианта	Q	S	R	Номер варианта	Q	S	R
1	0,0085109	0,0068547	0,0791086	14.	0,03655	0,0452173	0,0118159
2	0,03655	0,0129289	0,051246	15.	0,0760589	0,0443663	0,0396785
3	0,0760589	0,0120779	0,0779345	16.	0,0139412	0,0416892	0,0170047
4	0,0139412	0,0094008	0,051246	17.	0,03655	0,0408382	0,0436933
5	0,03655	0,0085498	0,0806407	18.	0,0760589	0,0469124	0,0158307
6	0,0760589	0,014624	0,0475893	19.	0,0139412	0,0732645	0,0156023
7	0,0130536	0,0050217	0,0779345	20.	0,03655	0,0724135	0,0422909
8	0,03655	0,0110959	0,0466387	21.	0,0760589	0,0784877	0,0144283
9	0,0760589	0,0171701	0,0203082	22.	0,0100948	0,0688854	0,0413403
10	0,0085109	0,036597	0,074631	23.	0,03655	0,0749596	0,0171971
11	0,03655	0,0426712	0,0442858	24.	0,0130536	0,0714315	0,0125272
12	0,0760589	0,0487454	0,0189058	25.	0,0760589	0,0766547	0,0113531
13	0,0040814	0,0391431	0,0467684				

РКК есть одно место подготовки любой составной части РКН и одно место хранения СЧ РКН в ТГ № 2. В результате формирования множества вариантов применения методом полного перебора в соответствии с методикой [11] получено указанное в табл.1 множество допустимых вариантов применения РКК. Каждому варианту применения РКК соответствует свой наряд космических средств. Каждому варианту применения соответствуют три показателя эффективности: оперативность, стоимость и ресурсоемкость.

Шаг 2. Нормирование значений показателей эффективности с условием (3)

$$f_1^H(x) = \frac{f_1(x)}{f_{\max}} \quad (3)$$

Результат проведения нормирования представлен в табл. 2.

Шаг 3. Построение множества по Парето оптимальных значений по формуле (4).

$$\Omega^* = \left\{ \omega_g \right\}, \begin{cases} Q_k \leq Q \\ S_k \leq S \\ R_k \leq R \end{cases} \quad \forall k, g \quad (4)$$

Шаг 4. Поиск координат идеальной точки Δ. Координаты идеальной точки представляют собой наименьшие значения каждого из показателей эффективности в рамках

указанного в табл. 2 множества вариантов применения РКК. Координаты идеальной точки отражены в табл. 3.

Таблица 3

Координаты идеальной точки

Q	S	R
0,05366133	0,064	0,1408

Шаг 5. Расчёт расстояния каждого варианта применения РКК до идеальной точки по формуле (5).

$$\Delta = \sqrt{(Q - Q^*)^2 + (S - S^*)^2 + (R - R^*)^2} \quad (5)$$

Шаг 6. Определение предпочтительного варианта применения НКИ ИК по кратчайшему расстоянию от идеальной точки. Значения рассчитанных расстояний до идеальной точки и выбор предпочтительного варианта применения РКК приведен в табл. 4.

Таким образом, в указанном множестве оптимальным вариантом применения РКК является вариант 4. Варианту 4 соответствует следующий наряд космических средств. РКК «Вид 1» (Тип РКН 1) — ТГ2-1, (Тип РКН 1) — в состоянии поставки -1; РКК «Вид 2» (Тип РКН 11) — ТГ2-1, РКК «Вид 3» (Тип РКН 20) — ТГ2-1.



Таблица 4

Множества вариантов применения РКК с расстояниями до идеальной точки

Номер варианта	Q	S	R	Δ
1	0,1118993	0,0873344	0,9810009	0,7098969
2	0,4805492	0,161725	0,6354856	0,3331694
3	1	0,1538822	0,966442	1,3612767
4	0,1832952	0,119774	0,6354856	0,26464484
5	0,4805492	0,1089312	1	0,7384749
6	1	0,1863217	0,59014	1,1124426
7	0,1716247	0,0639802	0,966442	0,69562197
8	0,4805492	0,1413707	0,5783524	0,37721797
9	1	0,2187612	0,2518362	0,93184602
10	0,1118993	0,4862767	0,9254761	0,6191290
11	0,4805492	0,5436672	0,5491741	0,5791131
12	1	0,6210578	0,2132565	1,2111443
13	0,0536613	0,4987162	0,5799603	0,3818693196
14	0,4805492	0,5761067	0,1465257	0,4415396
15	1	0,565264	0,4920141	1,2702219757
16	0,1832952	0,5311557	0,2108701	0,3051415456
17	0,4805492	0,5203129	0,3418268	0,551305899
18	1	0,5761067	0,1963115	1,160913526
19	0,1832952	0,9334522	0,1934797	0,77556307
20	0,4805492	0,9226095	0,244361	1,806666432
21	1	1	0,1789208	1,77314428
22	0,1327231	0,8776584	0,3126485	0,80099848
23	0,4805492	0,955089	0,2132565	0,98148868
24	0,1716247	0,910098	0,1553456	0,74438956
25	1	0,9766457	0,1407867	1,72851523

Графически, поиск расстояния до идеальной точки представлен на рис. 1.

Схема первой области методики представлена на рис. 2. Область 2. Наличие у ЛПР информации о приоритетах.

В случае наличия у ЛПР информации о приоритетах задача выбора предпочтительного варианта применения решается с помощью лексикографического метода описанного в работе [14–15].

При решении лексикографических задач, в настоящее время разработан ряд методов, наиболее известными из них являются: метод жесткого приоритета; последовательных уступок; установления порогов сравнимости, ранжирования критериев, решающих правил.

Для решения задачи обоснования предпочтительного варианта применения РКК ИК наиболее подходящим является метод жесткого приоритета.

Процедура решения многокритериальной задачи этим методом заключается в том, что все частные критерии располагают и нумеруют в порядке их относительной важности, определяемой на основании оценок экспертов; оптимизируют первый, наиболее важный критерий; однако в отличие от метода последовательных уступок, величина допустимого отклонения не назначается. Далее оптимизируют второй по важности частный критерий при условии, что значение первого критерия не должно отличаться от оптимального; далее подобным же образом по-

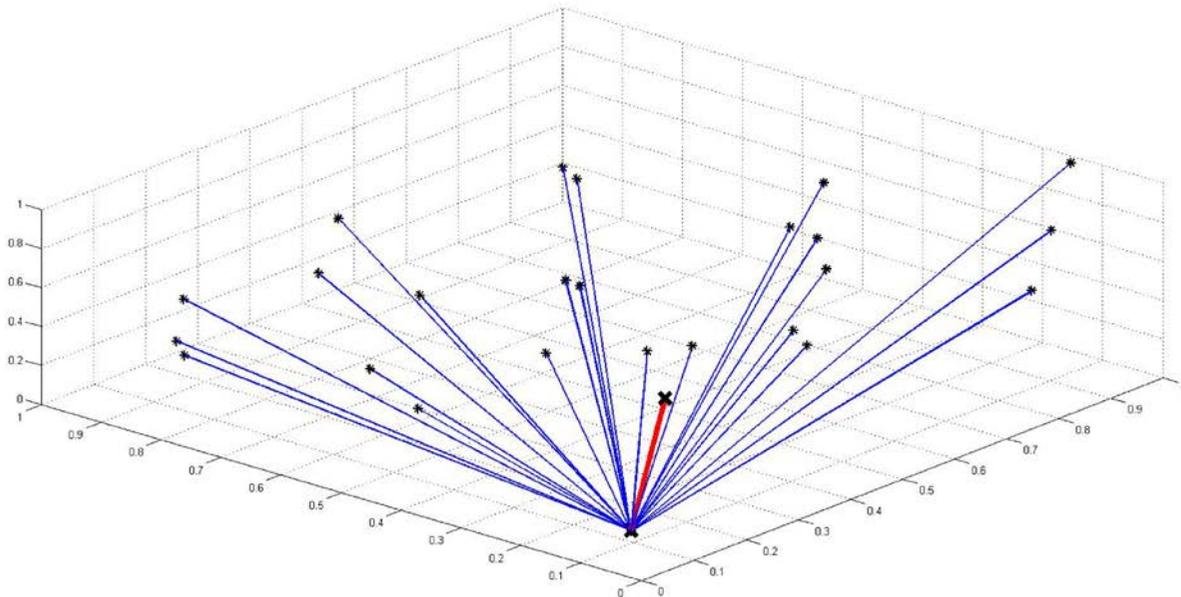


Рис. 1. Поиск кратчайшего расстояния до идеальной точки

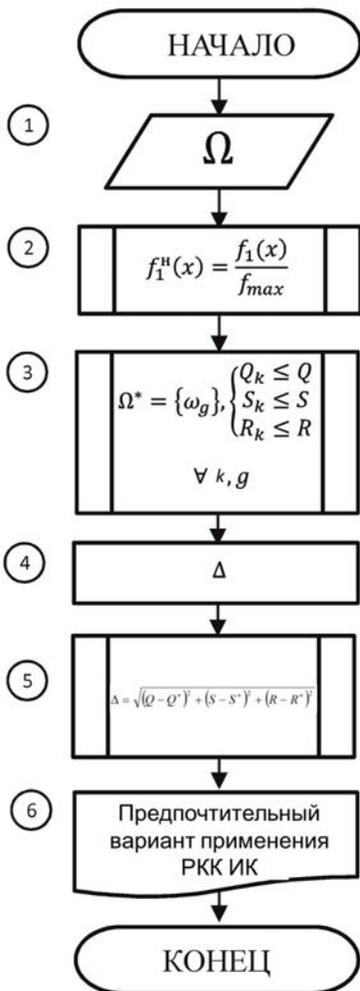


Рис. 2. Схема первой области применения «Методики обоснования...»

очередно используются все остальные частные критерии. Оптимальным считается любое значение вектора x , полученное при решении задачи отыскания условного оптимума последнего по важности критерия.

Допустим, что показатели эффективности применения РКК имеют следующие приоритеты: $Q-1, R-2, S-3$, тогда решение задачи обоснования предпочтительного варианта применения РКК ИК методом жесткого приоритета возможно представить следующим образом.

Предпочтительный вариант применения РКК ИК ω^p принадлежит множеству допустимых вариантов применения ω

$$\omega^p \in \omega, \quad \omega \in (\omega^1, \dots, \omega^n)$$

Каждый вариант применения оценивается по трем показателям: оперативность Q , ресурсоемкость R и стоимость S

$$\omega^p = (Q^p R^p S^p)$$

Вариант применения ω^p предпочтительнее варианта применения ω_1 , то есть

$$\omega^p > \omega_1$$

в случае, если выполняется одно из условий:

$$Q_1(\omega^p) > Q_1(\omega^1)$$

$$Q_1(\omega^p) = Q_1(\omega^1), \quad Q_2(\omega^p) > Q_2(\omega^1)$$

...

$$Q_m(\omega^p) = Q_m(\omega^1), \quad m \in [1, r-1], \quad Q_w(\omega^p) > Q_w(\omega^1)$$

$$w \in \{W\}$$

$$R_1(\omega^p) > R_1(\omega^1)$$

$$R_1(\omega^p) = R_1(\omega^1), R_2(\omega^p) > R_2(\omega^1)$$

...

$$R_m(\omega^p) = R_m(\omega^1), m \in [1, r-1], R_w(\omega^p) > R_w(\omega^1)$$

$$w \in \{W\}$$

$$S_1(\omega^p) > S_1(\omega^1)$$

$$S_1(\omega^p) = S_1(\omega^1), S_2(\omega^p) > S_2(\omega^1)$$

...

$$S_m(\omega^p) = S_m(\omega^1), m \in [1, r-1], S_w(\omega^p) > S_w(\omega^1)$$

$$w \in \{W\}$$

Для удобства, решение указанной задачи возможно записать с помощью формулы (6)

$$\omega^* = \arg \min S(\arg \min R(\arg \min Q(\omega_k))) \quad (6)$$

Шаг 1 и Шаг 2 повторяют аналогичные в первой области.

Шаг 3. Нахождение максимальных (минимальных) значений показателей эффективности.

3.1. Определение приоритетного показателя. Выбор вариантов применения у которых выбранный показатель максимальный (минимальный).

3.2. Определение второго по приоритетности показателя эффективности. Из множества получившегося в результате шага 3.1 выбор вариантов в которых максимально (минимально) значение показателя 2.

3.3. Определение третьего по приоритетности показателя эффективности. Из множества получившегося в результате шага 3.2 выбор вариантов в которых максимально (минимально) значение показателя 2.

При проведении экспериментального моделирования с разными массивами исходных данных выявлено, что возможны случаи, когда наряд космических средств разный, а значение показателей эффективности одинаковое. Этот факт говорит о необходимости иметь возможность выбирать из таких вариантов. Для этого введем уже использованную ранее характеристику РКН — вероятность успешного пуска. Вероятность успешного пуска статистическая величина и рассчитывается как отношение успешных пусков к не успешным. На настоящий момент указанная величина не определена для основного большинства отечественных РКН, однако в дальнейшем ситуация с количеством пусков, как исходным материалом для статистических исследований надежности улучшится и об этой величине возможно будет судить достоверно. Для реше-

ния задачи принято допущение. Выбрано три группы вероятности успешного пуска. 1. Вероятность — 0,996 применима к РКН у которых был осуществлен хотя бы один успешный пуск. 2. Вероятность — 0,991 применима к РКН составные части которой участвовали хотя бы в 1 успешном пуске. 3. Вероятность — 0,974 применима к РКН находящимся на стадии проектирования.

Таким образом, если после Шага 3 остается более одного варианта следуем к Шагу 4. В случае если остается один вариант принимаем его в качестве предпочтительного.

Шаг 4. Выбираем из множества вариантов вариант с наибольшей вероятностью успешного пуска.

Схема методики в области 2 представлена на рис. 3.

При расчёте примера с указанными исходными данными, предпочтительным вариантом является Вариант 13, которому соответствует следующий наряд космических средств: РКК «Вид 1» (РКН Тип 1)– ТГ2–1, РКК «Вид 2»

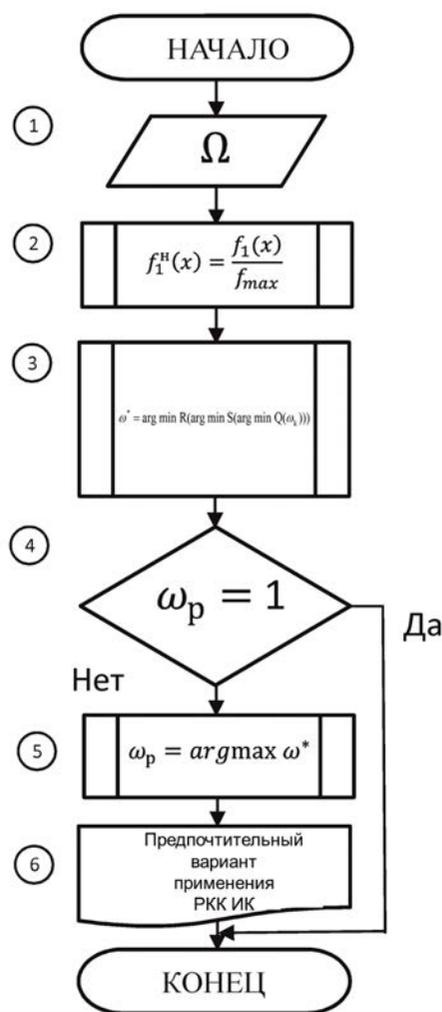


Рис. 3. Схема второй области применения «Методики обоснования...»



(РКН Тип 11) — ТГ2–1, РКК «Вид 3» (РКН Тип 20) — ТГ2–1, РКК «Вид 5» РКН (Тип 21) — ТГ2–1.

Заключение

В заключении необходимо отметить, что применение указанной методики позволяет обосновывать предпочтительный вариант применения не только в условиях наличия у ЛПР предпочтений лексикографическим методом, но и в условиях отсутствия предпочтений, критериальной неопределенности.

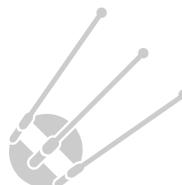
Разработанная в рамках реализации данного научно-методического аппарата программа, на настоящий момент успешно функционирует в качестве системы поддержки принятия решения в НИЦ информационно-аналитического обеспечения космодрома «Плесецк».

Литература

1. Горбунов А. В., Слободской И. Н. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус — В» // Геоматика. 2010. № 1. С. 30–33.
2. Горбунов В. М. Теория принятия решений. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 174 с.
3. Дуга В. В. Частная методика формирования массива исходных данных для оценивания эффективности применения наземной космической инфраструктуры испытательного космодрома // Информация и космос. 2018. № 2. С. 170–172.
4. Дуга В. В., Мосин Д. А., Банников Е. В. Методика формирования множества допустимых вариантов применения наземной космической инфраструктуры испытательного космодрома при решении задач запуска малых космических аппаратов // Информация и космос. 2018. № 4. С. 159–163.
5. Захаров И. Г. Обоснование выбора. Теория практики. СПб.: Судостроение, 2006. 528 с.
6. Ключников В. Ю. Анализ перспективных технологий наращивания и восполнения орбитальных группировок малоразмерных // Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные про-

блемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники» (Санкт-Петербург, 13–14 декабря 2018 г.). СПб.: Изд-во ВКА имени А. Ф. Можайского, 2018. С. 26–29.

7. Коротков В. В., Виноградов А. В. История становления «Малого» космоса на космодроме «Плесецк». Проблемы дальнейшего развития на современном этапе // Вестник СГАУ. 2009. № 4(20). С. 57–64.
8. Костев Ю. В., Мезенова О. В., Позин А. А., Шершаков В. М. Система запуска малых космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 6. С. 482–488.
9. Лата В. Ф., Мальцев В. А. Система систем. Информационно-ударное оружие // Индекс безопасности. 2007. Т. 13. № 3 (83). С. 101–119.
10. Макриденко Л. А., Волков С. Н., Ходненко В. П. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2010. Т. 114. С. 15–26.
11. Мосин Д. А., Банников Е. В., Дуга В. В. Методика формирования множества допустимых вариантов применения наземной космической инфраструктуры испытательного космодрома при решении задач запуска малых космических аппаратов // Информация и космос. 2018. № 4. С. 159–163.
12. Москвин Б. В. Теория принятия решений. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2014. 364 с.
13. 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-polozhenija-osnov-gosudarstvennoi-politiki-rossiiskoi-federatsii/> (дата обращения 15.09.2018).
14. Сафонов В. В. Основы системного анализа: Методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования: Монография. Саратов: Научная книга, 2009. 329 с.
15. Соломатин А. Н., Соколова И. И. Методы принятия решений. М.: МИИТ. 2002. 120 с.





METHOD OF JUSTIFICATION OF A PREFERRED EMBODIMENT OF THE APPLICATION OF ROCKET-SPACE SYSTEMS TESTING SPACEPORT IN SOLVING PROBLEMS THE LAUNCH OF SMALL SATELLITES

MOSIN DMITRY ALEXANDROVICH,
St.-Petersburg, Russia, sin-da@mail.ru

DUGA VADIM VADIMOVICH,
Mirny, Russia, dugavadim@mail.ru

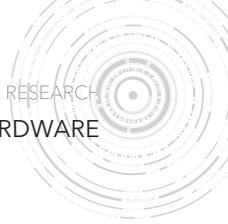
KEYWORDS: test spaceport; rocket and space complex; space rocket; small satellites; multi-criteria optimization methods; ideal point method; lexicographic method.

ABSTRACT

The work presents a technique that allows the decision – maker to justify the choice of the preferred option of using rocket and space systems that are part of the test spaceport in the absence of preferences (criterion uncertainty), and in cases of preferences. Each variant of the rocket and space complex application is evaluated by three indicators: efficiency, cost, resource intensity. As input data for the method applied a set of valid options for use of missile-space complexes, obtained through the scientific methodological apparatus developed earlier. Depending on these conditions, the problem of justification of the preferred application is solved in two areas. In the absence of the decision-maker's preferences, the problem of choosing the preferred application of the rocket and space complex is solved by the method of the ideal point, in the absence of the decision – maker's preferences, this problem is solved by the lexicographic method. In solving this problem in the first area, each variant of the rocket and space complex is represented by a point in the finite-dimensional Hilbert space. Next is the ideal point as a point in space having the coordinates found as a set of the smallest values of the represented set. Next, the distance between each of the set of points and the preferred option of using rocket and space complexes of the test spaceport is calculated. If the decision-maker has information about priorities, the problem of choosing the preferred application option is solved using the lexicographic method. The peculiarity of this method is to select the highest priority indicator and narrowing the set of alternatives to the set in the court, the maximum values for the indicator having the first priority. In accordance with the same logic, the set is narrowed in terms of priority two and in terms of priority three, the preferred use of the rocket and space complex is found. Application of the specified technique allows to justify the selection of a preferred option of application of rocket-space complexes in different circumstances.

REFERENCES

1. Gorbunov A.V., Slobodskoy I.N. «Canopus-B» space complex for operative monitoring technogenic and natural emergencies. *Geomatics*. 2010. No. 1. Pp. 30-33. (In Russian)
2. Gorbunov V.M. *Teoriya prinyatiya resheniy* [Decision Theory]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2010. 174 p. (In Russian)
3. Duga V.V. Private method of formation of the initial data array for evaluation of the effectiveness of the ground space infrastructure of the test spaceport. *Information and space*. 2018. No. 2. Pp. 170-172. (In Russian)
4. Duga V.V., Mosin D.A., Bannikov E.V. Methods of formation of a set of acceptable options for the use of ground-based space infrastructure of the test spaceport in solving problems of launching small satellites. *Information and space*. 2018. No. 4. Pp. 159-163. (In Russian)
5. Zakharov I.G. *Obosnovanie vybora. Teoriya praktiki* [Rationale for the selection. Theory of practice]. St. Petersburg: Shipbuilding, 2006. 528 p. (In Russian)
6. Klyushnikov V.Y. Analiz perspektivnykh tekhnologiy narashchivaniya i vospolneniya orbital'nykh gruppirovok malorazmernykh [Analysis of perspective technologies of augmentation and replenishment of orbital groups of small size]. *Sbornik statey IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennye problemy sozdaniya i ekspluatatsii vooruzheniya, voennoy i spetsial'noy tekhniki"* [Proceedings of the IV all-Russian scientific and practical conference "Modern problems of creation and operation of arms, military and special equipment", St. Petersburg, December 13-14, 2018]. St. Petersburg: GCA named after A.F. Mozhaysky, 2018. Pp. 26-29 (In Russian)
7. Korotkov V.V., Vinogradov A.V. History of small space vehicle progress and development at Plesetsk cosmodrome. Current problems of further development. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara State Aerospace University]. 2009. No. 4 (20). Pp. 57-64. (In Russian)



8. Kostev Yu. V., Mezenova O.V., Pozin A.A., Shershakov V.M. Small spacecraft launching system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2016. Vol. 59. No. 6. Pp. 482-488. (In Russian)
9. Lata V.F., Maltsev V.A. System of systems. Information-shock weapons. *Security Index*. 2007. Vol. 13. No. 3 (83). Pp. 101-119. (In Russian)
10. Makridenko L.A., Volkov S.N., Khodnenko V.P., Zolotoy S.A. Conceptual problems on creation and application of small spacecraft. *Electromechanical matters. VNIIEM studies*. 2010. Vol. 114. Pp. 15-26. (In Russian)
11. Mosin D.A., Bannikov E.V., Duga V.V. The method of formation of a set of acceptable options for the use of the ground space infrastructure of the test spaceport in solving the problems of launching small satellites. *Information and space*. 2018. No. 4. Pp. 159-163. (In Russian)
12. Moskvina, B.W. *Teoriya prinyatiya resheniy* [The theory of decision making]. St. Petersburg: VKA named after A.F. Mozhaisky Publ., 2014. 364 p. (In Russian)
13. 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 the future. Approved. The President of the Russian Federation of 19.04.2013 N PR-906]. *Zakony, kodeksy i normativno-pravovye akty v Rossiyskoy Federatsii* [Laws, codes and normative legal acts in the Russian Federation]. 2019. URL: <http://legalacts.ru/doc/osnovnye-polozheniya-osnov-gosudarstvennoi-politiki-rossiiskoi-federatsii/> (date of access: 15.09.2018). (In Russian)
14. Safonov V.V. *Osnovy sistemnogo analiza: Metody mnogovektornoj optimizatsii i mnogovektornogo ranzhirovaniya: Monografiya* [The Fundamentals of systems analysis: Methods for multidimensional optimization and multidimensional ranking: a Monograph]. Saratov: Nauchnaya kniga, 2009. 329 p. (In Russian)
15. Solomatin A.N., Sokolova I.I. *Metody prinyatiya resheniy* [Decision-making methods]. M: Engineering, 2002. 120 p. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Mosin D. A., PhD, Docent, Doctoral Candidate of the Military Space Academy;

Duga V. V., the scientific officer of the research and test center, 1 State test spaceport Ministry of defense of the Russian Federation.

For citation: Mosin D.A., Duga V.V. Method of justification of a preferred embodiment of the application of rocket-space systems testing spaceport in solving problems the launch of small satellites. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 3. Pp. 4-13. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10264 (In Russian)





doi: 10.24411/2409-5419-2018-10265

ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ИЗМЕРЕНИИ УРОВНЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ВТОРИЧНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ПОМЕХ ОТ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

БАБАНОВ**Николай Юрьевич¹****КОРСАКОВ****Сергей Сергеевич²****ЛАРЦОВ****Сергей Викторович⁴****САМАРИН****Валерий Павлович³****Сведения об авторах:**

¹д.т.н., доцент, проректор по научной работе Нижегородского технического университета им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия, babanov@nntu.ru

²аспирант Ивановского государственного университета, Нижний Новгород, Россия, sskorsakov@yandex.ru

³д.т.н., профессор, главный инженер проектов акционерного общества «Гипрогазцентр», ведущий научный сотрудник Нижегородского технического университета им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия, svl@ggc.nnov.ru

⁴к.т.н., доцент, старший научный сотрудник Нижегородского технического университета им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия, vpsamarin@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Некоторые электронные устройства при облучении внешним полем обладают способностью формировать рассеянный сигнал, который в широкой полосе частот оказывается помехой для близлежащей радиоприёмной аппаратуры. При организации экспериментального измерения параметров, рассеянного такими нелинейными объектами поля возникает необходимость калибровки радиолокационного измерительного стенда. Для этого может быть использован эталон – пассивный нелинейный отражатель с известной эффективной поверхностью рассеяния, способный формировать интенсивный рассеянный сигнал в достаточно широкой полосе частот, либо несколько эталонных нелинейных отражателей с более узкими рабочими полосами для обеспечения диапазонных измерений. Предложена конструкция эталонного нелинейного отражателя, применимого для калибровки широкополосных нелинейных радиолокационных измерительных стендов и описана процедура калибровки. Предложенная конструкция представляет собой широкополосную антенну, известную как антенна «бабочка», нагруженную на туннельный диод. Исходя из необходимости функционирования в широкой полосе частот, выбраны оптимальные габаритные параметры антенной части. Представлена эквивалентная радиотехническая схема эталона и построена соответствующая ей математическая модель. На основе математической модели проведён численный эксперимент, в результате которого построены амплитудные характеристики и калибровочные амплитудно-частотные характеристики эталона в широкой полосе частот. На полученных амплитудных характеристиках установлено присутствие характерных точек (точек экстремума функции), что подтверждает возможность применения предложенной конструкции нелинейного отражателя в качестве эталона при выполнении описанной процедуры калибровки. Обоснована его применимость, как для радиолокационных измерительных стендов, с пространственным совмещением передающей и приёмной антенн, так и для стендов с разнесёнными антеннами, что может быть важно для организации экспериментальных исследований пространственных свойств нелинейных объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: плоский дипольный нелинейный рассеиватель; антенна «бабочка»; метод реального эталона.

Для цитирования: Бабанов Н.Ю., Корсаков С.С., Ларцов С.В., Самарин В.П. Об экспериментальном измерении уровня интенсивности вторичных нелинейных помех от электронных устройств с полупроводниковыми элементами // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 14-25. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10265

Введение

Существенной группой помех связным радиоэлектронным системам являются так называемые нелинейные помехи [1], вызванные переизлучением облучающего сигнала на частотах его нелинейных продуктов — гармониках или комбинационных составляющих. Источниками нелинейных помех являются устройства, содержащие в своем составе радиоэлектронные компоненты, такие как диоды, транзисторы, микросхемы.

Процесс появления нелинейных помех связан с тем, что при облучении на проводящих частях электронных схем наводятся токи, которые искажаются при прохождении через полупроводниковые приборы и обогащаются нелинейными продуктами. В результате по проводящим частям электронных схем протекают токи на частотах нелинейных продуктов, которые вызывают излучение в окружающее пространство сигнала на частотах гармоник или комбинационных составляющих облучающего сигнала. Указанный процесс получил название эффекта нелинейного рассеяния радиоволн и исследуется в рамках проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС).

Соответственно одной из задач ЭМС является тестирование радиоэлектронных устройств и бытовых приборов на способность к нелинейному рассеянию.

Такое тестирование целесообразно выполнять в установках нелинейного зондирования [2–4] (УНЗ). Структурная схема такой установки представлена на рис. 1. Функционально УНЗ строится по тому же по принципу, что и нелинейные радиолокаторы [5–7]. Принципиальным отличием УНЗ от нелинейных радиолокаторов является исследование поля, рассеянного объектом, содержащим нелинейные компоненты, на частотах нелинейных продуктов облучающего сигнала (ОС) во всех направлениях, а не только в направлении облучения (или близком к нему направлении). Для этого приёмная и излучающая антенны УНЗ разнесены в пространстве, а в ходе экспериментов учитывается как положение/ориентация исследуемого объекта относительно фронта волны облучающего поля, так и его положение/ориентация относительно антенны УНЗ, принимающей ОС.

Общая методика измерений предполагает: размещение и настройку радиоаппаратуры (генератор ЗС, антенна излучения ЗС, антенна принимаемого сигнала (ПС) от исследуемого объекта, приёмник ПС, измерительное оборудование); размещение объекта исследования на некотором удалении от антенн; облучение объекта ЗС и анализ ПС. Перед выполнением измерения параметров исследуемого объекта необходимо выполнить калибровку радиолокационного измерительного стенда. Для этого исследуемый объект в зоне облучения заменяется некоторым эталонным отражателем с известной эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР — $\sigma_{\text{э}}$) и регистрируются соответствующие

излучаемая мощность ЗС — $P_{\text{ЗСэт}}$ и мощность ПС — $P_{\text{ПСэт}}$. После этого эталонный отражатель изымается из зоны облучения и на его месте размещается исследуемый объект, который облучает ЗС мощностью — $P_{\text{ЗСоб}}$, достаточной для хорошей фиксации (хорошее соотношение сигнал/шум) уровня мощности ПС — $P_{\text{ПСоб}}$. В результате, по известному значению ЭПР эталона $\sigma_{\text{э}}$ и вышеуказанным значениям мощности оказывается возможным, практически, без влияния шумов, определить ЭПР реального объекта $\sigma_{\text{об}}$:

$$\sigma_{\text{об}} = \frac{\sigma_{\text{э}} \cdot P_{\text{ЗСэт}} \cdot P_{\text{ПСоб}}}{P_{\text{ЗСоб}} \cdot P_{\text{ПСэт}}} \quad (1)$$

Подобный подход к калибровке основан на принципе взаимности, предполагающего равенство потерь сигналов на пути распространения радиолокатор — эталонный отражатель и обратно при совмещении приемной и передающей антенны радиолокатора, а $\sigma_{\text{об}}$ является инвариантом относительно $P_{\text{ЗС}}$.

Теоретически, любой объект с известной ЭПР [2] может быть использован в качестве эталона. Перед исследователями стоит задача выбора подходящей конструкции эталона для калибровки конкретного стенда, т.е. конструкции, способной при заданном ЗС формировать ПС достаточной интенсивности и достаточной выраженности иных исследуемых характеристик. Эталонные отражатели обычно выполняют в виде хорошо изученных антенных конструкций — дипольная, шарообразная, рамочная, уголкового.

Для калибровки нелинейных стендов, содержащих нелинейные радиолокаторы, целесообразно использовать и нелинейные эталоны [8–9] (рис. 1), что определяет задачу создания таких эталонных нелинейных отражателей и расчета их характеристик [10]. Для нелинейного эталона принципиальной является способность формировать достаточно интенсивный ответный сигнал (ОС) на частотах гармоник или субгармоник ЗС (при монохроматическом ЗС), либо на комбинационных частотах [11] (при наличии в спектре ЗС нескольких составляющих). Это подразумевает наличие в составе эталонного рассеивателя полупроводниковых приборов [12–13] или контактов металл-окисел-металл, с нелинейными электромагнитными свойствами [3, 7].

На рис. 1 обозначено: $P_{\text{ис}}$ — мощность излученного ЗС, $G_{\text{НА}}$ — коэффициент усиления излучающей антенны, $\Pi_{\text{ис}}$ — плотность потока мощности волны излученного ЗС на расстоянии 1 метр от излучающей антенны нелинейного радиолокатора, $\Pi_{\text{ЗС}}$ — плотность потока мощности волны ЗС в месте расположения нелинейного рассеивателя, $\Pi_{\text{ОС}}$ — плотность потока мощности волны ОС на частоте второй гармоники ЗС формируемой нелинейным рассеивателем на расстоянии 1 метр, $\Pi_{\text{ПС}}$ — плотность потока

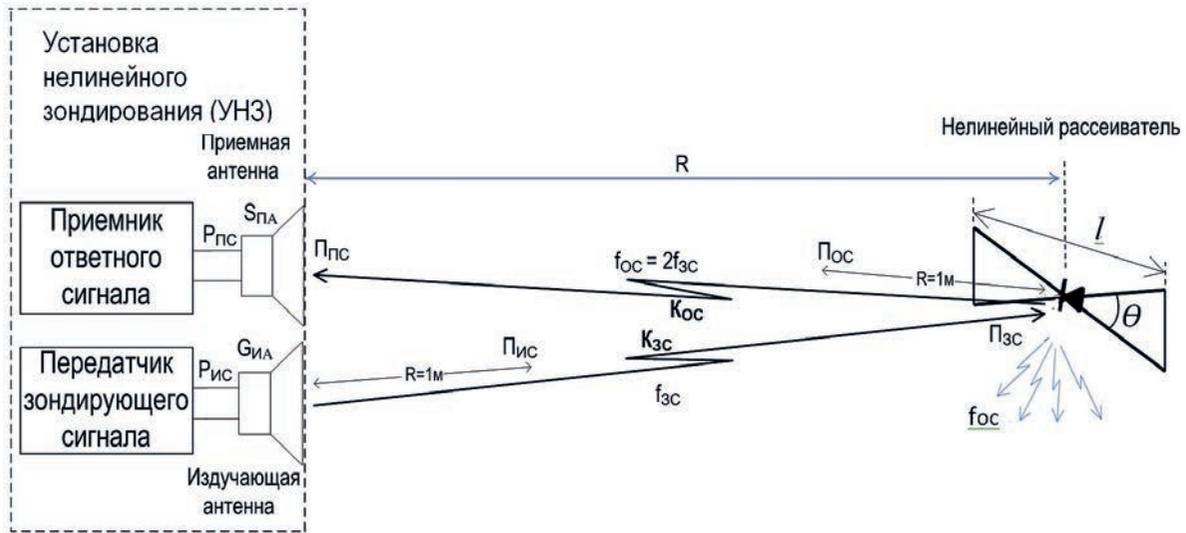


Рис. 1. Схема нелинейного взаимодействия радиолокатора и рассеивателя

мощности волны ОС, падающей на приемную антенну нелинейного радиолокатора, $S_{ПА}$ — эффективная площадь приемной антенны, $P_{Пс}$ — мощность принимаемого ОС, $K_{Зс}$ — коэффициент распространения ЗС на пути нелинейный радиолокатор — нелинейный рассеиватель, $K_{Ос}$ — коэффициент распространения ОС на пути нелинейный рассеиватель — нелинейный радиолокатор, l — длина антенной части нелинейного рассеивателя, θ — угол раскрытия антенны.

Принципиальные отличия измерений на нелинейном стенде от линейного случая состоят в следующем: в нелинейной радиолокации не выполняется принцип взаимности, то есть в общем случае $K_{Зс} \neq K_{Ос}$; параметры целей и, прежде всего, нелинейной ЭПР σ_n , зависят от уровня мощности ЗС [11]:

$$\sigma_n = \sigma_n(P_{Зс}) = 4\pi P_{Ос} / P_{Зс} \quad (2)$$

В «линейной радиолокации» в качестве искомой величины, характеризующей отражательные свойства цели, используется ЭПР, а в нелинейной радиолокации для описания свойств отражения необходимо определить зависимость (2). Принципиальным моментом является то, что в нелинейной радиолокации кроме вычисления нелинейной ЭПР σ_n необходимо определять соответствующее ей значение плотности потока мощности волны ЗС, облучающей нелинейный рассеиватель $P_{Зс}$. Несколько упростить ситуацию может использование амплитудной характеристики (АХ) [14] вместо нелинейной ЭПР σ_n :

$$P_{Ос} = F_1(P_{Зс}). \quad (3)$$

которая является более понятной с точки зрения описания свойств и более удобной с точки зрения проведения измерений. Необходимо отметить, что нелинейная ЭПР σ_n зависит от тех же величин, что и АХ, а именно ПОС и ПЗС:

$$\sigma_n(P_{Зс}) = 4\pi P_{Ос} / P_{Зс} = 4\pi F_1(P_{Зс}) / P_{Зс}. \quad (4)$$

Таким образом, использование метода замещения для измерения параметров и характеристик целей нелинейной радиолокации предполагает определение входящих в (3) величин для некоторого эталона, для которого функция F_1 известна заранее, и последующее определение подобной функции для исследуемого объекта с учетом данных, полученных для эталона. В ряде публикаций [9–10], [15] предлагалось использовать в качестве эталонов нелинейные излучатели с полупроводниковым диодом в нагрузке.

Процесс калибровки представляется следующим. При измерениях необходимо варьировать уровень излучаемой мощности $P_{Ис}$ и фиксировать при этом мощность принимаемого сигнала $P_{Пс}$. При этом будет получена некоторая функциональная зависимость:

$$P_{Пс} = F_2(P_{Ис}). \quad (5)$$

Переход от зависимости (5) непосредственно к АХ (3) возможен в том случае, если известны коэффициенты распространения:

$$K_{Зс} = P_{Ис} / P_{Зс}, \quad (6)$$

$$K_{Ос} = P_{Пс} / P_{Ос}, \quad (7)$$

определение которых и является целью калибровки. Практически это означает, что процесс измерения методом замещения предполагает предварительное измерение интенсивности волны ЗС, облучающей измеряемый объект или эталон [15,10] и нахождение величины (6), связывающей излучаемую мощность ЗС $P_{ис}$ и величину интенсивности волны облучающего ЗС $\Pi_{зс}$. По принятой классификации [4] данный подход следует отнести к промежуточному методу измерений радиолокационных целей между методом реального и косвенного эталона. В то же время авторы описанного выше способа утверждают, что выполнено одно из важных условий реализации метода реального эталона — теоретический расчет характеристик эталонного нелинейного рассеивателя.

Известен способ [16], позволяющий более точно реализовать для случая нелинейного рассеяния метод реального эталона, исключая процедуру измерения интенсивности волны ЗС в месте расположения объекта. Этот способ основан на применении нелинейного рассеивателя с характерной точкой на АХ [16–18], т. е. точкой, в которой описывающая АХ функция или ее производная испытывает скачек или содержит экстремум. Нелинейный рассеиватель с характерной точкой на АХ обычно представляет собой антенну с нелинейной нагрузкой [19] со сложным нелинейным элементом в нагрузке, например сборкой различных диодов или диодом, содержащим несколько $p-n$ переходов в своем составе, в частности, туннельные или обращенные диоды [14]. В качестве примера АХ, содержащих характерные точки, представлены (рис. 2) АХ нелинейных рассеивателей — проволочных полуволновых диполей, нагруженных на диоды ГИ401 и 1И103.

Наличие характерной точки на АХ позволяет вычислить коэффициенты распространения (6) и (7) по снятым значениям (получение зависимости (5)) для эталонного рассеивателя. В результате чего можно привести в соответствие значения $P_{иск}^*$ и $\Pi_{оск}^*$, а так же $P_{иск}^*$ с $\Pi_{зск}^*$.

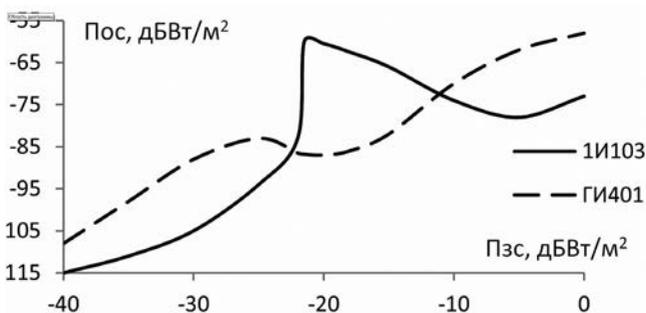


Рис. 2. Примеры АХ дипольных нелинейных рассеивателей, нагруженных на диоды ГИ401 и 1И103

В результате процедура калибровки ничем не отличается от процедуры измерения АХ неизвестного нелинейного рассеивателя:

1. Первоначально на измерительный стенд устанавливается калибровочный нелинейный рассеиватель с характерной точкой на АХ и измеряется зависимость $P_{пск}$ от $P_{иск}$.
2. В зависимости $P_{пск}$ от $P_{иск}$ выявляется характерная точка со значениями $P_{пск}^*$ от $P_{иск}^*$.
3. На АХ калибровочного нелинейного рассеивателя выявляется аналогичная характерная точка в которой определяются значения $\Pi_{оск}^*$ и $\Pi_{зск}^*$.
4. Определяются калибровочные коэффициенты:

$$K_{зс} = P_{иск}^* / \Pi_{зск}^*, K_{ос} = P_{пск}^* / \Pi_{оск}^*$$

5. Устанавливают на измерительный стол новый измеряемый нелинейный рассеиватель и определяют для него зависимость: $P_{исоб} = F_2(P_{исоб})$,
6. Измеренную зависимость преобразуют на АХ нелинейного рассеивателя:

$$\Pi_{особ} = F_2(K_{зс} \Pi_{зс об}) / K_{ос} = F_1(\Pi_{зс об}). \quad (8)$$

Использование нелинейного рассеивателя с характерной точкой на АХ в качестве эталона позволяет реализовать метод замещения при измерениях параметров нелинейного рассеяния. Однако, до настоящего времени они не нашли широкого применения, и в основном используется метод косвенного эталона [17, 4].

По мнению авторов, это связано с тем, что не решены две важные задачи: 1) описанные до настоящего времени в литературе нелинейные рассеиватели с характерной точкой на АХ были узкополосными дипольными нелинейными рассеивателями, что предполагало наличие не одного, а целого ряда эталонных дипольных нелинейных рассеивателей для обеспечения диапазонных измерений; 2) не существовало метода теоретического расчёта характеристик дипольных нелинейных рассеивателей с характерной точкой на АХ. Решением указанных задач может быть конструкция широкополосного дипольного нелинейного рассеивателя с характерной точкой на АХ, подкреплённая методикой расчёта его АХ.

Анализ свойств широкополосного дипольного нелинейного рассеивателя с характерной точкой в амплитудной характеристике

В настоящее время известны только дипольные нелинейные рассеиватели с характерной точкой на АХ. Поэтому в первую очередь целесообразно рассмотреть возможность использования широкополосных дипольных излучателей. Хорошие характеристики с этой точки зрения можно ожидать от плоских и биконических антенных

излучателей. Данные излучатели просты для технической реализации, для них есть хорошо развитая теория [20], они хорошо апробированы в нелинейной радиолокации [21], [22] для задач моделирования свойств объектов и проверки работоспособности нелинейных радиолокаторов. В данной работе будет рассматриваться плоский излучатель, представляющий собой два равнобедренных треугольника (см. рис. 1). Данная антенная конструкция известна также под названием антенна «бабочка» или в англоязычной литературе «butterfly», «bowtie», «batwing». Поиск решения поставленной задачи будет происходить на основе исследования свойств плоского дипольного нелинейного рассеивателя (ПДНР), нагруженного на диод с несколькими $p-n$ переходами, в частности, туннельными или обращенными диодами.

В настоящее время для антенны бабочки известна методика расчёта коэффициента усиления и входного сопротивления в широкой полосе [20]. Рассматриваемая симметричная плоская дипольная антенна состоит из двух равных треугольных частей, направленных друг к другу вершинами, между которыми подключается нагрузка. Общая длина антенны l , а углы раскрыва при нагрузке — θ . Согласно [20] входное сопротивление, коэффициент укорочения и частотный интервал такой антенны определяются углом раскрыва θ . Большую ширину полосы частот в дециметровом диапазоне волн обеспечивают углы θ от 60° до 80° . Входное сопротивление почти постоянно в относительно широком диапазоне частот. Реактивная часть входного импеданса и её частотный ход пренебрежимо малы, а длина l благодаря широкополосности излучателя слабо влияет на основные параметры. Из представленных в [20] данных следует, что входное сопротивление плоского вибратора R_a с углом раскрыва $\alpha = 70^\circ$ и длиной 450 мм в дециметровом диапазоне длин волн составляет около 180 Ом. Значения коэффициента усиления в диапазоне частот от 500 до 900 МГц варьируется от 1,5 до 4,3 дБ.

Таким образом, при построении конструкции эталонного нелинейного рассеивателя для широкополосной ЭУ целесообразно в качестве антенной части рассматривать плоские дипольные антенны со средними углами раскрыва, что позволит минимизировать реактивность входного сопротивления.

Цель работы обуславливает решение задачи согласования плоской дипольной антенны и нелинейного элемента, что предполагает расчёт импеданса последнего, а также решение задачи определения положения особых точек на АХ ПДНР. Для решения этих задач может быть использована методика расчёта АХ, предложенная в [18]. Методика предполагает этапы:

1. Представление ПДНР в виде эквивалентной схемы. На этом этапе вычисляются входные сопротивления и эффективные площади плоской дипольной антенны на ча-

стотах ЗС и ОС: $R_A(f_{3C}), S_{3C}(f_{3C}, \alpha_{3C}, \beta_{3C}, \theta_{3C})$ и $R_A(f_{OC}), G_{OC}(f_{OC}, \alpha_{OC}, \beta_{OC}, \theta_{OC})$, а так же формируется эквивалентная схема нелинейного элемента.

2. Составляются уравнения Кирхгофа для эквивалентной семы.

3. При помощи программного вычислительного комплекса находится зависимость $\Pi_{OC}(f_{HP}) = \Pi_{OC}(E_{3C})$:

$$\begin{aligned} 4. \quad & \Pi_{OC}(f_{HP})|_{R=1\text{м}} = \\ & = R_A(f_{HP}) i_{HP2}(E_{3C}) G_{HP}(f_{HP}, \alpha_{HP}, \beta_{HP}, \theta_{HP}) / 4\pi, \end{aligned} \quad (10)$$

где i_{HP} — ток на частоте нелинейного продукта, и зависимость: $Z_{HP}(f_{3C}) = Z_{HP}(E_{3C})$.

5. По вычисленным в программном комплексе зависимостям определяется связь величины ЭДС ЕЗС и потока падающей волны зондирующего сигнала ПЗС:

$$\Pi_{3C}(f_{3C}) = \Pi_{3C}(E_{3C}). \quad (11)$$

6. Зависимости (10) и (11) преобразовывают в искомую АХ ПДНР (3) путем исключения из них E_{3C} .

Для расчета АХ ПДНР воспользуемся его эквивалентной схемой из [21], представленной на рис. 3.

Эквивалентная схема ПДНР содержит два независимых контура, которые обозначены I и II. Обозначая напряжение, приложенное к выводам диода, — u_d и напряжение на $p-n$ переходе — u , может быть составлена система уравнений Кирхгофа:

$$\text{I: } \varepsilon = i_a R_a + u_d$$

$$\text{II: } u_d = L_k \frac{di_2}{dt} + i_2 R_b + u$$

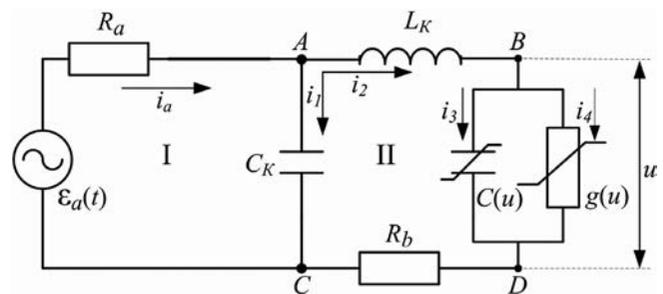


Рис. 3. Эквивалентная схема плоского дипольного нелинейного рассеивателя: $g(u)$ — проводимость $p-n$ перехода $g = 1/r_n$; r_n — сопротивление $p-n$ перехода; $C(u)$ — емкость $p-n$ перехода; R_b — сопротивление базы, омического контакта и выводов диода; C_k — емкость корпуса диода; L_k — индуктивность выводов и контактной пружины, соединяющей кристалл с одним из выводов

$$A: i_a = i_2 + i_1 \quad (12)$$

$$B: i_2 = i_3 + i_4$$

$$AC: i_1 = C_k \frac{du_d}{dt}$$

$$BD: i_4 = gu; i_3 = \frac{d(CU)}{dt} \frac{du}{dt}$$

Число уравнений может быть сокращено путём исключения токов i_1, i_3 и i_4 :

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{C_k R_a} (i_2 - i_a) + \frac{1}{R_a} \frac{d\varepsilon}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L_k} (\varepsilon - i_a R_a - i_2 R_b - u) \\ \frac{du_d}{dt} = \frac{1}{C_k} (i_a - i_2) \\ \frac{du}{dt} = \frac{i_2 - gu}{d(Cu)} \end{cases} \quad (13)$$

Для дальнейшего рассмотрения данной системы необходимо решение вопроса с описанием функций основных нелинейных параметров диода, а именно: проводимости $g(u)$ и ёмкости $C(u)$. В качестве нагрузки в данной работе будем рассматривать туннельный диод ГИ 103, для которого наблюдались характерные точки [14] на АХ при их включении в нагрузку нелинейных рассеивателей, образованных проволочными полуволновыми (на частоте ЗС) диполями. Для данных диодов известны основные параметры и вольт-амперные характеристики [23].

Вольт-амперная характеристика туннельного диода складывается из туннельного тока I_T и диффузионного (тока проводимости) ИР [23] (см. рис. 4).

Зависимость туннельного тока от напряжения может быть записана следующим образом [24]:

$$I_T = \frac{27}{4} I_1 \frac{qu}{\delta W} \left(1 - \frac{qu}{\delta W} \right)^2, \quad (14)$$

где I_1 соответствует максимуму туннельного тока, достигаемому при $U_1 = \delta W/3q$ (см. рис. 1), q — это элементарный заряд, δW — ширина области перекрытия зон (от дна зоны проводимости в n -полупроводнике до потолка валентной зоны в p -полупроводнике). Координаты максимума пика на вольтамперной характеристике диода I_1 и U_1 зависят от

технологии изготовления p - n перехода, от материала полупроводника и температуры. Учитывая, что температурный потенциал $\varphi_T = kT/q$, а интервал энергий $\delta W = \alpha kT$, где k — постоянная Больцмана, T — температура, и α — коэффициент, зависящий от распределения примесей в переходе ($\alpha = 1/3$ для плавного перехода и $\alpha = 1/2$ для резкого перехода), выражение (14) может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} I_T(u) &= \frac{27}{4} I_1 \frac{u_d}{\alpha \varphi_T} \left(1 - \frac{u}{\alpha \varphi_T} \right)^2 = \\ &= \frac{27}{4} I_1 \left(\frac{u}{\alpha \varphi_T} - \frac{2u^2}{(\alpha \varphi_T)^2} + \frac{u^3}{(\alpha \varphi_T)^3} \right) = a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3. \end{aligned} \quad (15)$$

Соответственно проводимость туннельного участка вольт-амперной характеристики g_T :

$$g_T = \frac{dI_T}{du} = b_0 + b_1 u + b_2 u^2.$$

Для введённых коэффициентов справедливо:

$$b_0 = a_1 = \frac{27}{4} \frac{I_1}{\alpha \varphi_T};$$

$$b_1 = 2a_2 = -\frac{27}{4} \frac{4I_1}{(\alpha \varphi_T)^2};$$

$$b_2 = 3a_3 = \frac{27}{4} \frac{3I_1}{(\alpha \varphi_T)^3}.$$

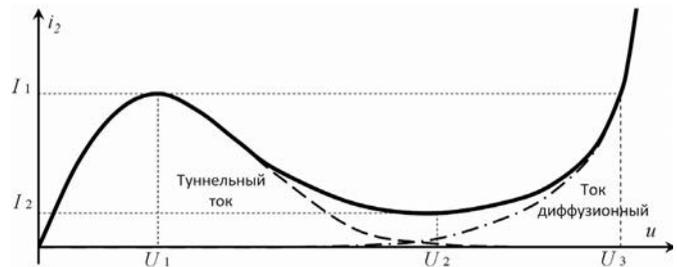


Рис. 4. Качественный вид прямой ветви вольт-амперной характеристики туннельного диода (сплошная линия). Туннельному току соответствует пунктирная линия, току проводимости — штрихпунктирная

Учитывая, что выражение (15) пригодно и для обратных смещений, нахождение данных коэффициентов позволяет получить удобное для вычислений выражение зависимости $I_T(u)$ для всего диапазона рабочих напряжений.

Диффузионный ток через $p-n$ переход, при напряжении на переходе u , описывается экспоненциальной зависимостью с коэффициентом I_0 , соответствующим току насыщения:

$$I_p(u) = I_0 \left(e^{\frac{u}{m\phi_T}} - 1 \right),$$

где $m = 2$ при всех значениях u для кремниевых диодов; для германиевых диодов $m = 1$ при $u < (6 \div 7) \phi_T$ и $m = 2$ при других значениях u ; для начального участка вольт-амперной характеристики точечных диодов $m = 2$, т.к. даже при небольших токах уровень инжекции оказывается значительным из-за малой площади перехода [23]. Для нахождения значения тока насыщения I_0 могут быть использованы справочные данные, определяющие положение точки (I_1, U_3) на вольт-амперной характеристике:

$$I_0 = I_1 / \left(e^{\frac{U_3}{m\phi_T}} - 1 \right).$$

Тогда выражение для расчёта диффузионного тока $I_p(u)$ примет вид:

$$I_p = I_1 \left(e^{\frac{u}{m\phi_T}} - 1 \right) / \left(e^{\frac{U_3}{m\phi_T}} - 1 \right), \quad (16)$$

а для диффузионной проводимости:

$$g_p(u) = \frac{dI_p(u)}{du} = \frac{I_0}{m\phi_T} \exp\left(\frac{u}{m\phi_T}\right) = g_0 e^{bu},$$

$$\text{где } g_0 = \frac{I_1}{m\phi_T} / \left(e^{\frac{U_3}{m\phi_T}} - 1 \right) \text{ и } b = \frac{1}{m\phi_T}.$$

На основе полученных выражений для $I_T(u)$ и $I_p(u)$ могут быть получены аналитические выражения для вольт-амперных характеристик $i_2(u) = I_T(u) + I_p(u)$ туннельного диода ГИ103, путём вычисления коэффициентов a_1, a_2, a_3, g_0, b .

Нелинейная ёмкость туннельного диода, согласно [25], определяется выражением:

$$C(u) = 1,05S \left(\frac{\xi q n_d n_a}{8\pi(u_d - u)(n_d + n_a)} \right)^{1/2},$$

где S — площадь $p-n$ перехода, ξ — диэлектрическая проницаемость среды, n_d и n_a — концентрации ионизированных доноров и акцепторов по обе стороны $p-n$ перехода. Вариация ёмкости туннельного диода, согласно [25], в интервале напряжений, соответствующем туннельному току, составляет 20–30%, поэтому при проведении численных экспериментов, не связанных с изучением параметрических явлений, ёмкость диода может считаться постоянной.

Выражения (15) и (16) для расчёта нелинейного тока $i_2(u)$ были использованы для численного построения АХ ПДНР с использованием программно-вычислительного комплекса LabVIEW по аналогии с работой [25].

В результате были получены АХ для частот ЗС в диапазоне $f_{ЗС} = 100 \div 800$ МГц, (ОС рассчитывался на частоте второй гармоники ЗС: $f_{ОС} = 200 \div 1600$ МГц) и сопротивления плоской дипольной антенны $R_a = 180$ Ом, нагруженной на туннельный диод ГИ103 (рис. 5). ПДНР с туннельным диодом ГИ103 оказались свойственны АХ с чётко выраженными точками экстремума.

Представленные выше АХ получены без учета взаимного пространственного расположения излучающей

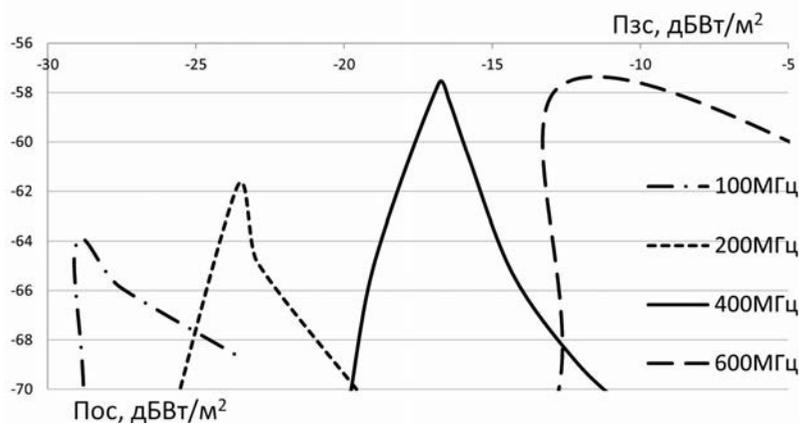


Рис. 5. Амплитудные характеристики ПДНР с нелинейной частью в виде диода ГИ103 для ОС на частоте второй гармоники ЗС и сопротивлении антенны $R_a = 180$ Ом



и приемной антенн измерительного стенда и направленных свойств ПДНР. Полученные характеристики справедливы для случая совпадения направлений ЗС и ОС с нормалью ПДНР. В общем случае (рис. 6) влияние пространственных свойств может быть учтено при рассмотрении первого этапа предложенной методики, а именно при расчете значений $S_{3c}(f_{3c}, \alpha_{3c}, \beta_{3c}, \theta_{3c})$ и $G_{oc}(f_{oc}, \alpha_{oc}, \beta_{oc}, \theta_{oc})$.

Ввиду линейной зависимости ПЗС и ПОС от указанных величин форма АХ ПДНР не будет претерпевать существенных изменений, а будет иметь место смещение относительно осей координат. На рис. 7 представлена АХ полученная при таких же входных параметрах, как в случае рассмотренном выше, за исключением значений углов облучения $\theta_{3c} = 45^\circ$, и отражения $\theta_{oc} = 30^\circ$. В ходе расчетов предполагалось, что центр ПДНР и волновые вектора ЗС и ОС лежат в одной плоскости, поэтому предполагалось достаточным рассмотрение зависимости $S_{3c}(f_{3c}, \theta_{3c})$ и $G_{oc}(f_{oc}, \theta_{oc})$ от одного углового значения.

Полученная с учётом угловых значений θ_{3c} и θ_{oc} АХ (рис. 7) качественно не отличается от представленной выше (см. рис. 5) АХ. Отличие состоит лишь в смещении относительно осей координат. Связано это с тем, что представленная методика расчёта АХ предполагает решение обратной задачи, т.е. входным параметром является ЭДС, наведенная в антенной части ПДНР, а не Π_{3c} . При изменении угла облучения θ_{3c} будет меняться эффективная площадь антенной части ПДНР S_{3c} и, соответственно, значение Π_{3c} , необходимое для наведения фиксированной E_{3c} . В связи с этим происходит смещение АХ вдоль оси абсцисс. Значение ПОС изменяется вследствие изменения G_{oc} (учета свойств направленности антенной части ПДНР), поэтому имеет место смещение АХ как вдоль оси ординат.

Помимо анализа амплитудных свойств ПДНР необходимо уделить внимание и его амплитудно-частотным свойствам. Как было отмечено выше, наиболее широкополосные свойства проявляют плоские дипольные антенны

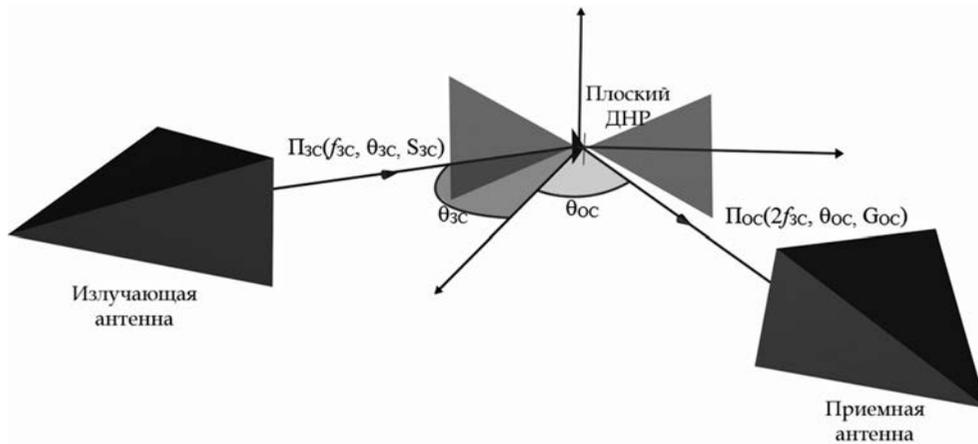


Рис. 6. Схема взаимодействия измерительного стенда и ПДНР

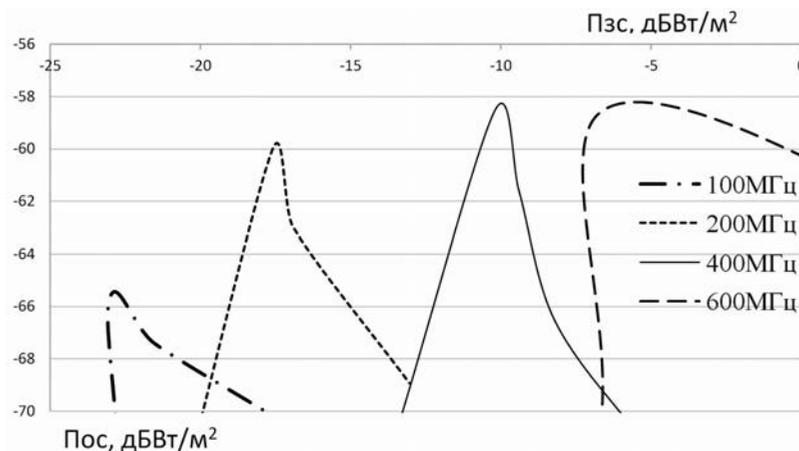


Рис. 7. Амплитудные характеристики ПДНР с нелинейной частью в виде диода ГИ103 для ОС на частоте второй гармоники ЗС и сопротивлении антенны $R_a = 180$ Ом. При значениях углов облучения q

с углами раскрыва θ от 60° до 80° . В связи с чем, для рассмотренного ПДНР также были найдены калибровочные амплитудно-частотные характеристики (рис. 8).

Данные калибровочные характеристики показали, что с ростом частоты ЗС $f_{ЗС}$ в диапазоне $f_{ЗС} = 100 \div 400$ МГц происходит рост значений плотности потока мощности ОС $P_{ОС}$ на частоте второй гармоники, при которых наблюдается экстремум на амплитудной характеристике. При значениях частоты ЗС $f_{ЗС}$ в диапазоне $f_{ЗС} = 400 \div 800$ МГц соответствующее экстремуму значение $P_{ОС}$ изменяется относительно слабо. Качественно аналогичная ситуация характерна и для плотности потока мощности ЗС $P_{ЗС}$, только изменению поведения функции соответствует значение частоты $f_{ЗС} \approx 550$ МГц (рис. 8).

Полученные расчётным путём данные говорят о том, что для решения задачи калибровки нелинейного радиолокатора в качестве эталона может использоваться ПДНР с углом раскрыва антенны порядка $\theta \approx 70^\circ$ и длиной антенной части $l = 0,4$ м, обладающий свойствами широкополосности, выраженности точки максимума на АХ и обеспечения приемлемой согласованности антенной части и нелинейного элемента ($\Gamma_{ЗС} < 0,2$).

Заключение

1. Расчётным путем построены амплитудные характеристики плоского дипольного нелинейного рассеивателя с нелинейной частью в виде туннельного диода для различных значений частоты зондирующего сигнала.

2. По виду амплитудных характеристик подтверждена возможность применения в качестве эталона плоского дипольного нелинейного рассеивателя с нагрузкой

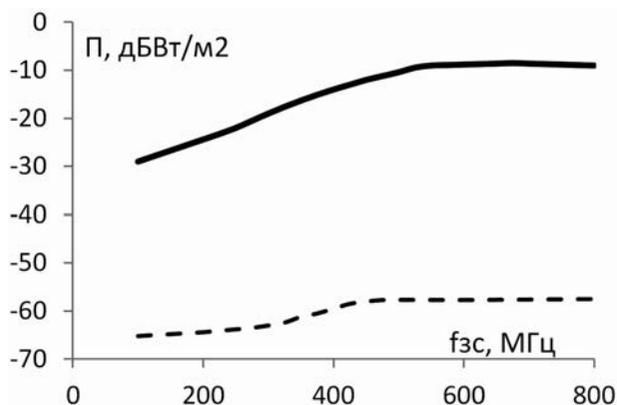


Рис. 8. Калибровочные амплитудно-частотные характеристики для ПДНР с нелинейной частью в виде диода ГИ103 и антенным сопротивлением $R_a = 180$ Ом. Сплошная линия соответствует ЗС, пунктирная – ОС.

в виде туннельного диода для решения задач калибровки нелинейных радиолокаторов и измерительных стендов.

Литература

1. Горбачев А.А., Ларцов С.В., Тараканов С.П., Чигин Е.П. Помехи в системах нелинейного зондирования // Радиотехника и электроника. 1998. № 1. С. 71–76.
2. Hager R. O. Harmonic radar systems for near-ground in foliage nonlinear scatterers // IEEE Transactions on Aerospace and Electron Systems. 1976. Vol. 2. No. 2. Pp. 35–39.
3. Opitz C. L. Metall-detecting radars rejects clutter naturally // Microwaves. 1976. No. 8. Pp. 43–47.
4. Штейншлейгер В.Б. Нелинейное рассеяние радиоволн металлическими объектами // Успехи физических наук. 1984. Т. 142. Вып. 1. С. 131–135. DOI: 10.3367/UFNr.0142.198401e.0131
5. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио, 1975. 348 с.
6. Майзельс Н.Е., Торгованов В.А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. М.: Сов. радио, 1972. 232 с.
7. Бескид П.П., Леонтьев В.В. Классификация импульсных методов измерения рассеивающих свойств радиолокационных целей // Известия Ленинградского электротехнического института. 1983. № 328. С. 54–58.
8. Панычев С.Н. Нелинейные радиоизмерения и контроль характеристик изделий военной электроники: Монография. Воронеж: Изд-во Военного института радиотехники, 2004. 178 с.
9. Шиндин А.В., Яшинов В.А. Экспериментальное исследование фрактальных нелинейных рассеивателей // Труды Научной конференции по радиофизике, посвященной 80-летию со дня рождения Б.Н. Гершмана (Нижний Новгород, 7 мая 2004 г.). Н. Новгород: ТАЛАН, 2004. С. 70–71.
10. Маюнов А.Т., Михайлов Г.Д., Разиньков С.Н. Основы технического облика нелинейного эталонного отражателя // Измерительная техника. 1997. № 12. С. 35–39.
11. Горбачев А.А. Особенности зондирования электромагнитными волнами сред с нелинейными включениями // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 2. С. 152–157.
12. Вернигоров Н.С. Процесс нелинейного преобразования и рассеяния электромагнитного поля электрически нелинейными объектами // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. № 10. С. 1181–1185.
13. Щербатов Г.Н. Применение нелинейной радиолокации для дистанционного обнаружения малоразмерных объектов // Специальная техника. 1999. № 1. С. 34–39.
14. Горбачев А.А., Ларцов С.В., Тараканов С.П., Чигин Е.П. Амплитудные характеристики нелинейных



рассеивателей // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 5. С. 558–562.

15. *Беляев В. В., Маюнов А. Т., Панычев С. Н., Разиньков С. Н.* Использование антенн с нелинейной нагрузкой для калибровки систем измерения радиолокационных характеристик объектов на гармониках // Антенны. 2001. № 5(51). С. 52–56.

16. *Горбачев А. А., Ларцов С. В., Тараканков С. П.* Измерение характеристик объектов, нелинейно рассеивающих электромагнитные волны // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 6. С. 659–665.

17. Патент СССР 1700498. Способ определения эффективной площади антенны / Бабанов Н. Ю., Горбачёв П. А., Ларцов С. В., Тараканков С. П. Заявл. 08.08.88; Опубл. 23.12.1991. Бюл. № 47. 4 с.

18. *Бабанов Н. Ю., Ларцов С. В.* Измерения характеристик пассивных нелинейных радиоответчиков // Датчики и системы. 2014. № 9. С. 20–25.

19. *Усленги П., Скотт Э., Маклафлин Д., Безиерис И.* Нелинейные электромагнитные волны: пер с англ. М.: Мир, 1983. 312 с.

20. *Ротхаммель К.* Антенны: в 2 т.: пер с нем. 11-е изд. М.: Лайт-ЛТД, 2007. Т. 1. 420 с.; Т. 2. 416 с.

21. *Щербаков Г. Н., Николаев А. В., Прохоркин А. Г., Усманов Р. И., Шлыков Ю. А.* Исследование рассеивающих свойств нелинейного биконического отражателя — физической модели боеприпаса с электронным и устройствами // Спецтехника и связь. 2011. № 1. С. 33–39.

22. *Макурин М. Н., Чубинский Н. П.* Расчет характеристик биконической антенны методом частичных областей // Радиотехника и электроника. 2007. № 10. С. 1199–1208.

23. *Степаненко И. П.* Основы теории транзисторов и транзисторных схем. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1977. 672 с.

24. *Ржевски К. С.* Физические принципы действия полупроводниковых приборов. М.: Изд-во МГУ, 1986. 254 с.

25. *Фистуль В. И., Шварц Н. З.* Туннельные диоды // Успехи физических наук. 1962. Т. 77. Вып. 5. С. 109–160. DOI: 10.3367/UFNг.0077.196205с.0109

26. *Бабанов Н. Ю., Корсаков С. С., Ларцов С. В., Николаев А. В., Самарин В. П.* О расчете амплитудной характеристики биконического нелинейного рассеивателя, нагруженного на полупроводниковый диод // Проектирование и технология электронных средств. 2018. № 1. С. 18–26.



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.



НПЦ ИРС

Научно-производственный центр
Информационных региональных систем
▶ npcirs.ru

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



ABOUT THE EXPERIMENTATION MEASUREMENTS OF SECONDARY NON-LINEAR INTERFERENCES INTENSITY LEVEL FROM THE SEMICONDUCTOR ELECTRONIC DEVICES

NIKOLAY Y. BABANOV,

N.Novgorod, Russia, babanov@nntu.ru

SERGEY S. KORSAKOV,

N.Novgorod, Russia, sskorsakov@yandex.ru

SERGEY V. LARTSOV,

N.Novgorod, Russia, svl@ggc.nnov.ru

VALERIY P. SAMARIN,

N.Novgorod, Russia, vpsamarin@mail.ru

KEYWORDS: nonlinear flat dipole scatterer; butterfly antenna; method of a real standard.

ABSTRACT

Certain electronic devices, while being radiated by external field can generate scattering signal, which can become interference for nearby radio-receiving apparatus in wide bandwidth. For measuring of parameters of the field, scattered by such non-linear objects, there is a necessity of calibration of radar measuring device. For this purpose a benchmark(standard) can be used. For example a passive non-linear reflector with determined effective scattering surface, capable to generate intensive scattering signal in a quite wide bandwidth or several reference non-linear scatters with a more narrow operational band for promoting measurements in a defined range. This study proposes construction of standard non-linear reflector, used for calibration of broadband non-linear radar measuring device and describes calibrating procedure. Proposed construction is a kind of broadband antenna, known as "butterfly" antenna, connected to a tunnel diode. Optimal dimensions of the antenna are chosen basin on necessity to work in wide bandwidth. Equivalent radio engineering circuit of the standard is presented in the research and mathematic model is build. Basing on that mathematic model the numerical experiment is performed. The experiment is resulted in building of diagrams of amplitude and calibrating amplitude-frequency parameters of the standard in wide bandwidth. Presence of the extreme points at the diagrams proves possibility of applying of described construction of non-linear reflector as a benchmark (standard) for calibrating procedures. Its applicability is justified both for radar measuring device equipped with combined transmitting and receiving antennas and for measuring device equipped with separated ones, which may have importance for experimental studies of spatial features of non-linear objects.

REFERENCES

1. Gorbachev A.A., Lartsov S.V., Tarakankov S.P., Chigin E.P. Interferences in nonlinear probing systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 1998. Vol. 43. No. 1. Pp. 68-72.
2. Hager R.O. Harmonic radar systems for near-ground in foliage nonlinear. *IEEE Transactions on Aerospace and Electron Systems*. 1976. Vol. 2. No. 2. Pp. 35-39.
3. Opitz C.L. Metall-detecting radars rejects clutter naturally. *Microwaves*. 1976. No. 8. Pp. 43-47.
4. Shteinshleiger V.B. Nonlinear scattering of radio waves by metallic objects. *Sov. Phys. Usp.* 1984. Vol. 27. Pp. 60-68. DOI: 10.1070/PU-1984v027n01ABEH004020
5. Kobak V.O. *Radiolokatsionnyye otrazhateli* [Radar reflectors]. Moscow: Sovetskoe radio, 1975. 348 p. (In Russian)
6. Mayzel's N.E., Torgovanov V.A. *Izmereniye kharakteristik rasseyaniya radiolokatsionnykh tseley* [Scattering characteristics measurement of radar]. Moscow: Sovetskoe radio, 1972. 323 p. (In Russian)
7. Beskid P.P., Leon't'yev V.V. Classification of pulse methods for measuring the scattering properties of radar targets [Classification of pulse methods for measuring the scattering properties of radar targets]. *Izvestiya Leningradskogo elektrotekhnicheskogo instituta* [News of the Leningrad Electrical Engineering Institute]. 1983. No. 328. Pp. 54-58. (In Russian)
8. Panychev S.N. *Nelineynyye radioizmereniya i kontrol' kharakteristik izdelyi voyennoy elektroniki* [Nonlinear radio measurements and control characteristics of military electronics products. Monograph]. Voronezh: Military Institute of radio engineering Publ., 2004. 178 p. (In Russian)



9. Shindin A.V., Yashnov V.A. Experimental study of fractal nonlinear scatterers. *Proceedings of the (8th) Scientific Conference on Radiophysics devoted to the 80-th Anniversary of B.N. Gershman's Birth (May 7, 2004)*. Nizhni Novgorod: TALAM Press, 2004. Pp. 70-71. (In Russian)
10. Mayunov A.T., Mikhailov G.D., Razin'kov S.N. Principles of the technical aspect of a nonlinear standard reflector. *Measurement Techniques*. 1997. Vol. 40. No. 12. Pp. 1185-1190.
11. Gorbachev A.A. Features of sensing by electromagnetic waves of media with nonlinear inclusions [Electromagnetic waves sensing peculiarities for the medium with non-linear inclusions]. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 1996. Vol. 41. No. 2. Pp. 152-157. (In Russian)
12. Vernigorov N.S. The process of nonlinear transformation and scattering of an electromagnetic field by an electrically nonlinear object [Electromagnetic field scattering and nonlinear transformation process by electrically nonlinear objects]. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 1997. Vol. 42. No. 10. Pp. 1181-1185. (In Russian)
13. Shcherbakov G.N. Application of nonlinear radar for remote detection of small objects [Nonlinear radar application for remote detection of small objects]. *Spetsial'naya tekhnika* [Special equipment]. 1999. No. 1. Pp. 34-39. (In Russian)
14. Gorbachev A.A., Lartsov S.V., Tarakanov S.P., Chigin E.P. Amplitude characteristics of nonlinear scatterers. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 1996. Vol. 41. No. 6. Pp. 515-519.
15. Belyaev V.V., Mayunov A.T., Panychev S.N., Razinkov S.N. Use of antennas with nonlinear load for calibration of systems of measurement of radar characteristics of objects on harmonics [Nonlinear loading antennas using for calibration of harmonic radar systems for objects characteristics measurement]. *Antenny* [Antennas]. 2001. No. 5 (51). Pp. 52-56. (In Russian)
16. Gorbachev A.A., Lartsov S.V., Tarakanov S.P. Measurement of the characteristics of objects that nonlinearly scatter electromagnetic waves. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2001. Vol. 46. No. 6. Pp. 609-614.
17. Patent 1700498 USSR. *Sposob opredeleniya effektivnoy ploshchadi anteny*. [Determining method for antenna effective area]. Babanov N.Y., Gorbachev A.A., Lartsov S.V., Tarakanov S.P. Declared 08.08.88. Published 23.12.1991. Bulletin No. 47. 4 p. (In Russian)
18. Babanov N.Y., Lartsov S.V. About measuring characteristics necessary for constructing passive nonlinear radio transponders. *Datchiki & Systemi* [Sensors & Systems]. 2014. No. 9. Pp. 20-25. (In Russian)
19. Uslenghi P. (Ed.) *Nonlinear Electromagnetics*. New York: Academic Press, 1980. 436 p.
20. Rothammel K. *Antennenbuch*. 11., überarb. u. erw. Aufl. Berlin: Militärverl. der DDR, 1989. 685 s.
21. Shcherbakov G.N., Nikolayev A.V., Prokhorkin A.G., Usmanov R.I., Shlykov Y.A. Investigation of the scattering properties of a nonlinear bionic reflector – a physical model of a munition with electronic devices [Scattering properties study for non-linear biconical reflector – physical model of the munition with electronic devices]. *Spetsstekhnika i svyaz'* [Special equipment and communication]. 2011. No. 1. Pp. 33-39. (In Russian)
22. Makurin M.N. Chubinskii N.P. The characteristics of a biconical antenna calculated via the partial-domain method. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2007. Vol. 52. No. 10. Pp. 1104-1113.
23. Stepanenko I.P. *Osnovy teorii tranzistorov i tranzistornykh skhem* [The bases of transistors and transistor circuits theory]. Ed. 4th. Moscow: Energiya, 1977. 672 p. (In Russian)
24. Rzhavkin K.S. *Fizicheskiye printsipy deystviya poluprovodnikovykh priborov* [Physical principles of semiconductor devices]. Moscow: Moscow State University Publ., 1986. 254 p. (In Russian)
25. Fistul' V.I., Shvarts N.Z. Tunnel diodes. *Sov. Phys. Usp.* 1962. Issue 5. Pp. 430-459. DOI: 10.1070/PU1962v005n03ABEH003425
26. Babanov N.Y., Korsakov S.S., Lartsov S.V., Nikolaev A.V., Samarin V.P. About calculation of amplitude characteristic of biconical nonlinear scatterer, connected to semiconductor diode. *Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and technology of electronic means]. 2018. No. 1. Pp. 18-26. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Babanov N.Yu., PhD, Docent, Vice-rector for Scientific work at Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU);
Korsakov S.S., Post-graduate student of the Ivanovskiy State University;
Lartsov S.V., PhD, Professor, Chief Engineer of JSC "Giprogazcentre";
Samarin V.P., PhD, Docent, Senior Researcher at Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU).

For citation: Babanov N.Y., Korsakov S.S., Lartsov S.V., Samarin V.P. About the experimentation measurements of secondary non-linear interferences intensity level from the semiconductor electronic devices. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 3. Pp. 14-25. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10265 (In Russian)



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10266

МОДЕЛИ СТОХАСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫМИ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫМИ СЕТЯМИ

БУРЕНИН**Андрей Николаевич¹****ЛЕГКОВ****Константин Евгеньевич²****АННОТАЦИЯ**

Анализ мировых тенденций развития систем управления сложными организационно-техническими объектами показывает, что в основе построения современных систем связи и управления, учитывающих процессы конвергенции информационных и телекоммуникационных средств и технологий, лежит создание и развертывание инфокоммуникационных сетей и систем. Такие сети функционируют в условиях широкого спектра возмущений, приводящих к тому, что сам процесс их функционирования носит в значительной степени неопределенный стохастический характер. В этих условиях для обеспечения пользователей всем необходимым спектром услуг, требуется осуществлять непрерывное управление сетью. При этом процесс управления в условиях существенной неопределенности будет носить также стохастический характер и целесообразно применение моделей и процедур стохастического управления. Рассматриваются вопросы моделирования управления, основанного на оценках состояния современных инфокоммуникационных сетей при организации управления ими на основе процедур и стратегий стохастического управления динамическими объектами. Инфокоммуникационные сети рассматриваются как объекты управления, основной задачей которых является единообразное предоставление пользователям разнообразных информационных и телекоммуникационных услуг требуемого качества и в качестве базовых моделей которых выбирают многоуровневые функциональные архитектуры, представленные трехуровневыми мультисетевыми моделями (сетями услуг). Система управления сетью, на вход которой поступают входные переменные в виде многомерного случайного процесса второго порядка с известными средним значением и ковариационной функцией, задается основной многомерной функцией и вспомогательной специальной функцией, полученной преобразованием основной. Решается задача определения выходных переменных системы управления, считая, что она сама задана многомерной функцией определенного вида. Рассматривается система управления сетью, которая асимптотически устойчива, при двух вариантах поступающих на ее входы параметров: многомерный случайный процесс второго порядка и стационарный случайный процесс с известными средними значениями и ковариациями. Сделан вывод о том, что выходной многомерный процесс существует в смысле среднеквадратической сходимости, является многомерным случайным процессом второго порядка или стационарным процессом с вычисляемыми средними значениями, ковариациями и связью между входными и выходными процессами.

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система; инфокоммуникационная сеть; детерминированное управление; стохастическое управление; модель состояния.

Для цитирования: Буренин А.Н., Легков К.Е. Модели стохастического управления современными инфокоммуникационными сетями // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 26-31. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10266

Введение

В настоящее время основные тенденции развития систем управления сложными организационно-техническими объектами, как в развитых зарубежных странах мира, так и отечественных, показывают [1], что в основе построения современных систем связи и управления, учитывающих процессы конвергенции информационных систем и телекоммуникационных сетей, лежит создание и развертывание инфокоммуникационных сетей и систем, обеспечивающих различных пользователей всем спектром необходимых инфокоммуникационных услуг.

Основной задачей любой инфокоммуникационной сети является единообразное предоставление пользователям разнообразных информационных и телекоммуникационных услуг требуемого качества. В качестве базовой модели инфокоммуникационной сети обычно выбирают [1] многоуровневую функциональную архитектуру, в соответствии с которой сеть представляется трехуровневой мульти сетевой моделью, каждый уровень которой является совокупностью сетей услуг, а каждая уровневая сеть услуг описывается графами $G_1(Y_A, H_b)$, $G_2(J_A, E_b)$, $G_3(Z_A, T_b)$.

Для каждого уровня модели инфокоммуникационной сети, интенсивность требований на получение услуг, представляющих собой вероятностный процесс, является суммой интенсивностей частных требований на определенную (i, j, k) услугу, т.е.:

$$\Lambda_1 = \sum \lambda_1(i); \Lambda_2 = \sum \lambda_2(j); \Lambda_3 = \sum \lambda_3(k).$$

Значение интенсивности выходного потока обслуженных требований (т.е. требований, которым был предоставлен соответствующий сервис) составит соответственно

$$B_1 = \sum \Theta_1(\Lambda_1); B_2 = \sum \Theta_2(\Lambda_2); B_3 = \sum \Theta_3(\Lambda_3).$$

В связи с тем, что рассматриваемые инфокоммуникационные сети функционируют в условиях широкого спектра возмущений, приводящих к тому, что сам процесс их функционирования носит в значительной степени неопределенный стохастический характер, требуется осуществлять непрерывное управление ими. Сам процесс управления инфокоммуникационными сетями в условиях существенной неопределенности, очевидно, будет носить стохастический характер, и основываться на моделях и процедурах стохастического управления, т.к. использование классических вариационных методов классической детерминированной теории управления недостаточно эффективно [2–3] и, кроме того, в ней нет различия между программным управлением (разомкнутая система) и управлением с обратной связью (замкнутая система) [3].

Будем считать систему управления инфокоммуникационной сетью, реализующей процедуры и модели стохастического управления, стохастической системой управления,

внешними воздействиями для которой являются случайные процессы [4–22]. Представляет интерес анализ таких динамических систем управления инфокоммуникационными сетями со случайными входными переменными. При этом сами стохастические системы управления инфокоммуникационными сетями могут быть описаны соотношениями между входными переменными и моделями состояний. Будем рассматривать в качестве входных переменных многомерные случайные процессы второго порядка, а в качестве выходных переменных целесообразно получить средние значения и ковариации многомерных выходных процессов.

Основные результаты будут сформулированы в теоремах спектрального разложения и представления, в соответствии с которыми все процессы с рациональными спектральными плоскостями представляются моделями состояний при поступлении на вход системы многомерных процессов типа белого шума.

Системы управления инфокоммуникационными сетями. Функции систем

Будем считать, что система управления инфокоммуникационной сетью как динамическая система задается некоторой многомерной функцией $\bar{h}(t)$, $t \in T$, на вход которой поступают входные переменные в виде многомерного случайного процесса второго порядка $\mathbf{b}(t)$ с известными средним значением и ковариационной функцией — векторами $\mathbf{m}_b(t)$, $t \in T$ и $\mathbf{r}_b(t)$, $t \in T$.

Задача заключается в определении выходных переменных системы управления, считая, что сама система задана многомерной функцией $\bar{h}(t)$, $t \in T$.

Очевидно, что при известной функции $\bar{h}(t)$, $t \in T$, выходные переменные системы управления инфокоммуникационной сетью можно задать следующим соотношением:

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{s=-\infty}^t \bar{h}(t-s) \mathbf{b}(s) = \sum_{s=0}^{\infty} \bar{h}(s) \mathbf{b}(t-s). \quad (1)$$

Для того, чтобы выражение (1) имело смысл требуется определить, что сумма конечна и будет задавать значения выходных переменных (составляющих многомерного процесса) $\mathbf{y}(t)$ как взвешенные суммы входных переменных $\mathbf{b}(t)$.

Если же сумма в выражении (1) является бесконечной, то требуется доказать, что она сходится, хотя бы в контексте среднеквадратичной сходимости, для чего составляют последовательность Коши:

$$\begin{aligned} & \sum_{s=n}^m \left[\sum_{s'=n}^m \bar{h}(s) \mathbf{b}(t-s) \right]^2 = \\ & = M \sum_{s=n}^m \sum_{s'=n}^m \bar{h}(s) \bar{h}(s') \mathbf{b}(t-s) \mathbf{b}(t-s') = \\ & = \sum_{s,s'=n}^m \bar{h}(s) \bar{h}(s') \mathbf{r}_b(t-s, t-s'). \end{aligned} \quad (2)$$

Но т.к. входные параметры являются многомерным случайным процессом второго порядка, для которого $M[\mathbf{b}^2(t)] < [\infty]$, то

$$\mathbf{r}_b(t, s) \leq \sqrt{\mathbf{r}_b(t, t) \mathbf{r}_b(s, s)} \leq \bar{a}. \quad (3)$$

Будем считать динамическую систему управления инфокоммуникационной сетью асимптотически устойчивой, тогда $|\bar{h}(s)| \leq \alpha^2$; $|\alpha| < 1$ и, выбирая переменные m и n достаточно большими, можно сумму (2) сделать произвольно малой, что означает существование сходимости бесконечной суммы (1) в контексте среднеквадратической сходимости. При этом выходные переменные системы управления — многомерный процесс $\mathbf{y}(t)$, $t \in T$, сам является многомерным случайным процессом второго порядка.

Среднее значение и ковариационная функция многомерного процесса $\mathbf{y}(t)$, $t \in T$ определяется соответственно выражением (4) и (5):

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_y(t) &= M[\mathbf{y}(t)] = M \sum_{s=0}^{\infty} \bar{h}(s) \mathbf{b}(t-s) = \\ &= \sum_{s=0}^{\infty} \bar{h}(s) M[\mathbf{b}(t-s)] = \sum_{s=0}^{\infty} \bar{h}(s) \mathbf{m}_b(t-s), \quad t \in T. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_y(s, t) &= M[\mathbf{y}(s) \mathbf{y}(t)] = \\ &= M \left[\sum_{k=0}^{\infty} \bar{h}(k) \mathbf{b}(s-k) \sum_{l=0}^{\infty} \bar{h}(l) \mathbf{b}(t-l) \right] = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \bar{h}(k) \bar{h}(l) M[\mathbf{b}(s-k) \mathbf{b}(t-l)] = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \bar{h}(k) \bar{h}(l) \mathbf{r}_b(s-k, t-l). \end{aligned} \quad (5)$$

Характеристики связей между входными и выходными параметрами системы управления инфокоммуникационной сетью можно задать функциями ковариации между поступающим и выходным многомерными случайными процессами:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{by}(s, t) &= M[\mathbf{b}(s) \mathbf{y}(t)] = \\ &= \mathbf{m}_b(s) \sum_{l=0}^{\infty} \bar{h}(l) \mathbf{r}_b(s, t-l). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, если система управления инфокоммуникационной сетью асимптотически устойчива, на ее входы поступает многомерный случайный процесс второго порядка $\mathbf{b}(t)$ со средним значением $\mathbf{m}_b(t)$ и ковариацией $\mathbf{r}_b(s, t)$, то выходной многомерный процесс (1) существует в смысле среднеквадратической сходимости, является многомерным случайным процессом второго порядка со средним значе-

нием (4), ковариацией (5) и связью между входным и выходным процессом, заданной соотношением (6).

Функционирование в стационарных условиях

При некоторых условиях функционирования инфокоммуникационной сети могут быть выделены временные интервалы (интервалы квазистабильности Δt_{st}), когда допустимо считать поступающие на стационарную систему управления параметры, а, следовательно, поступающий на вход многомерный случайный процесс стационарным.

Как известно [5–7], стационарный случайный процесс $\{\mathbf{b}(t), t \in T\}$ это процесс, для которого распределение $\{\mathbf{b}(t_1), \mathbf{b}(t_2), \dots, \mathbf{b}(t_h)\}$ тождественно равно распределению $\{\mathbf{b}(t_1 + \tau), \mathbf{b}(t_2 + \tau), \dots, \mathbf{b}(t_h + \tau)\}$ для всех τ , для которых справедливо $M\{\mathbf{b}(t)\} = \int_{\Omega} \mathbf{b}(t, \omega) \bar{P}(d\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^{+T} \mathbf{b}(t, \omega) dt$.

Если входные параметры системы управления инфокоммуникационной сетью суть многомерный стационарный случайный процесс $\{\mathbf{b}(t), t \in T_{st}\}$, то имеем

$$\mathbf{m}_b(t) = \mathbf{m}_b = \text{const}. \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_y &= \mathbf{m}_b \sum_{k=0}^{\infty} \bar{h}(k). \\ \mathbf{r}_y(s, t) &= M[\mathbf{y}(s) \mathbf{y}(t)] = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \bar{h}(k) \bar{h}(l) \mathbf{r}_b(s-t+l-k). \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{by}(s, t) &= M[\mathbf{b}(s) \mathbf{y}(t)] = \\ &= \mathbf{m}_b \sum_{l=0}^{\infty} \bar{h}(l) \mathbf{r}_b(s-t+l). \end{aligned} \quad (9)$$

Если входные параметры это стационарный случайный процесс, система управления инфокоммуникационной сетью устойчива, то выходные параметры являются стационарным случайным процессом, т.е. среднее значение выходных параметров есть постоянный вектор $\mathbf{m}_b \sum_{k=0}^{\infty} \bar{h}(k)$, функции $\mathbf{r}_y(s, t)$ и $\mathbf{r}_{by}(s, t)$ функции только разности $s-t$.

Введем специальную функцию системы управления \bar{W} , которая является z -преобразованием от функции $\bar{h}(t)$, т.е.: $\bar{W}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} z^{-n} \bar{h}(n)$. Тогда среднее значение и спектральная плотность выходных параметров системы управления будут определяться соответственно выражениями (11), (12) и (13):

$$\mathbf{m}_y = \bar{W}(1) \mathbf{m}_b. \quad (11)$$



$$\bar{\Psi}_y(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in\omega} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \bar{h}(k) \bar{h}(l) \mathbf{r}_b(n+l-k) = \quad (12)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{\infty} e^{-ik\omega} \bar{h}(k) \sum_{l=0}^{\infty} e^{-il\omega} \bar{h}(l) \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in\omega} \mathbf{r}_b(n).$$

$$\bar{\Psi}_{by}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{l=0}^{\infty} e^{-il\omega} \bar{h}(l) \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in\omega} \mathbf{r}_b(n). \quad (13)$$

Таким образом, если на стационарную асимптотически устойчивую систему управления инфокоммуникационной сетью, заданной специальной функцией

$\bar{W}(z) = \sum_{n=0}^{\infty} z^{-n} \bar{h}(n)$ поступают параметры, представляющие собой многомерный стационарный случайный процесс $\{\mathbf{b}(t), t \in \Delta t_{st}\}$ со средним значением \mathbf{m}_b и спектральной плотностью $\bar{\Psi}_b(\omega)$, то выходные параметры представляют собой стационарный случайный процесс со средним значением (11) и спектральными плотностями (12) и (13).

Заключение

Анализ мировых тенденций развития систем управления сложными организационно-техническими объектами показывает, что в основе построения современных систем связи и управления, учитывающих процессы конвергенции информационных и телекоммуникационных средств и технологий, лежит создание и развертывание инфокоммуникационных сетей и систем.

Рассматриваемые в статье инфокоммуникационные сети функционируют в условиях широкого спектра возмущений, приводящих к тому, что сам процесс их функционирования носит в значительной степени неопределенный стохастический характер. В этих условиях для обеспечения пользователей всем необходимым спектром инфокоммуникационных услуг, требуется осуществлять непрерывное управление инфокоммуникационной сетью. При этом процесс управления инфокоммуникационными сетями в условиях существенной неопределенности будет носить стохастический характер и целесообразно применение моделей и процедур стохастического управления. Система управления информационной сетью в этом случае будет стохастической системой управления, задаваемой соотношениями между входными переменными (многомерными случайными процессами второго порядка или стационарными процессами) и моделями состояний. В качестве выходных переменных используются средние значения и ковариации многомерных выходных процессов.

Система управления инфокоммуникационной сетью как динамическая система задается многомерной функ-

цией, на вход которой поступают входные переменные в виде многомерного случайного процесса второго порядка с известными средним значением и ковариационной функцией. Задача заключается в определении выходных переменных системы управления, считая, что она сама задана многомерной функцией определенного вида.

Если система управления инфокоммуникационной сетью асимптотически устойчива, на ее входы поступает многомерный случайный процесс второго порядка с известными средним значением и ковариацией, то выходной многомерный процесс существует в смысле среднеквадратической сходимости, является многомерным случайным процессом второго порядка с вычисляемыми средним значением, ковариацией и связью между входным и выходным процессом.

Если на стационарную асимптотически устойчивую систему управления инфокоммуникационной сетью, заданной определенной специальной функцией поступают параметры, представляющие собой многомерный стационарный случайный процесс с известными средним значением и спектральной плотностью, то выходные параметры системы также представляют собой стационарный случайный процесс с определяемым постоянным средним значением и спектральными плотностями.

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. Bellman R, Kalaba R. Mathematical Trends in Control Theory. Dover. New York, 1963. 273 p.
3. Беллман Р. Процессы регулирования с адаптацией: пер. с англ. М.: Наука, 1964. 327 с.
4. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969. 384 с.
5. Гихман И. И., Скороход А. В. Введение в теорию случайных процессов. М.: Наука, 1965. 606 с.
6. Prabhu N. U. Stochastic Processes. Basic Theory and its Applications. New York, 1965. 347 с.
7. Карлин С. Основы теории случайных процессов: пер. с англ. М.: Мир, 1971. 537 с.
8. Шнепс-Шнеппе М. А. Системы распределения информации. Методы расчета. М.: Связь, 1979. 342 с.
9. 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.: Изд-во Военная академия связи, 2017. С. 122–126.
10. Шаньгин В. Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. М.: ДМК Пресс, 2012. 592 с.

11. *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.
12. *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.
13. *Ерохин С.Д., Легков К.Е.* Информационные угрозы автоматизированных систем управления технологическими процессами // *I-methods*. 2014. Т. 6. № 1. С. 24–26.
14. *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.
15. *Mitra D., Ramakrishnan K. G.* Technics for traffic engineering of multiservice in priority networks // *BLTJ*. 2001. Vol. 1. Pp. 123–130.
16. *Зима В.М., Молдовян А.А., Молдовян Н.А.* Безопасность глобальных сетевых технологий. СПб.: Изд-во СПбУ, 1999. 234 с.
17. *Котенко И.В., Степашкин М.В., Богданов В.С.* Анализ защищенности компьютерных сетей на раз личных этапах проектирования и эксплуатации // *Известия вузов. Приборостроение*. 2006. Т. 49. № 5. С. 3–8.
18. *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.
19. *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.
20. *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.
21. *Буренин А.Н., Легков К.Е.* Основные проблемы безопасности подсистем обеспечения единым временем элементов систем управления сложными организационно-техническими объектами // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2019. Т. 13. № 1. С. 45–53.
22. *Буренин А.Н., Легков К.Е., Терещенко Г.В.* Управление безопасностью функционирования подсистемы обеспечения единым временем элементов системы управления сложным организационно-техническим объектом // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2019. Т. 13. № 2. С. 36–45.

MODELS OF STOCHASTIC MANAGEMENT OF MODERN INFOCOMMUNICATION NETWORKS

ANDREY N. BURENIN,

St. Petersburg, Russia, konferencia_asu_vk@mail.ru

KONSTANTIN E. LEGKOV,

St-Petersburg, Russia, constl@mail.ru

ABSTRACT

The analysis of global trends in development of management systems by difficult organizational and technical objects shows that at the heart of creation of modern communication systems and the management considering processes of convergence of information and telecommunication means and technologies creation and expansion of infocommunication networks and systems lies. Such networks function in the conditions of a broad spectrum of the perturbations leading to the fact that process of their functioning has substantially uncertain stochastic character. In these conditions for providing users with all necessary range of services, it is required to exercise continuous network management. At the same time management process in the conditions of essential uncertainty will have also stochastic character and application of models and procedures of stochastic management is reasonable. Questions of modeling of

KEYWORDS: system; infocommunication network; the determined management; stochastic management; status model.

the management based on estimates of a status of modern infocommunication networks at the organization of management by them on the basis of procedures and the strategy of stochastic management of dynamic objects are considered. Infocommunication networks are considered as control objects which main objective is uniform providing required quality to users of various information and telecommunication services and as which basic models select the multi-tier functional architectures presented by three-level multi network models (networks of services). The network management system on which input variables in the form of multidimensional accidental process of the second order with known for mean value and covariation function arrive is set by the basic multidimensional function and support special function received by conversion the main. The problem of definition of output variables of management system is



solved, considering that she is set by multidimensional function of a certain look. The network management system which asymptotically is steady is considered, at two options of the parameters arriving on its inputs: multidimensional accidental process of the second order and stationary accidental process with the known mean values and covariances. The conclusion is drawn that output multidimensional process exists in sense of mean square convergence, is multidimensional accidental process of the second order or stationary process with the calculated mean values, covariances and communication between entrance and output processes.

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. Bellman R., Kalaba R. *Mathematical Trends in Control Theory*. Dover. New York. 1963. 273 p.
3. Bellman R. *Adaptiv control processes: a guided tour*. Princeton University Press, 1961. 255 p.
4. Pontryagin L. S., Boltyanskij V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh processov* [Mathematical theory of optimum processes]. Moscow: Science, 1969. 384 p. (In Russian)
5. Gikhman I.I., Skorohod A.V. *Vvedenie v teoriyu sluchajnykh processov* [Introduction to the theory of accidental processes]. Moscow: Science, 1965. 606 p. (In Russian)
6. Prabhu N.U. *Stochastic Processes. Basic Theory and its Applications*. New York, 1965. 347 p.
7. Karlin S. *A First Course in Stochastic Processes*. Academic Press, 1968. 514 p.
8. Shneps-Shneppe M.A. *Sistemy raspredeleniya informatsii. Metody rascheta* [Distribution System information. Calculation methods]. Moscow: Svyas', 1979. 342 p. (In Russian)
9. 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 Mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Problemy tekhnicheskogo obespecheniya voysk v sovremennykh usloviyakh"* [Proceedings of the II Interuniversity scientific and practical conference "Problems of technical support of troops in modern conditions"]. St. Petesburg: Voennaya akademiya svyazi Publ., 2017. Pp. 122-126. (In Russian)
10. 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)
11. 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)
12. 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)
13. 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)
14. 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)
15. Mitra D., Ramakrishnan K.G. *Technics for traffic engineering of multiservice in priority networks. BLTJ*. 2001. Vol. 1. Pp. 123-130.
16. Zima V.M., Moldovyan A.A., Moldovyan N.A. *Bezopasnost' global'nykh setevykh tehnologij* [The global security network technologies]. St. Petesburg: SPbU Publ., 1999. 234 p. (In Russian)
17. 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)
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Burenin A.N., Legkov K.E. *Main problems of safety of subsystems of providing management systems with uniform time of elements with difficult organizational and technical objects. T-Comm*. 2019. Vol. 13. No. 1. Pp. 45-53. (In Russian)
22. Burenin A.N., Legkov K.E., Terechenko G.V. *Security management of functioning of a subsystem of providing management system with uniform time of elements with a difficult organizational and technical object. T-Comm*. 2019. Vol. 13. No. 2. Pp. 36-45. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Burenin A. N., PhD, Full Professor, Chief specialist of "Research Institute "Rubin";
Legkov K. E., PhD, Docent, Head of the Department of automated systems of control of the Military Space Academy.



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10267

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОКОЛОВ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ В СРЕДЕ MATLAB

ДОРОГОВ**Александр Юрьевич¹****ПОТАПОВ****Илья Андреевич²****ТУТЕНЕ****Андрей Степанович³****АННОТАЦИЯ**

Рассмотрены имитационные модели протоколов маршрутизации и транспорта данных для использования в беспроводных сетях MANET с динамически изменяемой топологией. Классическими областями применения подобных радиосетей являются боевые действия, чрезвычайные ситуации, мобильные роботы, сенсорная телеметрия, мобильные конференции и т. п. Каждый узел в MANET сети работает одновременно как терминальный узел и как маршрутизатор. Ключевой задачей в MANET сетях является задача маршрутизации. В данной работе представлены методы и результаты исследования трех протоколов маршрутизации FSR, GSR, зондового и транспортного датаграммного протокола передачи данных. Моделирование проводилось для сети, состоящей из 32 узлов. При моделировании предполагалось, что все каналы связи имеют задержки, определяемые скоростью передачи данных и длиной передаваемых пакетов. В работе описаны принципы построения имитационной модели в программной среде MATLAB. Показано, что создание имитационных моделей протоколов маршрутизации в среде MATLAB может быть основано на принципе «календаря событий». Общая очередь календаря событий обрабатывается во временной шкале по дисциплине «первый пришел-первый обработан». Представлены результаты моделирования сети для различных вариантов параметров протоколов FSR, GSR для скоростей передачи данных от 1200 до 19200 бит/сек. В результате моделирования определены объемы служебного трафика, средние и пиковые нагрузки, размеры очередей маршрутизаторов, средние размеры служебных пакетов. Показана необходимость оптимального выбора параметров настройки протоколов для уменьшения времени сходимости алгоритмов. Исследованы особенности работы зондового протокола. Исследованы вероятностно-временные характеристики транспортного датаграммного протокола. Разработанные модели позволяют оценить динамику протокола, время сходимости алгоритма маршрутизации, служебный трафик, и выбрать оптимальные настроечные параметры алгоритма.

Сведения об авторах:

¹д.т.н., доцент, главный научный сотрудник публичного акционерного общества «Информационные телекоммуникационные технологии («Интелтех»)» г. Санкт-Петербург, Россия, vaksa2006@yandex.ru

²инженер-программист публичного акционерного общества «Информационные телекоммуникационные технологии («Интелтех»)» г. Санкт-Петербург, Россия, pia-98@mail.ru

³инженер-программист публичного акционерного общества «Информационные телекоммуникационные технологии («Интелтех»)» г. Санкт-Петербург, Россия, fat-complex@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: маршрутизация; протокол; имитационная модель; беспроводные сети; MANET.

Введение

Перспективным подклассом беспроводных мобильных телекоммуникационных сетей являются ad hoc сети (MANET — Mobile Ad hoc NETWORKS) — самоорганизующиеся сети с динамически изменяющейся топологией. Классическими областями применения подобных радиосетей являются боевые действия, чрезвычайные ситуации, мобильные роботы, сенсорная телеметрия, мобильные конференции и т. п. Особенности мобильных сетей являются: динамичная топология; ненадежность и динамичность радиоресурса, коллективный характер его использования; ограниченность и неоднородность ресурсов узлов (энергоемкость батарей, производительность процессоров, объем памяти и т. д.); ограниченная безопасность и др. [1, 9–14]. Каждый узел в ad hoc сети работает одновременно как терминальный узел и как маршрутизатор. Поэтому ключевой задачей в MANET сетях является задача маршрутизации.

Маршрутизация принадлежит сетевому уровню относительно семиуровневой ISO/OSI модели. Протоколы маршрутизации используются для обеспечения узлов информацией, необходимой для отправки пакетов следующему узлу на пути от источника до получателя по всем маршрутам.

Основными требованиями к протоколам маршрутизации мобильных сетей являются: децентрализованное функционирование; минимальная загрузка сети служебной информацией; отсутствие заикливания маршрутов; быстрая сходимость; построение маршрута заданного качества; поддержка однонаправленных каналов и др. В данной работе представлены методы и результаты трех протоколов маршрутизации. Моделирование проводилось для сети, состоящей из 32 узлов. Топология сети и распределение степеней

связанности вершин показаны на рис. 1. При моделировании предполагалось, что все каналы связи имеют задержки, определяемые скоростью передачи данных и длиной передаваемых пакетов. Разработанные модели позволяют оценить динамику протокола, время сходимости алгоритма маршрутизации, служебный трафик, средние и пиковые нагрузки в сети, размеры очередей маршрутизаторов и выбрать оптимальные настроечные параметры алгоритма.

Методы моделирования

Оценку характеристик протоколов осуществляют как правило средствами имитационного моделирования. На рынке представлены достаточно много специализированных платформ имитационного моделирования для телекоммуникационных сетей, к ним относятся: Prophesy, Modeler, NetMarker XA, SES/Stratigizer, Arena, NS-3 и др. Данные средства содержат встроенные библиотеки стандартных протоколов семиуровневой модели ISO/OSI и используются для моделирования различных вариантов типовых сетей. Модели сетей создаются достаточно быстро, как правило, с помощью визуального проектирования и имеют развитые возможности по отображению результатов. Однако для моделирования новых протоколов в рамках данных платформ требуются значительные усилия, связанные с расширением библиотек алгоритмов. В этой ситуации универсальные моделирующие средства такие как MatLab обладают преимуществом по оперативности разработки частных моделей.

Создание имитационных моделей протоколов маршрутизации в среде MatLab может быть основано на принципе «календаря событий». Календарь представляет собой общую очередь в которой размещаются служебные пакеты,

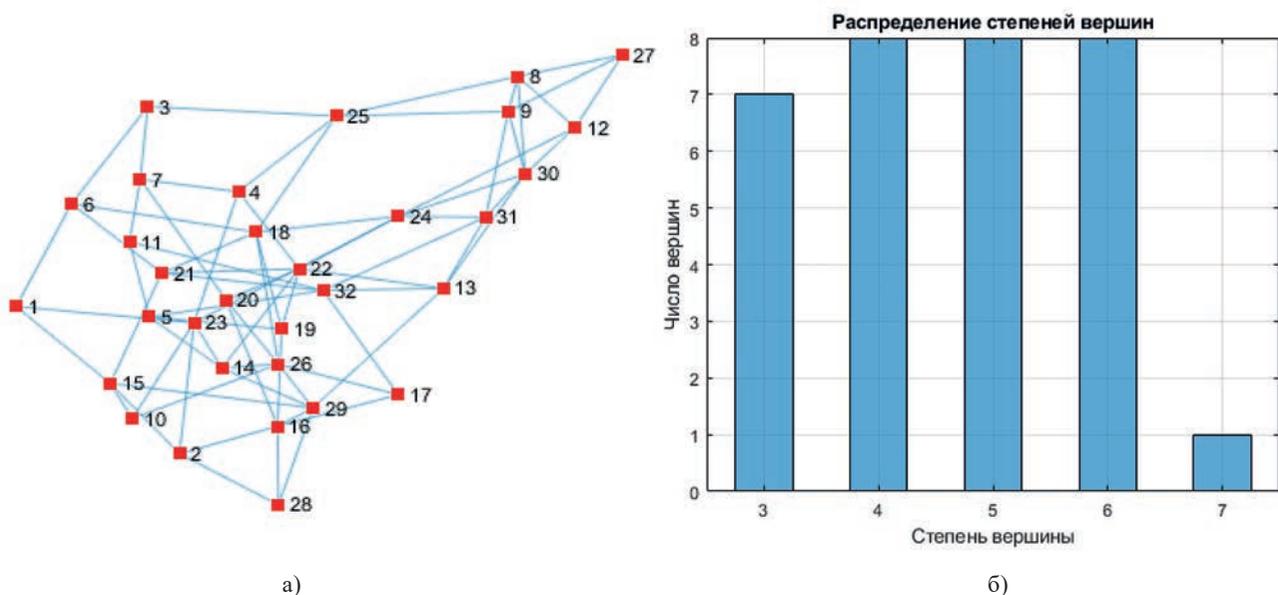


Рис. 1. Топология тестовой сети и распределение степеней связанности вершин

поступающие от всех узлов сети. Протоколы маршрутизации осуществляют пересылку служебных пакетов между смежными узлами, которые содержат информацию о топологии сети. В моделирующей программе каждый пакет содержит адресную часть, служебную информацию и метку времени, определяющую время наступления события связанного с началом обработки пакета на целевом узле. Метка времени в порождаемом пакете определяется скоростью распространения пакета через сегмент сети, а также моментом завершения передачи последнего пакета выходной очереди маршрутизатора на том же сегменте. Общая очередь календаря событий обрабатывается во временной шкале по дисциплине «первый пришел-первый обработан».

Моделирование FSR протокола

FSR (Fisheye State Routing) — иерархичный проактивный протокол маршрутизации [2], целью создания которого была попытка уменьшить объем рассылаемой по сети служебной информации за счет использования биологической концепции «рыбьего глаза». При реализации данной концепции каждый узел сети осуществляет периодически широковещательные рассылки ко всем своим ближайшим соседям, причем для сокращения служебного трафика топологическая информация об узлах сети, известная текущему узлу, включается в рассылку только частично, в зависимости от удаленности узлов. Чем дальше находится узел от текущего узла, тем реже информация о нем включается в обновляющую рассылку.

Топологическая информация текущего узла представляет собой таблицу, где каждому известному узлу сети соответствует одна строка, содержащая актуальный список его ближайших соседей, время последнего обновления и порядковый номер обновления. Порядковые номера используются при заменах записей. В момент широковещательной рассылки топологической информации, узел сначала проверяет по таймауту записи в своей топологической таблице, и если топологическая информация об узле не обновлялась в течении интервала таймаута, то она уничтожается, это правило позволяет отслеживать изменения топологии сети. Временной интервал таймаута устанавливается трехкратным по отношению к интервалу обновления. Широковещательное обновляющее сообщение к ближайшим узлам представляет собой набор записей, выделенных из топологической таблицы текущего узла.

Когда узел получает обновляющее сообщение, он сначала проверяет узел отправителя на принадлежность к своему списку состояний связей. Если передающий узел является новым ближайшим соседом, он будет добавлен в этот список. В противном случае он будет обновлен по метке времени в списке соседей. Узел затем обрабатывает информацию о связях, содержащуюся в сообщении обновления по следующему правилу:

1. Если это новый узел, ранее неизвестный текущему узлу то будет создана новая запись в топологической таблице и заполнена соответствующей информацией.

2. В противном случае только самое последнее назначение копируется к топологической таблице. Т.е. если какая-нибудь запись во входном сообщении имеет больший порядковый номер, относящийся к узлу j по сравнению с номером, сохраняемым в топологической таблице текущего узла, локальная запись будет заменена входящей записью.

3. Для входящей записи не попадающего в два описанных случая, т.е. если ее порядковый номер меньше чем предварительный порядковый номер сохраняемой записи в текущей топологической таблице узла, эта запись должна быть послана при следующем обновлении.

Принятый пакет после извлечения информации уничтожается. Во всех случаях, когда топологическая запись добавляется или корректируется, в топологической таблице фиксируется текущее время обновления. После того как все входящие записи проверены, таблица маршрутов вычисляется заново, но только в том случае если обнаружены какие-либо изменения в топологической таблице. Для расчета маршрутов используется алгоритм Дейкстры, мерой расстояния может служить либо минимальное число сегментов сети на маршруте между узлами, либо минимальная временная задержка пересылки пакета по многосегментному маршруту. По степени удаленности от текущего узла все узлы разделяются на FSR-зоны. Топологическая информация об узлах, принадлежащих FSR-зоне i включается в пакеты рассылки текущего узла с одинаковой частотой. Критерием сходимости алгоритма маршрутизации в модели могут служить тождественность восстановленных на каждом узле топологий сети к априорно известной топологии.

Характеристики работы алгоритма FSR-маршрутизации определяются настраиваемыми временными параметрами. Методик расчета этих параметров в настоящее время не существует. Рекомендуемые значения далеки от оптимальных, что приводит к необходимости моделирования протокола для конкретной топологии сети.

Результаты моделирования FSR протокола

Нормативный документ по FSR протоколу [3, 5–8] рекомендует использовать в сети две FSR зоны: ближнюю и дальнюю с параметрами протокола представленными в колонке «Рекомендация» табл. 1.

Документ [3] рекомендует также использовать для передачи топологической информации IP пакеты. Заголовочная часть IP пакета содержит 32 разрядные адреса узлов источника и получателя, полную длину пакета в байтах, контрольную сумму и другие поля, необходимые для поддержки IP-протокола, часть этих полей опциональна. Минимальная длина заголовка 20 байт.

Таблица 1

Параметры моделирования протокола FSR

Параметр	Обозначение параметра	Рекомендация сек.	Эксперимент сек.
Интервал рассылки для узлов ближней зоны	IntraScope_Interval	5	1
Интервал рассылки сообщений для удаленных узлов	IntraScope_Interval	15	3
Таймаут хранения топологической информации	NEIGHBOR_TIMEOUT	15	3

Информационная часть пакета определена документом [3] и представлена в табл. 2.

Числа в скобках указывают размер полей в битах. Пакет состоит из записей, где каждая запись содержит адреса ближайших соседей для узла сети, порядковый номер обновления и число соседних узлов. Представленный выше формат не содержит адресные заголовки пакета и управляющие поля IP пакета. По топологии сети показанной на рис. 1а не сложно рассчитать максимальный размер пакета топологической информации для моделируемой сети, при 32 разрядных адресах с учетом 20 байтного заголовка IP пакета он будет равен 744 байта.

На рис. 2 показана динамика трафика служебных пакетов протокола маршрутизации при скорости в каналах 1200 бит/сек. Ступенчатые линии соответствуют накопленному трафику порождаемых пакетов. Длина ступени определяется параметром IntraScope_Interval — интервалом рассылки сообщений в ближней зоне. Вертикальные стробы на графике соответствуют накопленному трафику удаляемых пакетов.

Интервал рассылки сообщений для дальней зоны (IntraScope_Interval) в три раза больше чем для ближней зоны, поэтому каждая третья ступень графиков выше двух

предыдущих, и соответственно гуще будут стробы удаляемых пакетов (см. рис. 2б). Получив пакеты обновления, узлы осуществляют восстановление топологии сети и расчет дистанций ко всем узлам сети по алгоритму Дейкстры. На основе данных расчетов строится маршрутно-адресная таблица, определяющая оптимальное продвижение информационных пакетов по сети. Пример таблицы для узла 3 показан на рис. 3.

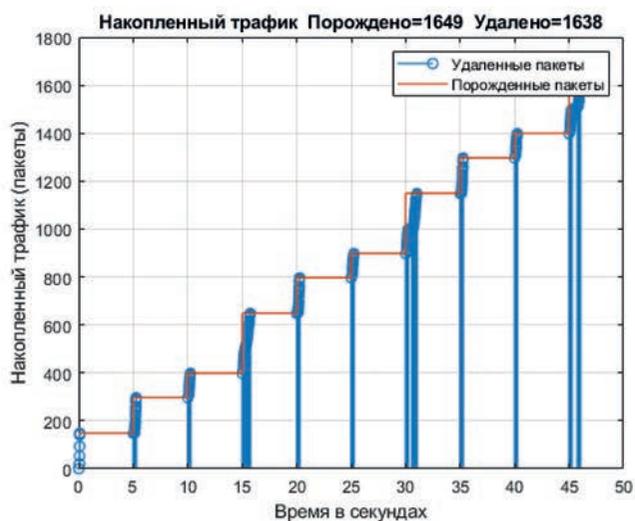
Критериями сходимости алгоритма маршрутизации в модели служит тождественность топологий сети построенных на каждом узле с априорно известной топологией сети. Моделирование проводилось для двух вариантов параметров (столбцы «Рекомендация», «Эксперимент» в табл. 1). При расчете длины обновляющего сообщения использовался формат, представленный в табл. 2 с добавкой 20 байтного заголовка IP пакета. В табл. 3 приведены результаты моделирования по двум вариантам значений параметров. Значения служебной нагрузки на сеть указанные в таблице вычисляются на интервале сходимости алгоритма маршрутизации и нормируются к пропускной способности сети. Расчетная пропускная способность данной сети равна 177600 бит/сек.

Рис. 2 демонстрирует два крайних случая выбора настроечных параметров протокола маршрутизации.

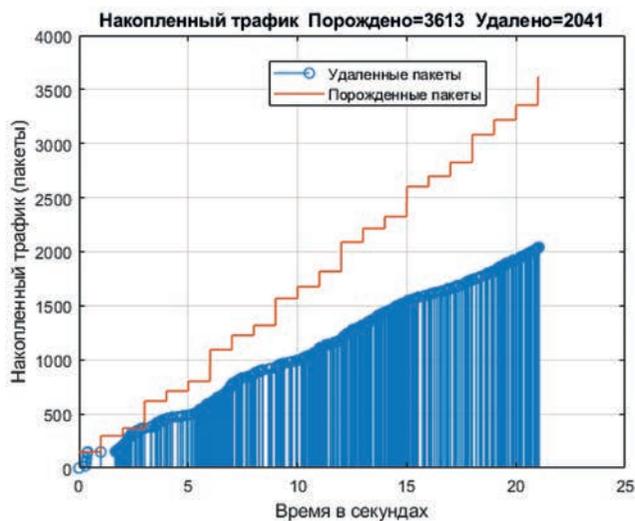
Таблица 2

Формат информационной части пакета FSR-протокола

Длина пакета(16)	Резерв(16)
Адрес узла1(32)	
Порядковый номер обновления узла 1(24)	N1-число соседних узлов(8)
Адрес соседнего узла 1(32)	
-//-	
Адрес соседнего узла N1(32)	
Адрес узла 2(32)	
Порядковый номер обновления узла 2(24)	N2 –число соседей узла 2(8)
Адрес соседнего узла 1(32)	
-//-	
Адрес соседнего узла N2(32)	
-//-	



а



б

Рис. 2. Динамика служебного трафика FSR-маршрутизации

	Destination_Node	Destination_Port	Next_hop_address	Distance
1	1	1	node=6 port=2	2
2	2	1	node=6 port=2	4
3	3	-1	node=3 port=-1	0
4	4	1	node=7 port=1	2
5	5	1	node=7 port=1	3

Рис. 3. Маршрутно-адресная таблица

Таблица 2

Результаты моделирования протокола FSR

Вариант модели	Время сходимости сек.	Служебный трафик бит.	Средний размер пакета байт	Нагрузка на сеть	Пиковая нагрузка	Мах. размер очереди
Рекомендуемые параметры						
FSR IP 1200 бит/сек	50,8	3193344	239	0,354	0,406	2
FSR IP 2400 бит/сек	47,9	3087904	237	0,182	0,139	2
FSR IP 4800 бит/сек	46,4	3093696	237	0,093	0,099	2
FSR IP 9600 бит/сек	45,7	3093696	237	0,047	0,050	2
FSR IP 19200 бит/сек	45,4	3093696	237	0,024	0,025	2
Экспериментальные параметры						
FSR IP 1200 бит/сек	21,1	3259616	200	0,872	1,87	14
FSR IP 2400 бит/сек	11,9	2664320	220	0,631	0,989	4
FSR IP 4800 бит/сек	10,4	3134144	236	0,422	0,501	2
FSR IP 9600 бит/сек	9,72	3087904	237	0,224	0,249	2
FSR IP 19200 бит/сек	9,36	3093696	237	0,116	0,124	2



На рис. 2а время обработки служебных пакетов занимает малую долю интервала рассылки. Поэтому без ущерба работы протокола настроечные параметры могут быть уменьшены, что позволит уменьшить время сходимости алгоритма. Время обработки пакетов включает в себя и время доставки на соседний узел, с увеличением скорости передачи данных время доставки уменьшается поэтому степень уменьшения значений параметров может быть больше. На рис. 2б показан противоположный случай, когда параметры выбраны слишком малыми и при низкой канальной скорости (1200 бит/сек) на интервале рассылки не хватает времени для обработки пакетов, в результате образуются очереди на обработку и время сходимости алгоритма увеличивается.

Результаты моделирования GSR протокола

Протокол GSR (Global State Routing) является вариантом FSR протокола с единственной FSR-зоной. В этом случае не существует различий между узлами дальней и ближней зоны. Обновление топологической информации со смежными узлами в этом случае определяется константами представленными в табл. 4.

Моделирование выполнялось для двух наборов параметров «Рекомендация» и «Эксперимент». Результаты моделирования представлены в табл. 5.

Моделирование зондового протокола

Суть метода зондовой маршрутизации [4, 15] заключается в следующем: с любого узла начинается рассылка к смежным узлам коротких пакетов, называемыми зондами, которые накапливают в себе информацию о состоянии сети. Каждый зонд содержит битовую карту, длина которой равна максимально-возможному числу узлов сети. При прохождении узла в битовой карте зонда устанавливается единица в позиции, определяемой номером узла. При получении зонда узел анализирует информацию, содержащуюся в битовой карте, и по результатам анализа добавляет записи в собственную маршрутно-адресную таблицу. После чего узел проверяет ряд условий для принятия решения о репликации или уничтожении зонда. В случае репликации в зонд добавляется информация о прохождении текущего узла и зонд рассылается по всем исходящим ветвям текущего узла.

Таблица 4

Параметры моделирования протокола FSR

Параметр	Обозначение параметра	Рекомендация сек.	Эксперимент сек.
Интервал рассылки для узлов ближней зоны	IntraScope_Interval	5	1
Таймаут хранения топологической информации	NEIGHBOR_TIMEOUT	15	3

Таблица 5

Результаты моделирования протокола GSR

Вариант модели	Время сходимости сек.	Служебный трафик бит.	Средний размер пакета байт	Нагрузка на сеть	Пиковая нагрузка	Мах. размер очереди
Рекомендуемые параметры						
GSR IP 1200 бит/сек	30.8	2611744	422	0.477	0.783	2
GSR IP 2400 бит/сек	22.9	2153472	422	0.285	0.402	1
GSR IP 4800 бит/сек	21.5	2153472	422	0.141	0.201	1
GSR IP 9600 бит/сек	20.7	2153472	422	0.073	0.101	1
GSR IP 19200 бит/сек	20.4	2153472	422	0.037	0.05	1
Экспериментальные параметры						
GSR IP 1200 бит/сек	51.0	8384328	372	0.926	3.00	36
GSR IP 2400 бит/сек	11.25	2965152	349	0.742	1.55	6
GSR IP 4800 бит/сек	6.5	2704448	441	0.586	1.06	3
GSR IP 9600 бит/сек	4.7	2153472	422	0.321	0.503	1
FSR IP 19200 бит/сек	4.4	2153472	422	0.174	0.251	1

	Node-1	Node-2	Node-3	Node-4	Node-5
1	2	3	1	1	-1
2	1	2	4	2	-1
3	4	4	3	3	-1
4	3	1	2	4	-1

Рис. 4. Матрица маршрутизации

Маршрутно-адресные таблицы (матрицы маршрутизации) строятся на каждом узле сети. Число столбцов в матрице равно числу целевых узлов в сети (номер текущего узла из списка целевых узлов исключается, но столбец текущего узла формально присутствует в матрице). Каждый элемент матрицы маршрутизации содержит номер порта текущего узла, указывающего направление через которое следует передавать пакет для целевого узла. При зондовом протоколе матрица маршрутизации содержит столько строк сколько портов имеет текущий узел. Строки упорядочены по приоритетам. В первой строке содержатся направления высшего приоритета, обеспечивающего наиболее быструю доставку пакета к целевым узлам. Во второй строке содержатся направления, обеспечивающие более медленную доставку пакета по сравнению с первой и т.д., таким образом приоритет направлений снижается при увеличении номера строки матриц маршрутизации. Пример построенной матрицы маршрутизации для узла 5 показан на рис. 4.

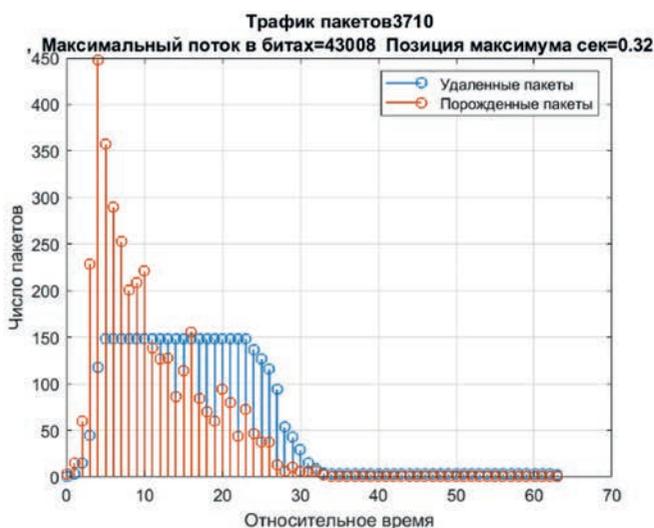
В начале цикла маршрутизации маршрутно-адресная таблица узла заполнена нулями за исключением столбца, соответствующего текущему узлу, который заполнен значением (-1). Если зонд прибыл в узел первым, то заполняется первая строка матрицы маршрутизации, следуя правилу:

в элементы строки с номерами узлов, через которые прошел зонд, заносится номер порта, через который зонд был получен на текущем узле. Поступление последующих зондов на текущий узел приводит к заполнению нулевых элементов первой строки, которые не были заполнены ранее, а в случае их занятости последовательно заполняются нулевые элементы второй и последующих строк. Если в момент поступления зонда все элементы матрицы маршрутизации узла заполнены, то зонд уничтожается. Зонд будет также уничтожен, если информация на узле уже содержит информацию, доставленную зондом. В остальных случаях зонд добавляет в свою битовую карту текущий узел и реплицируется по всем исходящим направлениям. В случае обнаружения цикла, т.е. когда информация, доставленная зондом уже содержит номер текущего узла зонд рассылается по всем направлениям кроме того по которому он был получен (для стартового узла это ограничение не действует). Критерием сходимости алгоритма маршрутизации в модели могут служить исчерпание очереди календаря событий.

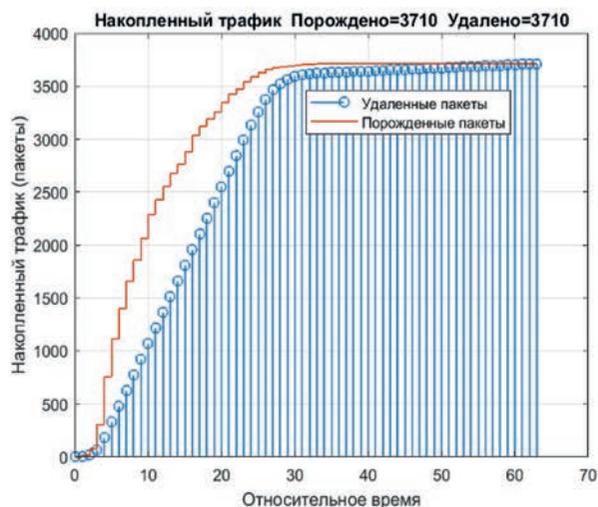
Результаты моделирования зондового протокола

Моделирование проводилось для сети, показанной на рис. 1а. При моделировании предполагалось, что все каналы связи имеют одинаковые задержки. На рис. 5 показана динамика трафика служебных пакетов при скорости в каналах 1200 бит/сек. Размер зонда выбран равным 12 байт. На приведенных графиках единица относительного времени соответствует длительности пересылки зонда по каналу связи. В качестве стартового узла использовался первый узел. В результате моделирования получено:

- Полный служебный трафик зондов составил 3710 пакетов, при размере каждого зондового пакета 12 байт.



а



б

Рис. 5. Динамика служебного трафика зондового протокола маршрутизации:

а — динамика трафика; б — накопленный трафик



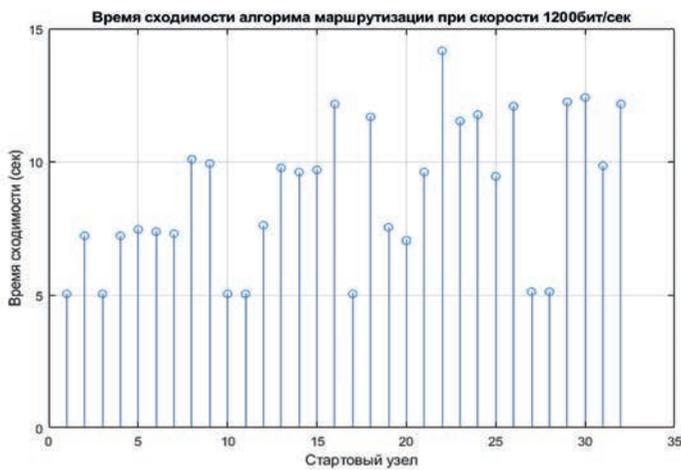
- Время сходимости алгоритма маршрутизации 5,04 сек при скорости передачи данных 1200 бит/сек.
- Средняя нагрузка на сеть на интервале сходимости 0,398 от пропускной способности сети.
- Пиковая нагрузка на момент максимума трафика равна 1,27 от пропускной способности сети.
- Поскольку пиковая нагрузка превышает пропускную способность возникают очереди на выходе маршрутизаторов. Максимальная длина выходной очереди при данных условиях эксперимента составила 29 пакетов.

Для зондового протокола время сходимости алгоритма маршрутизации, и нагрузка сети зависят от стартового

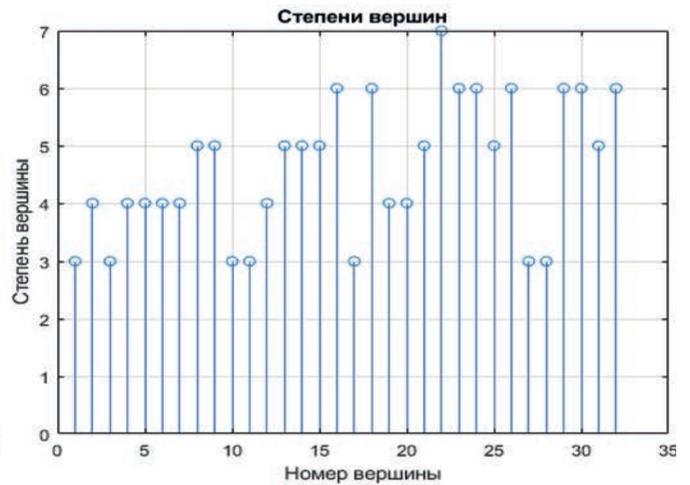
узла распространения зондов. На рис. 6а показана скорость сходимости алгоритма маршрутизации в зависимости от выбора стартового узла.

Максимальное время равно 14,16 сек. (узел 22), минимальное время равно 5,04 сек (узел 17). На рис. 6б показаны степени вершин исследуемой сети. Сравнение двух графиков показывает, что существует явная зависимость времени сходимости алгоритма от степени стартового узла, чем выше степень стартового узла, тем больше время сходимости алгоритма маршрутизации.

На рис. 7а представлена зависимость средней нагрузки создаваемой служебным трафиком в зависимости

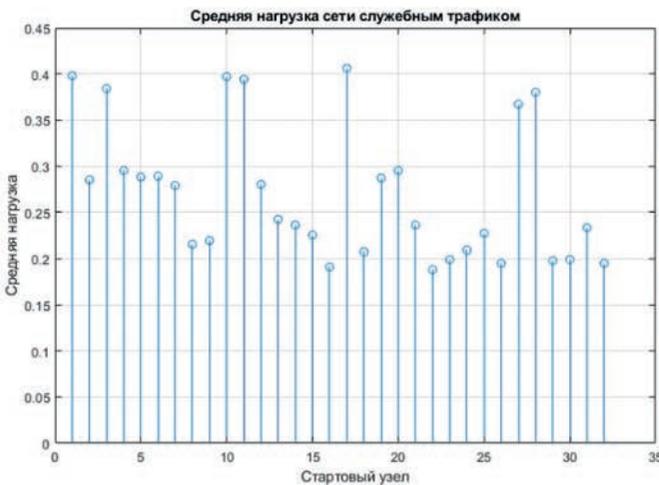


а

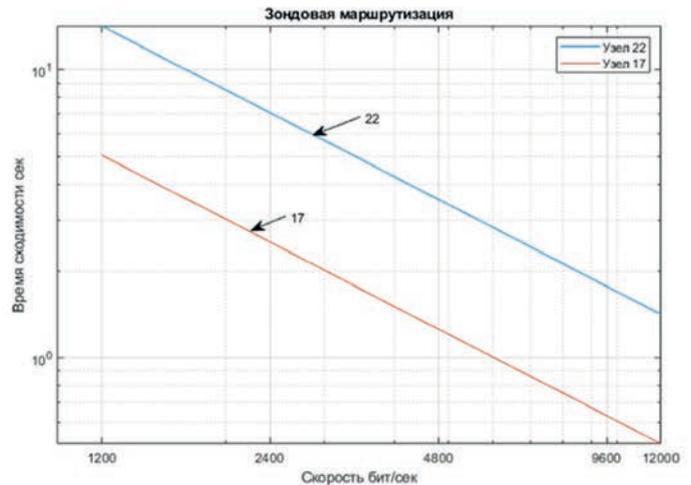


б

Рис. 6. Эффект влияния стартового узла на время сходимости алгоритма



а



б

Рис. 7. Средняя нагрузка на сеть и время сходимости алгоритма зондовой маршрутизации

от стартового узла. По оси ординат отложена нагрузка, нормированная к пропускной способности сети. Объем трафика для стартового узла 17 составил 362976 бит (3781 пакет), для стартового узла 22: 472224 бит (4919 пакетов).

Максимальная степень загрузки сети служебным трафиком 0,406 (узел 17) а минимальная 0,188 (узел 22). Из приведенных графиков видно, что чем выше степень загрузки сети служебным трафиком, тем меньше время сходимости алгоритма маршрутизации. Учитывая зависимость времени сходимости алгоритма от степени вершины можно заключить что, степень загрузки служебным трафиком тем выше, чем меньше степень стартовой вершины.

С увеличением скорости передачи данных время сходимости алгоритма маршрутизации линейно уменьшается. Характер зависимости для стартовых узлов 17 и 22 показан на рис 7б). На скорости 9600 бит/сек время сходимости для стартового узла 22 составляет 1,77 сек, а для узла 17 составляет 0,63 сек. Пропускная способность сети линейно увеличивается с увеличением скорости, при этом нормированная нагрузка сети по служебному трафику не изменяется.

Дефекты матриц маршрутизации

В идеальном варианте работы алгоритма зондовой маршрутизации предполагается, что в процессе распространения зондов по сети все элементы матриц маршрутизации будут полностью заполнены. Так и происходит для сетей с малым количеством узлов. Однако результаты моделирования для тестовой сети с 32 узлами показывают, что по завершению алгоритма маршрутизации полного заполнения матриц не происходит — в матрицах маршрутизации остаются не заполненные элементы (дефекты). Число дефектов в матрицах маршрутизации зависит от стартового узла. На рис. 8 показаны количественные оценки суммарных дефектов матриц маршрутизации в зависимости от стартового узла. При расчете оценок, суммирование дефектов выполнялось по всем узлам и нормировалось в процентах к общему объему заполняемых элементов. Из графика видно, что объем дефектов в худшем случае не превосходит 0,5%. Сравнение графика оценки со степенями вершин показывает, что минимальный процент дефек-

тов достигается для стартового узла с максимальным числом портов (максимальной степенью вершины). Дефекты в матрицах маршрутизации концентрируются в строках с наименьшим приоритетом направлений. При практической реализации алгоритма маршрутизации не заполненные позиции матриц, могут быть без ущерба заполнены значениями строки с более высоким приоритетом.

Моделирование транспортного протокола

Датаграмный протокол транспортного уровня обеспечивает передачу сообщений от узла отправителя к узлу получателя. При передаче сообщения разделяются на пакеты, размеры пакетов зависят от помеховой обстановки и условий распространения радиоволн. Информационные пакеты имеют формат, показанный на рис. 9. Общий заголовок содержит сетевые адреса конечных узлов. Специальный заголовок содержит информацию о типе передаваемых данных, типе протокола, идентификаторе сообщения используемой кодировки, и другой информации которая зависит от используемого протокола. При моделировании выбирался максимальный размер специального заголовка равный 15 байт.

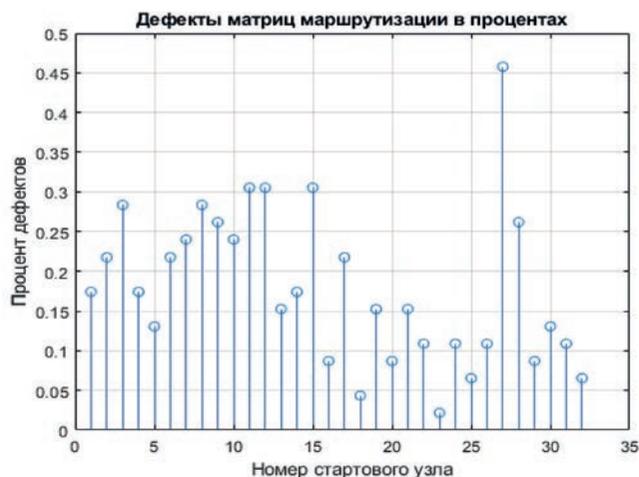


Рис. 8. Дефекты в матрицах маршрутизации



Рис. 9. Формат радиопакета



Пакеты пересылаются по целевым адресам, следуя по маршрутам определяемым периодически выполняемым протоколом маршрутизации. Подтверждение приема пакетов в датаграммном протоколе не производится. В реальной сети подтверждение принятых сообщений квитанциями выполняется на уровне приложений.

Задачей моделирования является оценка вероятностно-временных характеристик (ВВХ) передачи сообщений. С целью упрощения модели введены следующие ограничения (за счет удаления элементов транспортного протокола либо не влияющих на характеристики передачи, либо реализующих принцип наихудшего случая при передаче данных):

1. Передача пакетов квитанциями не подтверждается.
2. Передача сообщений подтверждается положительными или отрицательными квитанциями.
3. Если пакет принят с ошибкой формируется отрицательная квитанция на все сообщение.
4. Повторение сообщения при наличии ошибочных пакетов не поддерживаются моделью.
5. При отрицательной квитанции фиксируется ошибка сообщения на передающей стороне.
6. Случайность выбора радионаправления осуществляется по равномерному закону распределения для пар источник-приемник сообщения.
7. Источником сообщений является пуассоновский поток.
8. При проведении экспериментов в модели MatLab используется статическая маршрутизация.
9. Интервалы таймаута при доставке пакетов и сообщений не обрабатываются.

Через интерфейс пользователя модели задаются следующие параметры:

1. Топология сети.
2. Скорость передачи данных в каналах связи.
3. Длина сообщения и категория срочности.
4. Размер пакета.
5. Интенсивность потока сообщений в процентах от пропускной способности.
6. Вероятность приема ошибочного пакета.

В процессе моделирования оценивались следующие характеристики:

1. Вероятность доставки пакета в нормативное время.
2. Максимальное время доставки пакета.
3. Среднее время доставки пакета.
4. Вероятность доставки сообщения в нормативное время.
5. Максимальное время доставки сообщения.
6. Среднее время доставки сообщения.
7. Вероятность доступа к услуге передачи данных в пределах нормативного интервала.

Оценка ВВХ производится для нагруженной сети. Нагрузка на сеть генерируется в виде пуассоновского потока сообщений. Категория срочности, размер сообщения и размер информационной части пакетов выбирается в процессе проведения эксперимента. Нагрузка устанавливается в процентах от максимальной пропускной способности сети. Пропускная способность сети равна сумме пропускных способностей дуплексных каналов связи:

$$C = 2 \sum_{i=1}^K b_i,$$

где K — число каналов связи в сети, b_i — скорость передачи данных в i — ом канале бит/сек. Максимальная интенсивность информационного потока сообщений определяется из соотношения:

$$\lambda = \frac{C}{M} [1/\text{сек}],$$

где M — полная длина сообщений с учетом заголовков пакетов. При моделировании нагрузка на сеть устанавливалась в процентах от максимальной интенсивности.

Оценка числа имитационных экспериментов

Оценка вычисляется исходя из доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ для интервала определяемого точно заданием нормативного уровня. При оценке вероятностей эксперименты соответствуют схеме независимых испытаний Бернули, где вероятность успеха (попадания во временной интервал) равна p , а не успеха $q = 1 - p$. Случайной величиной является количество успехов, удовлетворяющих биномиальному закону распределения. Согласно центральной предельной теореме при достаточно больших n (больше нескольких сотен) оценка вероятности для схемы Бернули имеет распределение, близкое к нормальному с математическим ожиданием $m = p$ и дисперсией $\sigma^2 = pq/n$. Для нормированного отклонения оценки от своего математического ожидания можно использовать выражение:

$$\Phi(t) = P\left(\left|\frac{\varepsilon}{\sigma}\right| < t_\alpha\right) \geq \alpha.$$

где $\Phi(t)$ функция нормального распределения с нулевым значением математического ожидания и единичной дисперсии, t_α — квантиль, соответствующая уровню достоверности α . Для $\alpha = 0,95$, значение $t_\alpha = 1,96$. Расчетная формула числа экспериментов в этом случае будет иметь вид:

$$n = t_\alpha^2 \frac{pq}{\varepsilon^2} = 3,8416 \frac{pq}{\varepsilon^2}. \quad (1)$$

В табл. 6 приведены расчетные значения числа экспериментов для оценки вероятностных характеристик. Оценки получены на основе нормативных требований к сети специальной радиосвязи.

Результаты экспериментов

Результаты имитационных экспериментов приведены в табл. 7.

Заключение

Имитационное моделирование является базовым средством разработки телекоммуникационных сетей, позволяющим оценить характеристики и выбрать настроечные параметры протоколов маршрутизации и передачи данных для беспроводных мобильных сетей.

Выбор настроечных параметров протокола FSR зависит от топологии и скорости передачи данных в линии

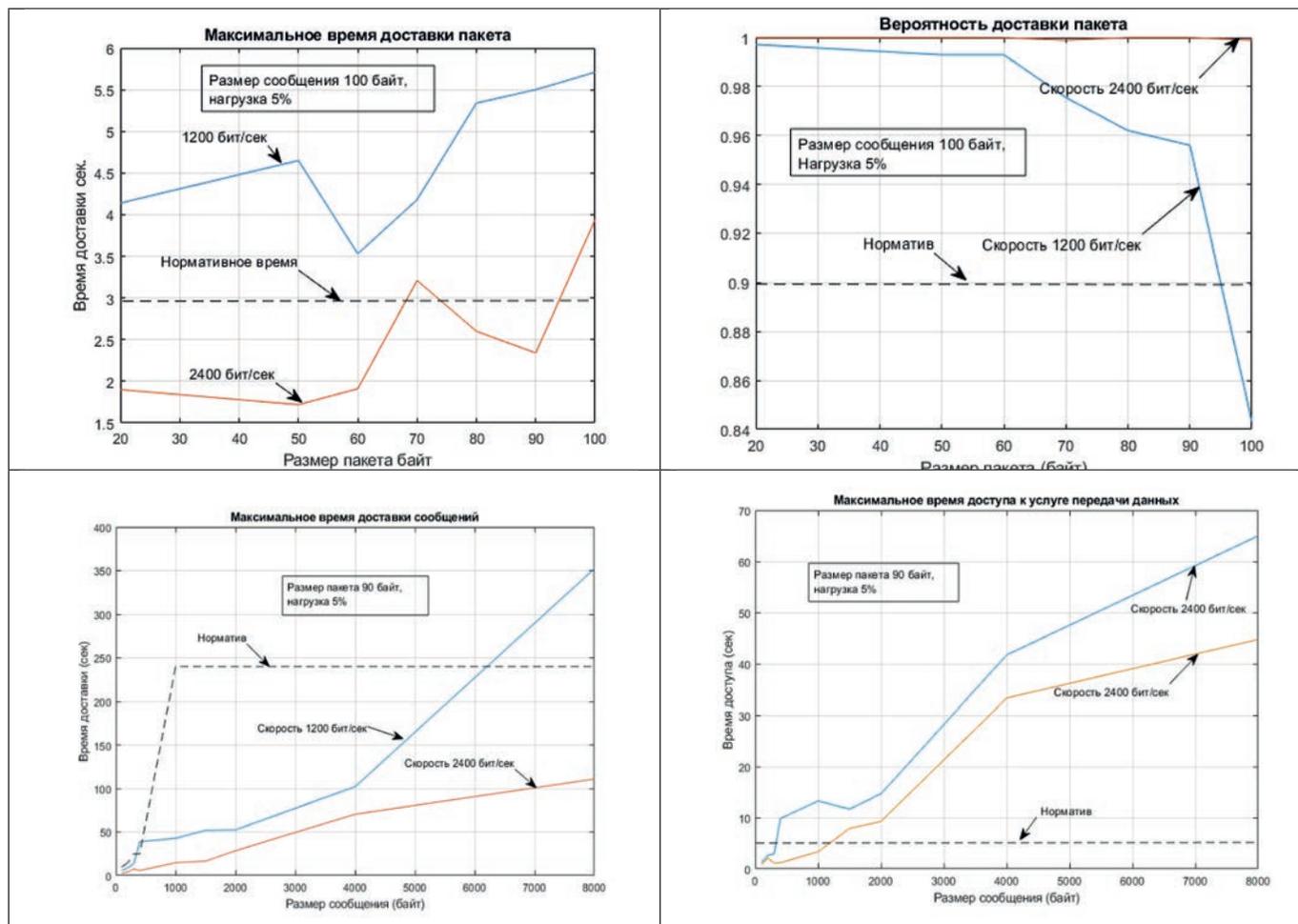
Таблица 6

Число имитационных экспериментов

Оцениваемая характеристика	Число экспериментов
Вероятность доставки пакета в нормативное время (3 сек.)	140
Вероятность доставки сообщения в нормативное время (10 сек.÷10 мин.) - норматив зависит от категории срочности сообщения	15000÷76000
Вероятность доступа к услуге передачи данных в нормативном интервале (5 сек.)	31000

Таблица 7

Время и вероятности доставки пакетов и сообщений для датаграмного транспортного протокола





ях связи. Критерием оптимальной настройки алгоритма по времени сходимости может служить наполненность интервалов рассылки процессами обработки пакетов. Эксперименты показывают, что для сети с данной топологией рекомендуемые параметры могут быть уменьшены в 3–4 раза без нарушения работы протокола. В результате, время сходимости алгоритма маршрутизации можно уменьшить более чем в 4 раза. Для окончательного выбора параметров протокола FSR для сети MANET необходимо выполнить моделирование для всех потенциально возможных вариантов «максимальной топологии» сети.

Протокол зондовой маршрутизации является распределенным, работает в асинхронном режиме и обладает исключительно простой алгоритмической реализацией. Благодаря этим особенностям обеспечивается высокая скорость сходимости алгоритма. Причем время сходимости, в отличие от алгоритма FSR, уменьшается пропорционально увеличению скорости передачи данных. Метод зондовой маршрутизации позволяет построить несколько вариантов маршрутов и упорядочить их по предпочтительности. Протокол маршрутизации учитывает фактические задержки в каналах связи и поэтому может адаптироваться к степени загрузки каналов сети. Протокол обладает очевидной зависимостью времени сходимости алгоритма и степени служебной нагрузки на сеть от выбора стартового узла, что позволяет найти оптимальное решение для конкретной топологии сети.

Выбор транспортного протокола для низкоскоростных беспроводных сетей обусловлен необходимостью максимального снижения накладных расходов на служебный трафик при поддержании приемлемой достоверности и своевременности передачи информационных данных. Датаграмный протокол обеспечивает минимальный служебный трафик за счет отказа от квитирования информационных пакетов. Повышение достоверности передачи сообщений выполняется на уровне приложений в тех ситуациях где это действительно необходимо. Результаты моделирования позволяют рациональным образом выбрать параметрическую область решений, удовлетворяющую нормативным требованиям.

Литература

1. *Миночкин А. И., Романюк В. А.* Маршрутизация в мобильных радиосетях — проблема и пути ее решения // Зв'язок. 2006. № 3. 15 с. URL: http://www.viti.edu.ua/files/rom/2006/1_2006.pdf (дата обращения 15.10.2018).
2. *Pei G., Gerla M., Chen T.-W.* Fisheye State Routing in Mobile Ad Hoc Networks // Proceedings of Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing, Taipei, Taiwan, April 2000. Pp. 1–3.
3. *Geria M., Pei G., Hong X., Chen T.* Fisheye State Routing Protocol (FSR) for Ad Hoc Networks. 2002. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-fsr-03> (дата обращения 15.10.2018).
4. *Аванесов М. Ю.* Метод зондового управления потоками данных в мультисервисных сетях с быстро меняющейся структурой // Информационный и космос. 2007. № 3. С. 35–40.
5. *Kleinrock L., Stevens K. A.* Fisheye: A Lenslike Computer Display Transformation. Technical report, UCLA, Computer Science Department. 1971.
6. *Bagrodia R. L., Meyer R. A., Takai M., Chen Y.-A., Zeng X., Martin J., Yoon Song H.* PARSEC: A parallel simulation environment for complex systems // Computer. 1998. No. 31(10). Pp. 77–85. DOI: 10.1109/2.722293
7. *Iwata A., Chiang Ch., Pei G., Gerla M., Chen T.* Scalable Routing Strategies for Ad hoc Wireless Networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1970. No. 179(8). DOI: 10.1109/49.779920
8. *Murthy S., Garcia-Luna-Aceves J. J.* An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks // Mobile Networks and Applications. 1970. No. 1(2). DOI: 10.1007/BF01193336
9. *Григорьев В. А., Лагутенко О. И., Паснаев Ю. А.* Сети и системы радиодоступа. М.: Эко-Трендз, 2005. 384 с.
10. *Hsu J., Bhatia S., Tang K., Bagrodia R., Acriche M. J.* Performance of mobile ad hoc networking routing protocols in large scale scenarios // Proceedings Conference: Military Communications Conference (MILCOM) Monterey, CA, 31 October — 03 November, 2004. IEEE. 2004. Vol. 1. Pp. 21–27. DOI: 10.1109/MILCOM.2004.1493241
11. *Corson S., Macker J.* Mobile Ad Hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations. IETF RFC2501. 1999. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc2501> (дата обращения 15.10.2018).
12. *Royer E. M., Melliard-Smith P. M., Moser L. E.* An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks // Proc. of IEEE International Conference on Communications. ICC Helsinki, Finland, 11–14 June 2001. IEEE, 2001. Pp. 857–861.
13. *Novatnack J., Greenwald L., Arora H.* Evaluating Ad hoc Routing Protocols with Respect to Quality of Service // Proceedings IEEE International Conference on Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications — WiMob'2005. (Montreal, Canada, August 22–14, 2005). IEEE, 2005. Vol. 3. Pp. 205–212. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.120.2511&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения 15.10.2018).
14. *Немес В. А.* Качество обслуживания в сетях связи. Обзор рекомендаций МСЭ-Т // Сети и системы связи. 1999. № 3. С. 66–71.
15. *Clacev G., Chizhik D., Goransson B., Howard S., Huang H., Kogiantis A., Molisch A. F., Moustakas A. L., Reed D., Xu H.* A Wideband Spatial Channel Model for System-Wide Simulations // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2007. Vol. 56. No. 2. Pp. 389–403.



MODELING OF WIRELESS NETWORK PROTOCOLS IN THE ENVIRONMENT OF MATLAB

ALEKSANDER YU. DOROGOV

Saint Petersburg, Russia, vaksa2006@yandex.ru

ILIYA A. POTAPOV

Saint Petersburg, Russia, pia-98@mail.ru

ANDREY C. TUTENE

Saint Petersburg, Russia, fat-complex@mail.ru

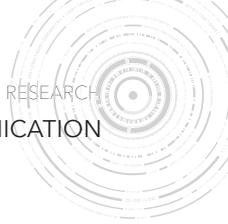
KEYWORDS: routing; Protocol; simulation model; wireless networks; MANET.

ABSTRACT

Simulation models of routing and data transport protocols for use in MANET wireless networks with dynamically changing topology are considered. Classic applications of such radio networks are combat operations, emergencies, mobile robots, sensor telemetry, mobile conferences, etc. Each node in the MANET network operates simultaneously as a terminal node and as a router. A key problem in MANET networks is the routing problem. This paper presents the methods and results of the study of three routing protocols FSR, FSR and probe protocol and also datagram protocol for data transport. The simulation was carried out for a network consisting of 32 nodes. In the simulation, it was assumed that all communication channels have delays determined by the data rate and the length of transmitted packets. The paper describes the principles of building a simulation model in the MATLAB software environment. It is shown that the creation of simulation models of routing protocols in the MATLAB environment can be based on the principle of "calendar of events". The total queue of the event calendar is processed in the timeline for the discipline "first come-first processed". The results of simulation FSR and GSR protocols for different parameters data transmission speeds in range from 1200 to 19200 bits/sec are represented. The simulation is used to determine the level of service of traffic, medium load and peak load, the queue lengths of routers, the average size of official packages. The necessity of optimal choice of protocol settings to reduce the convergence time of algorithms is shown. The features of the probe protocol are investigated. Probabilistic-time characteristics of the transport protocol are investigated. The developed models allow to evaluate the dynamics of the protocol, the convergence time of the routing algorithm, service traffic, and select the optimal tuning parameters of the algorithm.

REFERENCES

1. Minockkin A.I., Romaniuk B.A. Routing in mobile radio networks-the problem and ways to solve it. *Zviyazok [Connectivity]*. 2006. No. 3. 15 p. URL: http://www.viti.edu.ua/files/rom/2006/1_2006.pdf (date of access 15.10.2018). (In Russian)
2. Pei G., Gerla M., Chen T.-W. Fisheye State Routing in Mobile Ad Hoc Networks. *Proceedings of Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing*, Taipei, Taiwan, April 2000. Pp. 1-3.
3. Geria M., Pei G., Hong X., Chen T. *Fisheye State Routing Protocol (FSR) for Ad Hoc Networks*. 2002. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-fsr-03> (дата обращения 15.10.2018).
4. Avanesov M. Yu. The method of probe control of data flows in multi-service networks with a rapidly changing structure. *Information and Space*. 2007. No. 3. Pp. 35-40. (In Russian)
5. Kleinrock L., Stevens K.A. *Fisheye: A Lenslike Computer Display Transformation*. Technical report, UCLA, Computer Science Department. 1971.
6. Bagrodia R.L., Meyer R.A., Takai M., Chen Y.-A., Zeng X., Martin J., Yoon Song H. PARSEC: A parallel simulation environment for complex systems. *Computer*. 1998. No. 31(10). Pp. 77-85. DOI: 10.1109/2.722293
7. Iwata A., Chiang Ch., Pei G., Gerla M., Chen T. Scalable Routing Strategies for Ad hoc Wireless Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1970. No. 179(8). DOI: 10.1109/49.779920
8. Murthy S., Garcia-Luna-Aceves J.J. An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks. *Mobile Networks and Applications*. 1970. No. 1(2). DOI: 10.1007/BF01193336
9. Grigor'ev V.A., Lagutenko O.I., Raspaev Yu.A. *Seti i sistemy radio-dostupa [Radio access networks and systems]*. Moscow: Jeko-Trendz, 2005. 384 p. (In Russian)



10. Hsu J., Bhatia S., Tang K., Bagrodia R., Acriche M. J. Performance of mobile ad hoc networking routing protocols in large scale scenarios. *Proceedings Conference: Military Communications Conference (MILCOM), Monterey, CA, 31 October – 03 November, 2004*. IEEE, 2004. Vol. 1. Pp. 21-27. DOI: 10.1109/MILCOM.2004.1493241

11. Corson S., Macker J. *Mobile Ad Hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations*. IETF RFC2501. 1999. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc2501> (date of access 15.10.2018).

12. Royer E. M., Melliar-Smith P.M., Moser L.E. An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks. *Proc. of IEEE International Conference on Communications. ICC Helsinki, Finland, 11-14 June 2001*. IEEE, 2001. Pp. 857-861.

13. Novatnack J., Greenwald L., Arora H. Evaluating Ad hoc Routing Protocols with Respect to Quality of Service. *Proceedings IEEE International Conference on Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications – WiMob'2005, Montreal, Canada, August 22-24, 2005*. IEEE, 2005. Vol. 3. Pp. 205-212. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.120.2511&rep=rep1&type=pdf> (date of access 15.10.2018).

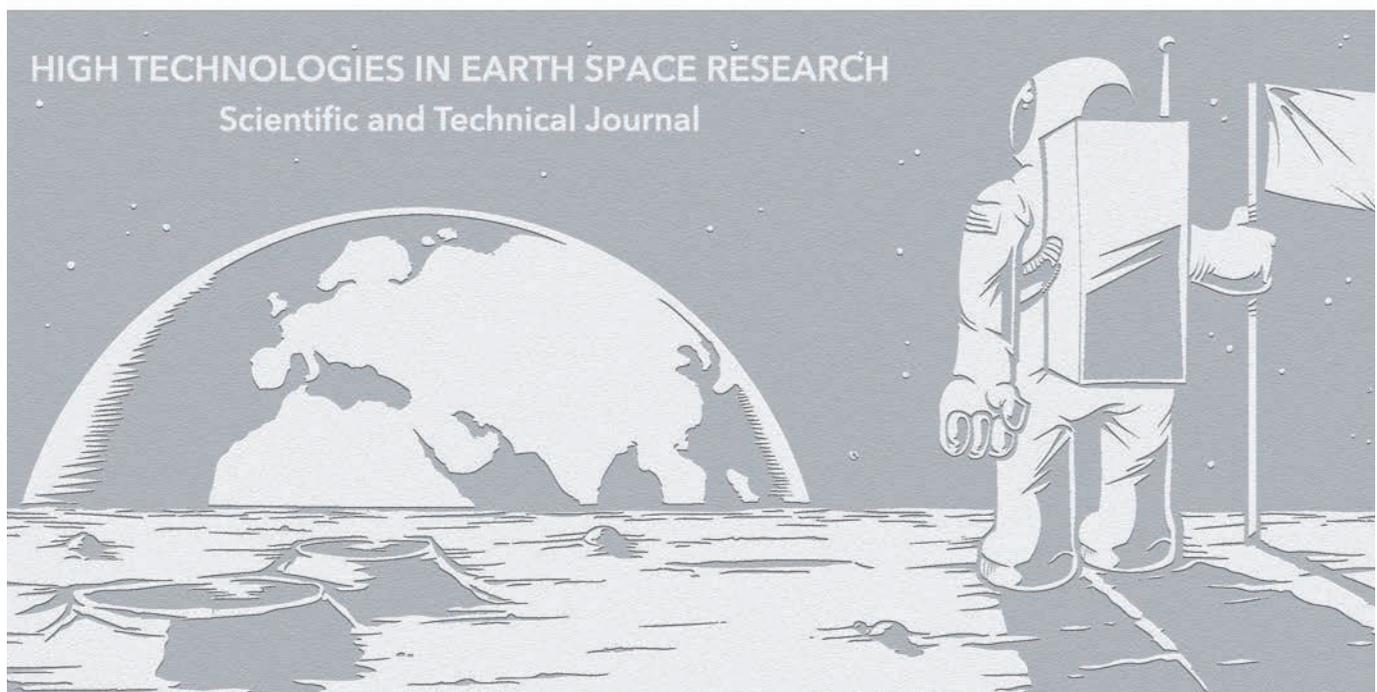
14. Netes V.A. Kachestvo obsluzhivaniya v setyakh svyazi. Obzor rekomendatsij MSJe-T [Quality of service in communication networks. Review of ITU-T recommendations]. *Seti i sistemy svyazi* [Networks and communication systems]. 1999. No. 3. Pp. 66-71. (In Russian)

15. Clacev G., Chizhik D., Goransson B., Howard S., Huang H., Kogiantis A., Molisch A.F., Moustakas A.L., Reed D., Xu H. A Wideband Spatial Channel Model for System-Wide Simulations. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2007. Vol. 56. No. 2. Pp. 389-403.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Dorogov A. Yu., PhD, Docent, Chief researcher of the JSC "Information and telecommunication technologies ("Inteltech");
Potapov I.A., engineer-programmer of the JSC "Information and telecommunication technologies ("Inteltech");
Tutene A.C. engineer-programmer of the JSC "Information and telecommunication technologies ("Inteltech)".

For citation: Dorogov A. Yu., Potapov I.A., Tutene A.C. Modeling of wireless network protocols in the environment of MatLab. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 3. Pp. 32-45. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10267 (In Russian)





doi: 10.24411/2409-5419-2018-10268

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ НОВОГО КЛАССА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

ПАВЛИКОВ**Сергей Николаевич¹****УБАНКИН****Евгений Иванович²****АННОТАЦИЯ**

Объект исследования – широкополосные сигналы в системах радиосвязи. Предмет – исследование корреляционных свойств нового класса широкополосных сигналов. Цель – обосновать выбор сигнала и метода его обработки для обеспечения максимума отклика согласованного фильтра при больших значениях относительной радиальной скорости между передатчиком и приёмником и значительном превышении уровня шума над уровнем сигнала на входе приемника. В работе проанализированы автокорреляционные и взаимные корреляционные функции определяющие область использования сигналов из того или иного ансамбля. В частотно-временной плоскости временная и частотная корреляционные функции образуют поверхность называемую функцией неопределенности, которая является мерой способности телекоммуникационной системы различать принимаемые сигналы по задержке и относительной радиальной скорости. Функция неопределенности, введенная Вудвордом и нашедшая широкое применение при анализе сигналов, по классификации преобразований времени соответствует параболическому типу. В работе показано, что в соответствии моделями аддитивных и мультипликативных преобразований способность разрешения по скорости определяется шириной полосы Меллина сигнала, изменение которой связано с введением задержки начала мультипликативного сигнала относительно начала его отсчета. Для выявления зависимости корреляционных свойств мультипликативного сигнала от сдвига относительно начала сигнала проведено численное моделирование в среде MathCad. Анализ полученных результатов показал увеличение помехоустойчивости системы связи за счет устранения потерь связанных с доплеровской дисперсией и уменьшение элемента разрешения позволяющего, в свою очередь, расширить объем ансамбля ортогональных сигналов и тем самым увеличить количество одновременно работающих линий связи. В результате численного моделирования получен максимальный контрастный отклик согласованного фильтра для относительной радиальной скорости 106 м/сек и аддитивной помехи в виде шума при отношении сигнал помеха на входе приемника в диапазоне 0,25-0,15.

Сведения об авторах:

¹к.т.н., профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и радиосвязи Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия, psn1953@mail.ru

²к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и радиосвязи Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия, uei@inbox.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: широкополосный сигнал; помехоустойчивость; дисперсия; корреляция; преобразование; обработка; скорость; радиальная функция; мультипликативная; неопределенности.

Для цитирования: Павликов С.Н., Убанкин Е.И. Исследование автокорреляционной функции нового класса широкополосных сигналов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 46-59. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10268



Введение

При выборе ортогональных функций в качестве математических моделей ортогональных сигналов и кодов при построении телекоммуникационных систем необходимо учитывать не только степень сложности их реализации, но и уровень влияния различных видов аддитивных и мультипликативных помех и преобразований сигналов в канале распространения [1]. Увеличение вероятностей ошибок при приеме (проигрыша в отношении сигнал помеха (ОСП)) связано не только с видом и уровнем помех, но и с выбором ансамбля сигналов.

Методика исследования

Автокорреляционные и взаимные корреляционные свойства сигналов, выражающие степень их зависимости при различных временных сдвигах, определяют условия и ограничения использования того или иного ансамбля сигналов.

Сигналы могут характеризоваться корреляционной функцией в частотной области (при заданном частотном сдвиге) [1–2].

В частотно-временной плоскости временная и частотная корреляционные функции образуют поверхность называемую функцией неопределенности (ФН) [2–3].

Благодаря существованию соотношения между частотно-временным представлением сигнала и ФН, последняя играет важную роль при исследовании сигналов [4].

Сигнал характеризуется рядом характеристик, таких как длительность, несущая частота, количество волн под огибающей, мощность, форма, вид ФН. Функция неопределенности характеризует степень разрешения принимаемых сигналов по задержке и доплеровскому параметру или по ускорению и задержке. Другими словами, ФН является мерой точности различения сигналов по дальности, радиальной скорости и производной радиальной скорости (ускорению) между объектами, а также надежности разрешения по указанным параметрам. Функция неопределенности, введенная Вудвордом [5] и нашедшая широкое применение при анализе сигналов, по классификации преобразований времени соответствует параболическому типу. При связи между подвижными объектами необходимо рассматривать группу линейных преобразований времени, учитывающих как задержку сигнала, так и его доплеровское искажение. В параболической же ФН данная группа G заменяется на двухпараметрическую группу H с законом композиции элементов, действующих по правилу:

$$g(\tau_1, \Omega_1) \cdot g(\tau_2, \Omega_2) = g(\tau_1 + \tau_2, \Omega_1 + \Omega_2), \quad (1)$$

а ее представление в пространстве спектров Фурье задается соотношением

$$T(g) \cdot \tilde{\varphi}(\omega) = e^{j\omega\tau} \cdot \tilde{\varphi}(\omega + \Omega). \quad (2)$$

Из (1) и (2) видно, что H является декартовым произведением двух коммутативных групп параболического типа, что и обосновывает определение ФН, построенной на этих группах, как параболической. Указанная замена справедлива при выполнении условия узкополосности сигналов, когда дисперсионное произведение много меньше единицы:

$$WT \cdot \frac{V}{C} \ll 1.$$

При гетеродинном представлении доплеровского эффекта, приведенных в уравнениях (1), (2), т. е. когда доплеровский эффект аппроксимируется сдвигом частот Фурье, в основу ФН положено обобщение корреляционной функции на случай двух трансляции — одной по времени, другой — по частоте (функция отклика) [4].

Так как в основу параболической функции неопределенности положено гетеродинное представление доплеровского эффекта, целесообразно рассматривать комплексную огибающую сигнала. Комплексная огибающая сигнала принятого от подвижного объекта с точностью до фазы $e^{-j\Omega t}$ имеет представление $\gamma(t - \tau) e^{j\Omega t}$. Спектр Фурье комплексной огибающей равен $\tilde{\gamma}(\omega + \Omega) \cdot e^{j\omega\tau}$, тогда отклик $\chi(t, \tau, \Omega)$, измеренный на выходе фильтра, согласованного с принимаемым сигналом, т. е. имеющего коэффициент передачи $\tilde{\gamma}^*(\omega)$, примет вид

$$\chi(t, \tau, \Omega) = F^{-1} \{ \tilde{\gamma}(\omega + \Omega) \cdot e^{j\omega\tau} \cdot \tilde{\gamma}^*(\omega) \} = \{ \gamma(t) \cdot e^{j\Omega t} * \gamma^*(-t) \} \cdot (t - \tau), \quad (3)$$

где $\gamma^*(t)$ — импульсная реакция,

* — знак оператора свертки Фурье.

Максимум отклика (3) достигается, если фильтр согласован с сигналом, т. е. при $\Omega = 0$, $t = \tau$, в этом случае:

$$|\chi(\tau, \tau, 0)| = \frac{1}{2\pi} \int |\tilde{\gamma}(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{2} \int |\tilde{\gamma}(t)|^2 dt = \frac{E}{2}, \quad (4)$$

где E — энергия сигнала.

Под ФН понимается модуль отклика (3) в плоскости частота — время, наблюдаемый на выходе согласованного фильтра.

В реальных устройствах для устранения неопределенности по доплеровскому параметру применяют набор фильтров, каждый из которых настроен на частоты $\Omega_n = n \cdot \Delta\Omega$, где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$; $\Delta\Omega$ — разумный частотный интервал, в пределах которого энергетические потери отклика малы. Неопределенность по задержке выбирается за счет инвариантности откликов относительно сдвига. В этом случае по максимуму отклика на выходе одного из фильтров можно судить о значении доплеровского сдвига, а по моменту появления максимального отклика — о задержке.

В силу инвариантности относительно сдвига модуля отклика фильтра в плоскости (t, Ω) , без потери общности (3) можно переписать:

$$|\chi(t, \Omega)| = \left| F^{-1} \{ \tilde{\gamma}(\omega + \Omega) \cdot \tilde{\gamma}^*(\omega) \} \right| = \left| \int \gamma(\tau + t) \cdot \gamma^*(\tau) \cdot e^{j\Omega\tau} d\tau \right|,$$

а используя замену переменной преобразовать в симметричный вид:

$$|\chi(t, \Omega)| = \frac{1}{2\pi} \left| \int \tilde{\gamma}(\omega + \frac{\Omega}{2}) \cdot \tilde{\gamma}^*(\omega - \frac{\Omega}{2}) \cdot e^{-j\omega t} d\omega \right| = \left| \int \gamma(\tau + \frac{t}{2}) \cdot \gamma^*(\tau - \frac{t}{2}) \cdot e^{j\Omega\tau} d\tau \right|. \quad (5)$$

Заметим, что функция отклика (4) может быть обобщена на случай, когда импульсная характеристика фильтра описывается функцией, отличной от передаваемого сигнала:

$$\chi_{\gamma_1, \gamma_2}(t, \Omega) \triangleq [\gamma_1(t) \cdot e^{j\Omega t} * \gamma_2^*(-t)] = F^{-1} \{ \tilde{\gamma}_1(\omega + \Omega) \cdot \tilde{\gamma}_2^*(\omega) \}. \quad (6)$$

Объем параболической ФН зависит только от энергии сигнала, его инвариантность при нормировке сигнала по энергии называется «принципом неопределенности».

В ряде работ описаны ФН, вид которых наиболее приспособлен к типу исследуемого сигнала. Так, например, в работе [6] рассмотрена обобщенная ФН сигнала с линейно частотной модуляцией (ЛЧМ), учитывающая рассогласование сигнала как по времени прихода и несущей частоте, так и по скорости качания частоты. Поведение ФН при больших произведениях длительности сигнала на полосу частот является частным случаем асимптотической аппроксимации интегралов вида

$$I = \int_{\alpha}^{\beta} g(x) \cdot \exp\{jv \cdot \Phi(x)\} dx,$$

где $g(x)$ и $\Phi(x)$ — действительные функции;

v — большой положительный параметр.

В работах [7–8] рассмотрен асимптотический метод вычисления ФН ЧМ-сигналов на основании принципа стационарной фазы. Метод стационарной фазы, основан на том, что при интегрировании вклады в величину интеграла быстроосциллирующей функции $\exp(jv\Phi(x))$ взаимокompенсируются, за исключением концевых или стационарных точек функции $\Phi(x)$. Стационарной точкой функции $\Phi(x)$ является точка, в которой $\Phi'(x) = 0$. Стационарной точкой экспоненциальной функции является точка пересечения $f-t$ линии опорного и принятого сигналов. Но использование этого метода связано с рядом

трудностей. Так функция $\exp(jv\Phi(x))$ всегда является быстроосциллирующей, а для сигналов с прямоугольной огибающей при значениях вблизи $\tau = \pm T$, а так же близких к началу координат, метод не дает точных результатов. Из анализа формулы (3) видно, что для широкополосных сигналов параболическое приближение становится некорректным даже при небольших относительных скоростях между объектами. Если ограничение на узкополосность не выполняется, то возникает необходимость модернизации узкополосной ФН Вудворда с учетом реальной модели эффекта Доплера. Этой проблеме посвящено множество работ, важно отметить, что в общем случае при параболическом подходе объем широкополосной ФН (ШФН) определяется выражением [9]:

$$V = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\chi(\alpha, \tau)|^2 d\alpha d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega \cdot \int_0^{\infty} \frac{|\bar{S}(\omega)|^2}{\omega} d\omega. \quad (7)$$

Следствием является то, что только для сигналов, удовлетворяющих условию интегрируемости относительно мер $d\omega$ и $d\omega/\omega$, объем тела неопределенности будет конечен, что значительно сужает класс анализируемых сигналов. Анализ объема ШФН показывает зависимость от формы сигнала. В работе [10] показано, что объема ШФН не существует, если спектр содержит нулевую частоту. Для согласования выражения (6) с традиционным представлением ФН используют ограничение области допустимых значений коэффициента сжатия, при условии, что он близок к единице, или используют узкополосное приближение [9].

Однако это не позволяет использовать ФН при анализе широкополосных сигналов. Новая функция неопределенности может быть построена в классе нестационарных процедур. В дальнейшем будем полагать, что задержка сигнала известна. Если же нет, то для устранения неопределенности по дальности применим набор нестационарных процедур, каждая из которых настроена на свою задержку $\tau_n = \Delta\tau \cdot n$, где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, $\Delta\tau$ — разумный временной интервал, в пределах которого энергетические потери отклика малы.

Изоморфизм между группой преобразований сдвига G и группой преобразований сжатия \bar{G} позволяет ввести узкополосность и для мультипликативных сигналов, условие узкополосности на гиперболическом базисе выглядит в виде:

$$\beta W_m T_m \ll 1,$$

где W_m — ширина меллиновского спектра сигнала;



$T_m = \ln(t_k/t_n)$ — длительность сигнала в мультипликативном масштабе;

T_n, t_k — время начала и конца мультипликативного сигнала;

β — параметр, учитывающий относительное радиальное ускорение абонента.

При этом группа преобразований сжатия \bar{G} заменяется на двухпараметрическую группу \bar{H} с законом композиции элементов, действующим по следующему правилу:

$$g(\alpha_1, \Omega_1) \cdot g(\alpha_2, \Omega_2) = g(\alpha_1 \cdot \alpha_2, \Omega_1 + \Omega_2)$$

а ее представление в пространстве спектров Меллина задается соотношением:

$$T(g) \cdot \tilde{\varphi}(\omega) = \exp(j\omega \ln \alpha) \cdot \tilde{\varphi}(\omega + \Omega).$$

Предположим, что сформирована мультипликативная (гиперболическая) комплексная огибающая сигнала принятого от подвижного объекта движущегося с ускорением, с точностью до фазы $e^{-j\Omega \ln \alpha}$:

$$\gamma_m(t) \rightarrow \gamma_m\left(\frac{1}{\alpha}t\right) \cdot \exp(j\Omega \ln t),$$

где α — доплеровский параметр;

$\Omega = \Omega_0 \frac{V^2}{CR(0)} \sqrt{t_n t_k}$ — сдвиг меллиновских частот обусловленных ускорением объекта;

Ω_0 — центральная меллиновская частота сигнала,

C — скорость распространения электромагнитных колебаний в среде,

$R(0)$ — начальное расстояние между объектами.

Спектр Меллина комплексной огибающей составляет

$$\tilde{\gamma}_m(\omega + \Omega) \cdot \exp(j\omega \ln \alpha).$$

Отклик, измеренный на выходе нестационарного фильтра, согласованного с переданным сигналом, т.е. имеющего коэффициент передачи $\tilde{\gamma}_m^*$, запишется:

$$\begin{aligned} \chi_m(t, \alpha, \Omega) &= M^{-1} \{ \tilde{\gamma}_m(\omega + \Omega) \cdot 5^{j\omega \ln \alpha} \cdot \tilde{\gamma}_m^*(\omega) \} = \\ &= [\gamma_m(t) \cdot e^{j\Omega \ln t} \otimes \gamma_m^*\left(\frac{1}{t}\right)]. \end{aligned} \quad (8)$$

где \otimes — знак оператора свертки Меллина.

Под мультипликативной (гиперболической) функцией неопределенности (МФН) понимается модуль отклика в плоскости частота-время, приведенный в формуле (8) и наблюдаемый на выходе мультипликативного согласованного фильтра. В силу инвариантности модуля отклика нестационарного фильтра в плоскости (t, Ω) относительно сжатия (расширения), имеем

$$\begin{aligned} |\chi_m(t, \Omega)| &= \left| M^{-1} \{ \tilde{\gamma}_m(\omega + \Omega) \cdot \tilde{\gamma}_m^*(\omega) \} \right| = \\ &= \left| \int_{\varepsilon}^{\infty} \gamma_m(\alpha t) \cdot \gamma_m^*\left(\frac{\alpha}{t}\right) \cdot e^{j\Omega \ln \alpha} \frac{d\alpha}{\alpha} \right|, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\varepsilon \rightarrow 0$ — бесконечно малая величина.

Несложной заменой переменных формулу (9) можно привести к симметричному виду

$$\begin{aligned} |\chi_m(t, \Omega)| &= \frac{1}{2\pi} \left| \int_{\varepsilon}^{\infty} \tilde{\gamma}_m\left(\omega + \frac{\Omega}{2}\right) \cdot \tilde{\gamma}_m^*\left(\omega - \frac{\Omega}{2}\right) \cdot e^{j\Omega \ln t} d\omega \right| = \\ &= \left| \int_{\varepsilon}^{\infty} \gamma_m(\alpha \sqrt{t}) \cdot \gamma_m^*\left(\frac{\alpha}{\sqrt{t}}\right) \cdot e^{j\Omega \ln \alpha} \frac{d\alpha}{\alpha} \right|, \end{aligned} \quad (10)$$

Выражение (10) может быть преобразовано к виду

$$\begin{aligned} |\chi_m(t, \Omega)| &= \\ \gamma_m\left(\exp\left(\ln \frac{t}{2} + \ln \alpha\right)\right) \cdot \gamma_m^*\left(\exp\left(\ln \alpha - \ln \frac{t}{2}\right)\right) \cdot \exp(j\Omega \ln \alpha) \frac{d\alpha}{\alpha} &= \\ = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \gamma_m\left(\exp\left(\alpha' + \frac{t'}{2}\right)\right) \cdot \gamma_m^*\left(\exp\left(\alpha' - \frac{t'}{2}\right)\right) \cdot \exp(j\Omega \alpha') d\alpha' \right|. \end{aligned} \quad (11)$$

Предположим, что комплексные огибающие $\gamma(t)$ и $\gamma_m(t)$ имеют соответствующие им тождественные спектральные функции Фурье и Меллина, т.е. $\tilde{\gamma}(\omega) \equiv \tilde{\gamma}_m(\omega)$. При этом условию сигналу $\gamma_m(t)$ будет соответствовать эквивалентный сигнал $\gamma(t) = \gamma_m(\exp t)$ и, наоборот, сигналу $\gamma(t)$ будет соответствовать эквивалентный сигнал $\gamma_m(t) = \gamma(\ln t)$.

При сравнении формул (5) и (11) видно, что для эквивалентных сигналов имеет место соответствие:

$$\begin{aligned} \chi_m(t, \Omega) &= \chi(\ln t, \Omega) \\ \chi_m(\exp t, \Omega) &= \chi(t, \Omega). \end{aligned} \quad (12)$$

Природа полученного соответствия обусловлена наличием отображенных изоморфизмов между группой сдвига G и группой сжатия \bar{G} :

$$\begin{aligned} G &\xrightarrow{\exp} \bar{G} \\ \bar{G} &\xrightarrow{\ln} G. \end{aligned} \quad (13)$$

При этом указанные отображения сохраняют групповые операции. На основании полученных соответствий в формулах (12) и (13) можно построить простой алгоритм вычисления МФН, который представлен ниже.

I. Преобразование сигнала: $\gamma(t) \rightarrow \gamma(\exp t)$

II. Вычисление параболической (аддитивной) функции неопределенности для преобразованного сигнала известными способами либо используя существующие таблицы [11–12].

III. В полученной ФН осуществить преобразование аргумента: $t \rightarrow \ln t$.

Для примера вычислим МФН сигнала с гиперболической ЧМ вида:

$$S_m(t) = \text{rect}(\ln t / T_m) \cdot \cos(\Omega \cdot \ln t).$$

I. $S(\exp t) = \text{rect}(t / T_m) \cdot \cos(\Omega t)$.

II. Для полученного сигнала, представляющего не что иное, как отрезок гармоника, параболическая ФН известна и имеет вид:

$$|\chi(\exp t, \Omega)| = \frac{(1 - \frac{|t|}{T_m}) \sin(\frac{\Omega}{2} T_m (1 - \frac{|t|}{T_m}))}{\frac{\Omega}{2} T_m (1 - \frac{|t|}{T_m})}$$

$$\text{III. } |\chi_m(t, \Omega)| = \frac{(1 - \frac{|\ln t|}{T_m}) \sin(\frac{\Omega}{2} T_m (1 - \frac{|\ln t|}{T_m}))}{\frac{\Omega}{2} T_m (1 - \frac{|\ln t|}{T_m})} \quad (14)$$

Таким образом, мультипликативная функция неопределенности для сложного широкополосного сигнала с ГЧМ описывается выражением (14). МФН служит для анализа и синтеза сигналов, оптимально разрешающих объекты по скорости и ускорению, а так же для оценки точности измерения данных параметров.

Правила (12) и (13) позволяют перенести свойства естественной функции неопределенности на мультипликативный случай. Рассмотрим основные свойства МФН.

1. Симметрия относительно начала координат

$$\chi_m(t, \Omega) = \chi_m(\frac{1}{t}, -\Omega).$$

2. Наибольшее значение МФН принимает в начале координат

$$|\chi_m(t, \Omega)| \leq |\chi_m(0, 0)| = \frac{E}{2}.$$

3. Свойства масштаба:

если $\chi_m(t, \Omega)$ соответствует $\gamma_m(\alpha)$, то $\frac{1}{|k|} \chi_m(t^k, \frac{\Omega}{k})$ соответствует $\gamma_m(\alpha^k)$.

4. Гиперболическая фаза (время):

если МФН $\chi_m(t, \Omega)$ соответствует сигналу $\gamma_m(\alpha)$, то МФН $\chi_m(t, \Omega + 2k \ln t)$ соответствует сигналу $\gamma_m(\alpha) \cdot \exp(-jk \ln^2 \alpha)$.

5. Гиперболическая фаза (частота):

если $\chi_m(t, \Omega)$ соответствует $\tilde{\gamma}_m(\omega)$, то $\chi_m(t \cdot e^{k\Omega}, \Omega)$ соответствует $\tilde{\gamma}(\omega) \cdot e^{jk\omega^2}$.

6. Инвариантность объема: если $\chi_m(t, \Omega)$ — МФН, то

$$V_{\text{МФН}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\varepsilon}^{\infty} |\chi_m(t, \Omega)|^2 d\Omega \frac{d\alpha}{\alpha} = |\chi_m(0, 0)|^2 = \frac{E^2}{4}.$$

Следовательно, общая потенциальная гиперболическая неопределенность одинакова для класса сигналов с одинаковой энергией.

7. Свойство самотрансформации:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\varepsilon}^{\infty} |\chi_m(\alpha, \Omega)|^2 e^{-j\Omega \ln t} e^{j\omega \ln \alpha} d\Omega \frac{d\alpha}{\alpha} = |\chi_m(t, \omega)|^2,$$

т.е. квадрат модуля МФН является инвариантом к преобразованию Фурье-Меллина

$$|\chi_m(\alpha, \Omega)|^2 \xrightarrow[\Omega, \omega]{\alpha, t} |\chi_m(t, \omega)|^2$$

8. Правило умножения:

Если сигналу $\gamma_{m1}(t)$ соответствует МФН $\chi_{m1}(t, \Omega)$, а $\chi_{m2}(t, \Omega)$ соответствует сигналу $\gamma_{m2}(t)$, то произведению сигналов $\gamma_m(t) = \gamma_{m1}(t) \cdot \gamma_{m2}(t)$ соответствует МФН которая задается сверткой

$$\chi_m(t, \Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi_{m1}(t, \Omega_1) \cdot \chi_{m2}(t, \Omega - \Omega_1) d\Omega_1,$$

аналогично если $\tilde{\gamma}_m(\Omega) = \tilde{\gamma}_{m1}(\Omega) \cdot \tilde{\gamma}_{m2}(\Omega)$, то соответствующая МФН определяется сверткой

$$\chi_m(t, \Omega) = \int_{\varepsilon}^{\infty} \chi_{m1}(\tau, \Omega) \cdot \chi_{m2}(\frac{t}{\tau}, \Omega) \frac{d\tau}{\tau}.$$

9. МФН обладает свойством оставаться инвариантной к следующему преобразованию

$$\left\langle \begin{array}{l} t_1 = t^{k_{11}} e^{k_{12}\Omega} \\ \Omega_1 = k_{21} \ln t + k_{22}\Omega \end{array} \right\rangle$$

$$\det \begin{vmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{vmatrix} = 1.$$

Таким образом, если $\chi_m(t, \Omega)$ есть МФН соответствующая сигналу $\gamma_m(\alpha)$, то $\chi_m(t_1, \Omega_1)$ — так же МФН, но соответствующая сигналу



$$\gamma_{m1}(\alpha) = |k_{11}|^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} d\Omega \exp(jk_{11}\Omega(\ln \alpha - \frac{k_{12}}{2}\Omega)) \times \\ \times \int_{\varepsilon}^{\infty} \gamma_m(x) \exp(-j \ln x(\Omega - \frac{k_{21}}{2k_{11}} \ln x)) \frac{dx}{x}$$

Сама МФН $\chi_m(t_1, \Omega_1)$ может быть получена последовательным использованием свойств 3, 4, 5. Следовательно, если $\gamma_m(\alpha)$ соответствует $\chi_m(t, \Omega)$, то $z_m(\alpha) = \gamma_m(\alpha) \exp(jq(\ln \alpha)^2)$ соответствует

$$\frac{1}{|k|} \chi_m \{t^k, \frac{1}{k}(\Omega + 2q \ln \alpha)\}.$$

Если же $\tilde{Z}(\omega) = M\{Z_m(\alpha)\}$, то МФН, которая соответствует сигналу со спектром Меллина $\tilde{V}(\omega) = \tilde{Z}(\omega) e^{jb\omega^2}$, есть

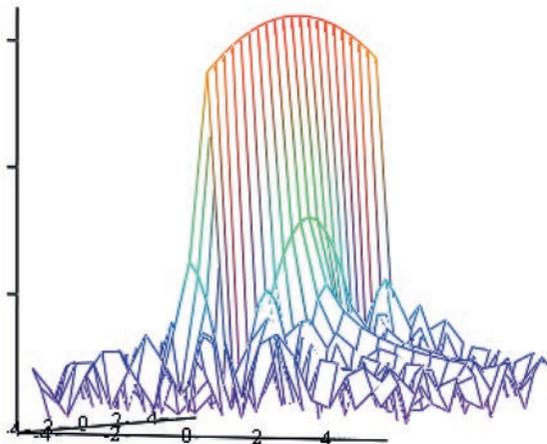
$$\frac{1}{|k|} \chi_m \{t^k e^{kb\Omega}, \frac{q \ln t}{\alpha} + \frac{\Omega}{\alpha}(1 + qb)\}.$$

Рассмотрим пример мультипликативной функции неопределенности сигнала в виде отрезка гиперболической гармоники

$$S_m(t) = 1_+(t) \cdot \text{rect}(\ln t/T_m) \cos(\Omega \ln t).$$

МФН в плоскости $(\ln \alpha, \Omega)$ запишется:

$$|\chi_m(\alpha, \Omega)| = \frac{1}{2} \left| \frac{\sin(\frac{\Omega}{2} T_m \Lambda(\frac{\ln \alpha}{T_m}))}{\Omega} \right|,$$



М

Рис. 1. Общая структура неопределенности для сигнала, представляющего отрезок гиперболической гармоники в плоскости $(\ln \alpha, \Omega)$

$$\text{где } (t) = \begin{cases} 1 - |t|, & |t| \leq 1, \\ 0 & |t| > 1. \end{cases}$$

Вид МФН приведен на рис. 1.

Нормированные сечения запишутся:

$$\frac{|\chi_m(a, 0)|}{|\chi_m(0, 0)|} = \Lambda\left(\frac{\ln \alpha}{T_m}\right); \quad \frac{|\chi_m(0, \Omega)|}{|\chi_m(0, 0)|} = \left| \frac{2 \sin(\frac{\Omega}{2} T_m)}{\Omega T_m} \right|$$

Постоянные разрешения по доплеровскому параметру и по частоте Меллина соответственно составляют:

$$\Delta(\ln \alpha) = \frac{\int_{\varepsilon}^{\infty} |\chi_m(\alpha, 0)|^2 \frac{d\alpha}{\alpha}}{|\chi_m(0, 0)|^2} = \frac{2T_m}{3};$$

$$\Delta(\Omega) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |\chi_m(0, \Omega)|^2 d\Omega}{|\chi_m(0, 0)|^2} = \frac{2\pi}{3}.$$

При отсутствии априорных данных распределения параметров сигнала и помехи в частотно-временной плоскости желательную ФН можно представить в виде функции, приближающейся к $\delta(t, \Omega)$ — функции. Сравнительный анализ позволяет понять процедуру выбора передаваемого сигнала.

С физической точки зрения, необходимо подчеркнуть, что при построении МФН доплеровский эффект описывается точно, т.е. МФН применима для анализа широкополосных сигналов. Кроме того, в МФН учитывается дополнительный параметр, обусловленный ускорением носителя сигнала.

Частотные корреляционные функции особо актуальны при информационном обмене между абонентами, движущимися с большими скоростями, например, в системах спутниковой радиосвязи, а выигрыш в качестве определяется числом символов последовательности и их взаимокорреляционными свойствами.

Оптимальной формой корреляционной функции сигнала для систем связи с РКФ является δ -импульс. Который имеет узкий центральный пик и малые боковые лепестки, распределенные равномерно во времени.

Разрешающая способность сигналов в частотно-временной плоскости определяется областью их высокой корреляции по этим параметрам [11].

Аналогичную оценку можно выполнить в спектральной области сравнивая энергетический спектр исследуемого сигнала со спектром δ -импульса:

$$F\{\delta(\tau)\} = 1.$$

Исследуем энергетический спектр мультипликативного сигнала на предмет близости к единице [13]

$$S_m(t) = e^{j\Omega \ln(t-\tau)} \cdot (t-\tau)^{-\gamma} = (t-\tau)^{j\Omega-\gamma},$$

где Ω — начальная частота ($\omega(t) = \Omega/(t-\tau)$); $\tau = \text{const}$; $\gamma = \text{const}$; $0 \leq \gamma \leq 1$.

Преобразование Фурье сигнала $S_m(t)$ определим используя табличное значение [14]:

$$\tilde{S}_m(\omega) = j\Gamma(j\Omega - \gamma + 1) \times \left[e^{\frac{(-\Omega - j\gamma)\pi}{2}} \cdot \omega_+^{-j\Omega + \gamma - 1} - e^{\frac{(\Omega + j\gamma)\pi}{2}} \cdot \omega_-^{-j\Omega + \gamma - 1} \right] \cdot e^{-\omega\tau},$$

$$\tilde{S}_m(\omega) = 0, \quad \begin{matrix} t > \tau; \\ 0 < t < \tau. \end{matrix}$$

Комплексно-сопряженный спектр примет вид:

$$\bar{\tilde{S}}_m(\omega) = -j\Gamma(j\Omega - \gamma + 1) \times \left[\ell^{\frac{(\Omega + j\gamma)\pi}{2}} \cdot \omega_+^{j\Omega + \gamma - 1} - \ell^{\frac{(-\Omega - j\gamma)\pi}{2}} \cdot \omega_-^{j\Omega + \gamma - 1} \right] \cdot e^{\omega\tau},$$

$$\bar{\tilde{S}}_m(\omega) = 0, \quad \begin{matrix} t > \tau; \\ 0 < t < \tau. \end{matrix}$$

Энергетический спектр сигнала определяется по форме

$$R(\omega) = \tilde{S}_m(\omega) \cdot \bar{\tilde{S}}_m(\omega) = |\Gamma(j\Omega - \gamma + 1)|^2 \cdot |\omega|^{-2(1-\gamma)} \quad (15)$$

Исследуем выражение (15) при различных $\gamma = 0$; $\gamma = 1/2$; $\gamma = 1$.

1. При $\gamma = 0$ выражение (10) примет виду:

$$R(\omega) = \tilde{S}_m(\omega) \cdot \bar{\tilde{S}}_m(\omega) = |\Gamma(j\Omega + 1)|^2 \cdot |\omega|^{-2}.$$

Используя выражение $\Gamma(x+1) = x\Gamma(x)$, получим:

$$R(\omega) = [(j\Omega)(-j\Omega)] \cdot |\Gamma(j\Omega)|^2 \cdot \frac{1}{\omega^2} = \frac{\pi}{sh(\pi\Omega)} \cdot \frac{1}{\omega^2} \quad (16)$$

2. При $\gamma = 1/2$, выражение (15) имеет вид:

$$R(\omega) = \left| \Gamma\left(j\Omega + \frac{1}{2}\right) \right|^2 \cdot |\omega|^{-1} = \frac{\pi}{ch(\pi\Omega)} \cdot \frac{1}{|\omega|} \quad (17)$$

3. При $\gamma = 1$, выражение (15) принимает виду:

$$R(\omega) = |\Gamma(j\Omega)|^2 = \frac{\pi}{\Omega \cdot sh(\pi\Omega)} \quad (18)$$

Известно, что

$$sh(\pi\Omega) = \frac{e^{\pi\Omega} - e^{-\pi\Omega}}{2}, \quad ch(\pi\Omega) = \frac{e^{\pi\Omega} + e^{-\pi\Omega}}{2}.$$

В условиях больших значениях Ω для гиперболических функций, выражения (16)-(18) примут вид:

$$1. \gamma = 0; R(\omega) = \frac{2\pi}{e^{\pi\Omega}} \cdot \frac{1}{\omega^2}; \quad (19)$$

$$2. \gamma = \frac{1}{2}; R(\omega) = \frac{2\pi}{e^{\pi\Omega}} \cdot \frac{1}{|\omega|}; \quad (20)$$

$$3. \gamma = 1; R(\omega) = \frac{2\pi}{\Omega e^{\pi\Omega}}. \quad (21)$$

Из анализа которых видно, что при $\gamma = 1$ энергетический спектр исследуемого сигнала соответствует спектру δ -функции и оптимальной моделью канального сигнала является мультипликативный сигнал вида:

$$S(t) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \frac{\sin(\Omega \ln(t-\tau))}{(t-\tau)}, \quad (22)$$

Энергетический спектр реальных сигналов (конечной длительности) ограничен полосой $\Delta\omega$. Спектры узкополосных ЧМ сигналов могут приближенно считаться ограниченными пределами изменения мгновенной частоты, но с ростом ширины полосы спектра ошибка становится произвольно малой величиной.

При $\gamma = 1$ для сигнала конечной длительности выражение (16) приобретает вид:

$$R(\omega) = \text{rect}\left(\frac{\omega - \omega_0}{2 \cdot \Delta\omega}\right) \cdot \frac{2\pi}{\Omega \cdot e^{\pi\Omega}}. \quad (23)$$



Автокорреляционная функция (АКФ) выражения (23) принимает вид:

$$R(\tau) = F^{-1}\{R(\omega)\} = \frac{2 \sin(\Delta\omega\tau)}{\Omega \cdot e^{\pi\Omega \cdot \tau}} \cdot e^{j\omega_0\tau}.$$

При этом модуль АКФ определяется выражением (24)

$$|R(\tau)| = \frac{2 \sin(\Delta\omega \cdot \tau)}{\Omega \cdot e^{\pi\Omega \cdot \tau}}. \quad (24)$$

Из анализа выражения (24) следует, что основная часть отклика ограничена точками $\Delta\omega \cdot t = \pm\pi$, а элемент разрешения по времени равен:

$$\Delta(t) = \frac{2\pi}{\Delta\omega},$$

и определяется полосой Фурье сигнала.

Для случаев когда $\gamma = 0$ и $\gamma = 1/2$ видно, что временное разрешение уменьшается. Амплитуда огибающей спектров спадает по закону, соответственно, $1/\omega^2$ и $1/|\omega|$. Огибающие (19) и (20) можно с достаточной степенью достоверности аппроксимировать функцией:

$$\text{rect}\left(\frac{\omega - \omega_0}{2\Delta\omega'}\right) \cdot \frac{2\pi}{e^{\pi\Omega}}, \quad (25)$$

где $\Delta\omega'$ выбирается с условием равенства площадей под функциями (25) и ограниченными в полосе $\Delta\omega$ функциями (19) и (20). При $\Delta\omega' < \Delta\omega$, $\Delta'(t) > \Delta(t)$, т.е. разрешающая способность уменьшается. Таким образом, наилучшее разрешение по оси времени соответствует сигналу при $\gamma = 1$, приведенному в выражении (22).

Разрешающая способность мультипликативных сигналов по дальности обратно пропорциональна полосе Фурье $\Delta(t) = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$, а разрешающая способность по скорости обратно пропорциональна полосой Меллина сигнала $\Delta\Omega$:

$$\Delta(\ln \alpha) = \frac{2\pi}{\Delta\Omega}.$$

В силу неинвариантности спектра Меллина сигнала относительно преобразований сдвига, ширина спектра Меллина изменяется с появлением задержки начала сигнала относительно начала его отсчета. Для определения этой зависимости оценим ширину спектра Меллина сигнала длительностью T с прямоугольной огибающей. Так как несущая частота не несет информации о форме спектра, сигнал определяется выражением:

$$S(t) = \text{rect}\left(\frac{t - \frac{T}{2} - \tau}{T}\right). \quad (26)$$

В предположении, что начало отсчета сигнала зафиксировано, а параметр сдвига начала сигнала относительно начала его отсчета τ изменяется, преобразование Меллина сигнала (26) запишется:

$$M\{S(t)\} = \int_0^\infty \text{rect}\left(\frac{t - \frac{T}{2} - \tau}{T}\right) \times e^{j\Omega \ln t} d \ln t = \int_\tau^{T+\tau} e^{j\Omega \ln t} \frac{dt}{t}.$$

Произведем замену переменных $\ln t = z$, тогда:

$$M\{S(t - \tau)\} = \int_\tau^{T+\tau} e^{j\Omega z} dz = \frac{1}{j\Omega} [e^{j\Omega \ln(T+\tau)} - e^{j\Omega \ln \tau}].$$

Определим энергетический спектр Меллина:

$$|M\{S(t - \tau)\}|^2 = \frac{2}{\Omega^2} \left[1 - \left[\cos\left(\Omega \ln\left(\frac{T+\tau}{\tau}\right)\right) \right] \right] = \frac{4}{\Omega^2} \sin\left(\frac{\Omega}{2} \ln\left(\frac{T+\tau}{\tau}\right)\right).$$

С учетом, того, что основная часть энергетического спектра заключена в интервале $\left(\frac{\Omega}{2} \ln\left(\frac{T+\tau}{\tau}\right)\right) = \pm\pi$, полоса Меллина равна:

$$\Delta\Omega = \frac{4\pi}{\ln\left(\frac{T+\tau}{\tau}\right)}, \quad (27)$$

а элемент разрешения по доплеровскому параметру составит:

$$\Delta(\ln \alpha) = \frac{2\pi}{\Delta\Omega} = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{T+\tau}{\tau}\right). \quad (28)$$

Анализ выражений (27) и (28) позволяют объяснить связь инвариантных свойств мультипликативных сигналов со сдвигом их начала относительно начала отсчета

и оценить инвариантные свойства мультипликативных сигналов в зависимости от выбираемых параметров.

Изоморфизм аддитивных и мультипликативных преобразований позволяют воспользоваться аддитивными методами оценки помехоустойчивости для мультипликативных правил обработки.

Известно, что ОСП на выходе и входе идеального коррелятора (согласованного фильтра) прямо пропорционально корню квадратному базы сигнала (произведение полосы Фурье сигнала W на его аддитивную длительность T) [15]:

$$\frac{U_c}{U_n}(\text{out}) = \frac{U_c}{U_n}(\text{in}) \cdot \sqrt{WT}.$$

Выражение для максимум огибающей отклика коррелятора имеет вид:

$$\frac{\langle G_{m\psi} \rangle_{\max}}{2E} = \left[\frac{Si \frac{\pi W_m T_m \beta}{2}}{\frac{\pi W_m T_m \beta}{2}} \right], \quad (29)$$

где W_m — ширина полосы спектра Меллина сигнала;

$T_m = \ln \frac{t_k}{t_n}$ — мультипликативная длительность сигнала,

t_k, t_n — время конца и начала сигнала соответственно;

β — параметр, характеризующий радиальное ускорение объекта

Анализ выражения (29) показывает, что если значение $W_m \cdot T_m \cdot \beta$ меньше единицы, то ослабление выходного сигнала не превышает 2 дБ.

В случае $W_m \cdot T_m \cdot \beta \gg 1$ максимальный выходной сигнал пропорционален $(W_m \cdot T_m \cdot \beta)^{-1}$:

$$\frac{\langle G_{m\psi} \rangle_{\max}}{2E} \sim \frac{1}{W_m T_m \beta}.$$

При условии, что помеха на входе представляет собой белый шум в мультипликативном масштабе аргумента с идеальным прямоугольным спектром шириной W_m и центральной мультипликативной частотой Ω_0 , максимума ОСП на выходе коррелятора запишется:

$$\begin{aligned} \theta_{m \text{ out max}} &= \frac{\langle G_{m\psi} \rangle_{\max}^2}{N_m} = \\ &= W_m T_m \left[\frac{Si \frac{\pi W_m T_m \beta}{2}}{\frac{\pi W_m T_m \beta}{2}} \right]^2 \theta_{in}, \end{aligned}$$

где N_m — спектральная плотность мультипликативной помехи на входе;

σ_{mc}^2 — дисперсия мультипликативного сигнала на входе;

σ_{mp}^2 — дисперсия мультипликативной помехи на входе;

$$\theta_{m \text{ in}} = \frac{\sigma_{mc}^2}{\sigma_{mp}^2} \text{ — ОСП на входе по мощности.}$$

При изменении параметра β , можно получить оценки значений на выходе коррелятора. На рис. 2 приведены графики зависимости выигрыша в помехоустойчивости мультипликативного согласованного фильтра

$$\frac{\theta_{m \text{ out}}}{\theta_{m \text{ in}}} = W_m T_m \left[\frac{Si \frac{\pi W_m T_m \beta}{2}}{\frac{\pi W_m T_m \beta}{2}} \right]^2$$

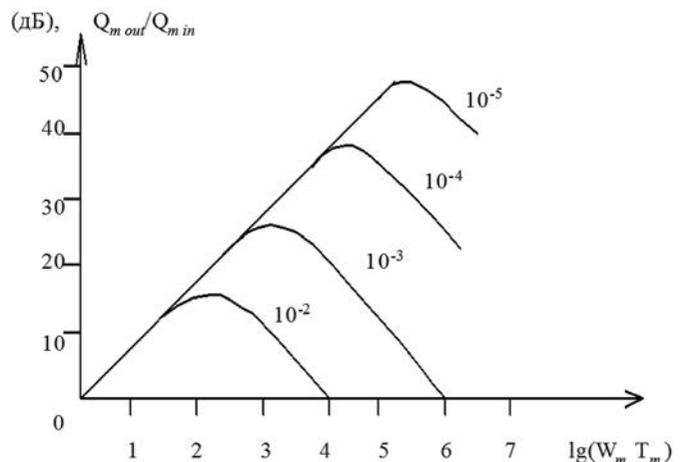


Рис. 2. Выигрыш на выходе мультипликативного согласованного фильтра при наличии доплеровской дисперсии



от величины $W_m T_m$ при различных значениях β . Когда $\beta = 0$ (отсутствует ускорение) выигрыш является линейной функцией произведения мультипликативной длительности на ширину полосы спектра Меллина W_m .

Приведенный математический аппарат позволяет определить параметры мультипликативного сигнала, при которых эффектом ускорения относительного перемещения абонентов можно пренебречь. Для сигнала с гиперболической частотной модуляцией мера разрешения по частоте равна:

$$\Omega_{\mu} = \Omega \frac{V^2 t_0}{C \cdot R(0)},$$

где $t_0 = \sqrt{t_n t_k}$ — среднегеометрическое время сигнала;

V — относительная скорость радиального перемещения абонентов;

$R(0)$ — расстояние между абонентами в начальный момент времени;

C — скорость распространения электромагнитных колебаний.

Элемент разрешения по частоте равен $2\pi/T_m$, тогда область параметров сигнала, при которых эффект ускорения можно не учитывать, задается неравенством:

$$\frac{\Omega T_m}{2\pi} \cdot \frac{V^2 t_0}{C \cdot R(0)} < 1,$$

С учетом того, что полоса отрезка гиперболической гармоники определяется как

$$\Delta\omega = \omega_v - \omega_n = \frac{\Omega \Delta t}{t_0^2} = \frac{\Omega \Delta t}{t_n t_k} = \frac{\omega_0 \Delta t}{t_0},$$

где $\omega_0 = \sqrt{\omega_n \omega_v}$ — среднегеометрическая частота сигнала, ω_n, ω_k — начальная и конечная граница частотного носителя сигнала, условие примет вид:

$$n_m \frac{V^2}{C \cdot R(0)} \cdot \frac{\omega_0 \Delta t}{\Delta\omega} < 1, \quad (30)$$

где $n_m = \frac{\Omega T_m}{2\pi}$ — число гиперболических периодов.

Если отрезок тона можно представить как короткий гиперболический сигнал, то соотношение неопределенности для тонально-импульсного сигнала (30) при $\Delta t \Delta\omega = 3\pi$, запишется в виде неравенства:

$$\frac{n_m V^2}{C \cdot R(0)} \cdot \frac{n_+ \Delta t}{3\pi} < 1,$$

а для отрезка тона $n_m = n_+, n_+ = \frac{\omega_0 \Delta t}{2\pi}$ получим

$$\frac{2}{3} \cdot \frac{n_+^2 V^2}{C \cdot R(0)} \Delta t = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{n_+^3 V^2}{C \cdot R(0)} \cdot \frac{1}{\omega_0} < 1. \quad (31)$$

Если условие (31) нарушается, требуется выполнять расфилтровку сигнала по меллиновской частоте аналогично тому, как это делается при обнаружении сигнала с неизвестным доплеровским параметром в аддитивном случае.

Для оценки эффективности применения сигнала (22) проведено численное моделирование в среде MathCad, результаты моделирования представлены на рисунках.

Временная диаграмма передаваемого f_1 сигнала (22) представлена на рис. 3–6, где $|c_j|$ — его амплитудный и ϕ_j — фазовый спектры.

Численный эксперимент показал, что автокорреляционная функция сигнала с параметрами

$$N = 2^{10}; \omega = 900 \cdot 10^6; \Omega = 10^3;$$

имеет игольчатую форму (рис. 3), а элемент разрешения по τ порядка $\sim 10^{-5}$ (рис. 4).

Результат квадратурной корреляционной обработки R принимаемого f_i сигнала, представляющего сумму сигнала f_1 подвергнутого доплеровской дисперсии и аддитивного шума при различных значениях относительной радиальной скорости и отношений сигнал/шум на входе приемника, представлен на рис. 5–6, где $|c_j|$ — амплитудный и ϕ_j — фазовый спектры.

На рис. 5 представлены результаты численного моделирования для доплеровской дисперсии при относительной радиальной скорости между передатчиком и приёмником $V = 10^6$ м/сек и аддитивной помехи в виде шума, при отношении сигнала к шуму на входе приемника ОСШ = 0,25.

На рис. 6 представлены результаты численного моделирования для доплеровской дисперсией при относительной радиальной скорости между передатчиком и приёмником $V = 10^6$ м/сек и аддитивной помехи в виде шума, при ОСШ = 0,15.

Заключение

Таким образом, исследования корреляционных функций сигналов сформированных по закону $s(\ln(t-\tau)) \cdot (t-\tau)^{-1}$, где $\tau = \text{const}$, параметр, определяющий объем ансамбля ортогональных сигналов, показали повышение помехоустойчивости системы связи за счет устранения потерь связанных с доплеровской дисперсией и увеличение количества одновременно работающих линий связи за счет малого значения элемента разрешения.

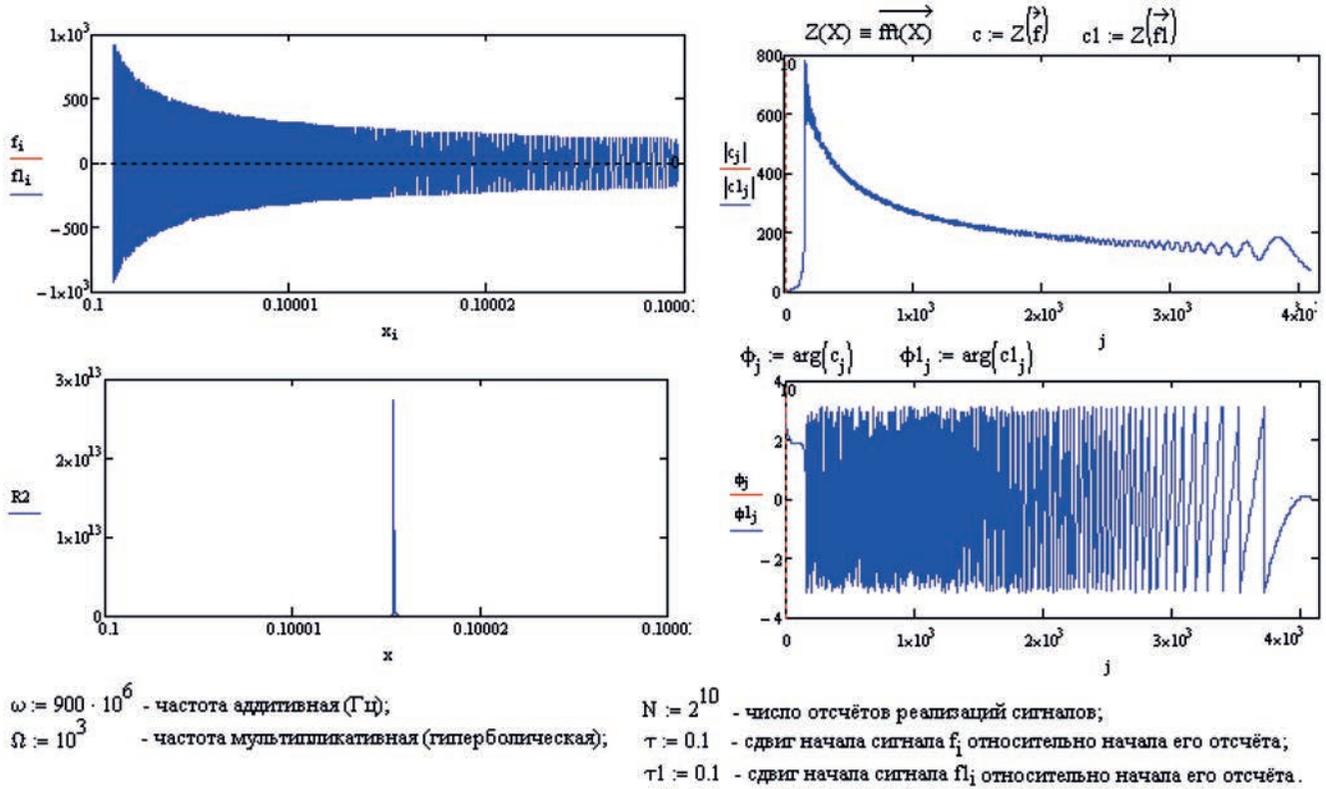


Рис. 3. Автокорреляционная функция мультипликативного сигнала ($f_i = f1_j$)

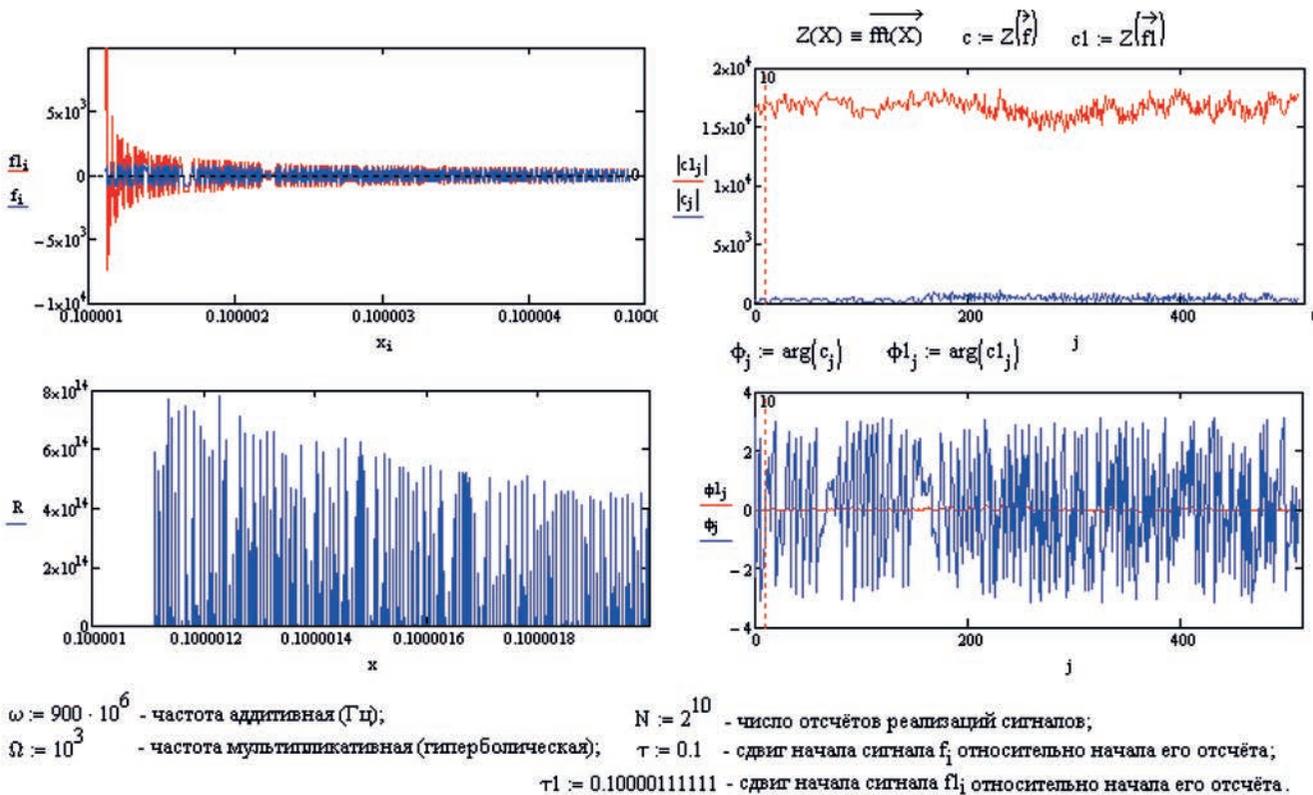


Рис. 4. Функция взаимной корреляции мультипликативных сигналов f_i и $f1_j$, при $\tau \neq \tau_1$, без помех (за пределом разрешения)

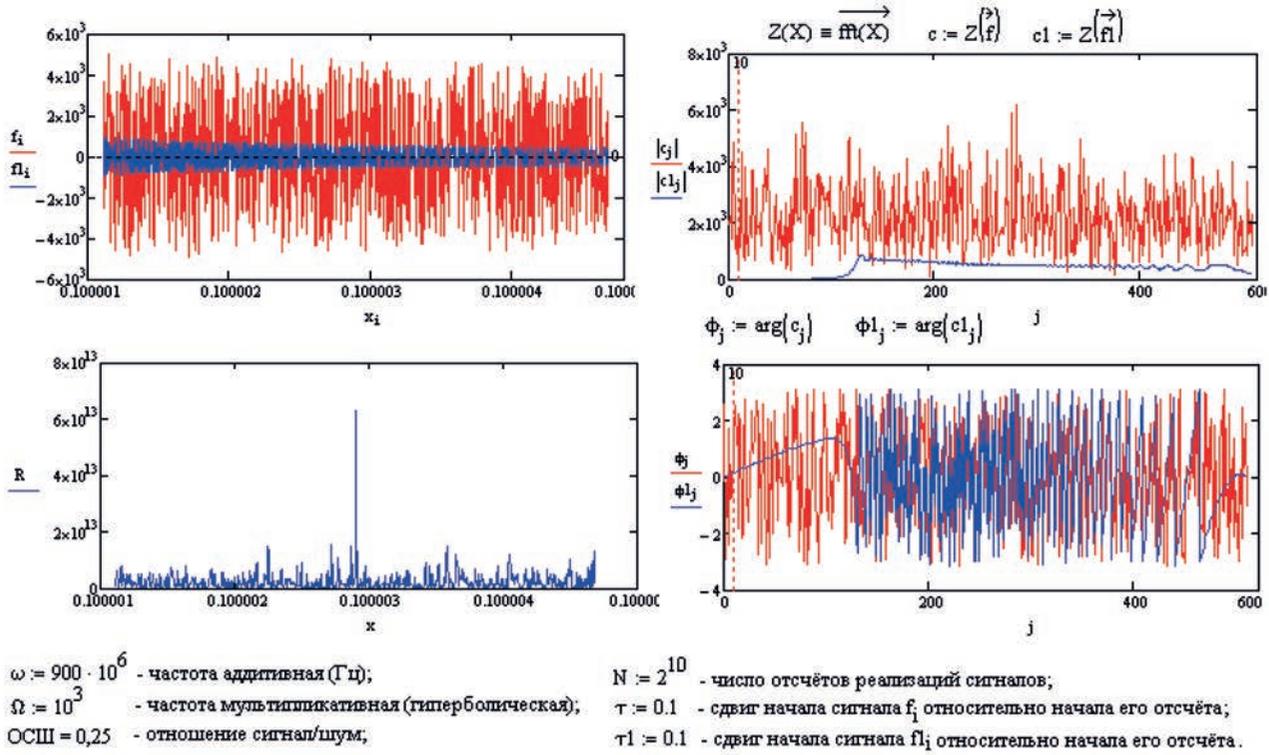


Рис. 5. Результат квадратурной корреляционной обработки принимаемого сигнала f_i при ОСШ = 0,25 и $V = 10^6$ м/сек

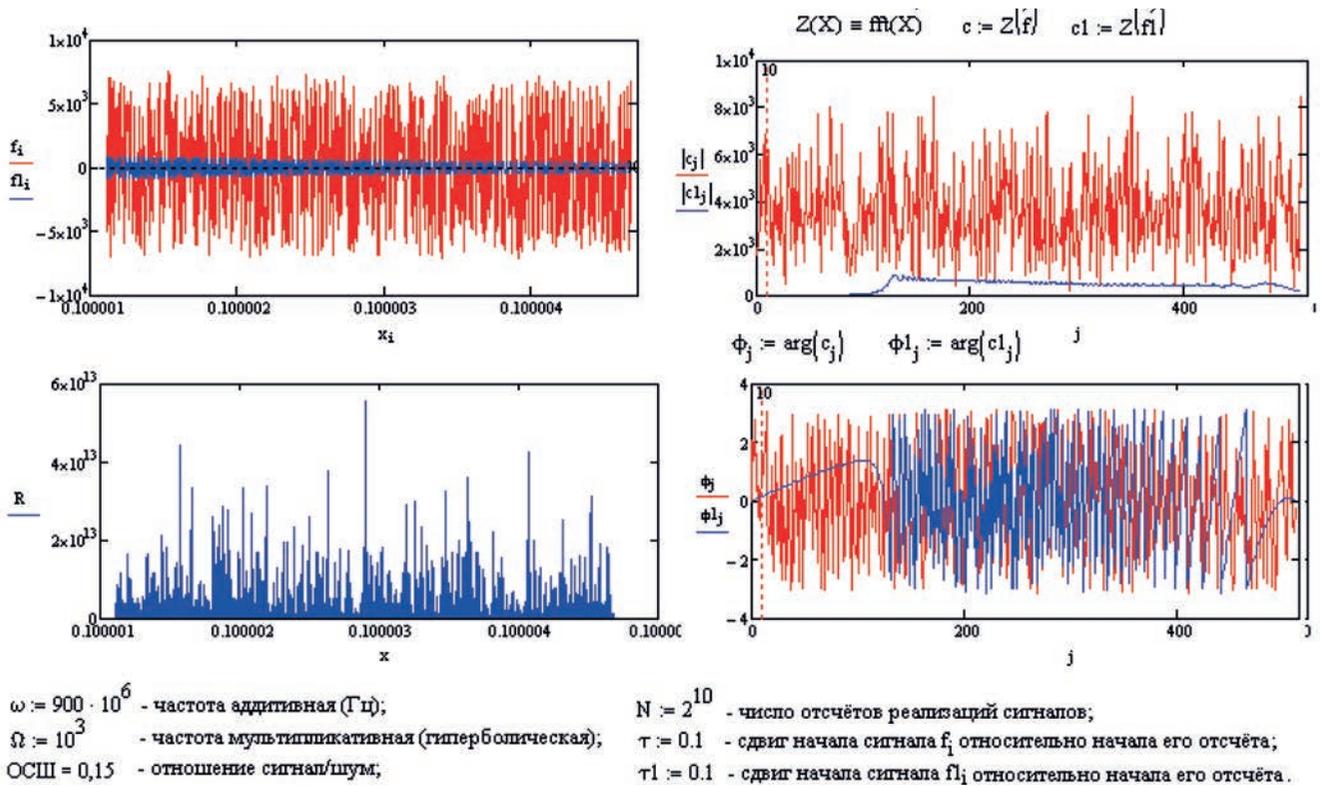


Рис. 6. Результат квадратурной корреляционной обработки принимаемого сигнала f_i при ОСШ = 0,15 и $V = 106$ м/сек

Литература

1. *Варакин Л.Е.* Теория систем сигналов. М.: Советское радио, 1970. 376 с.
2. *Тузов Г.И.* Статистическая теория приема сложных сигналов. М.: Советское радио, 1977. 400 с.
3. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / Под ред В.Б. Пестрякова. М.: Советское радио, 1973. 424 с.
4. *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: пер. с англ. Москва: Мир, 1983. Т. 1. 312 с.
5. *Woodward P.M.* Probability and Information Theory, with Applications to Radar. McGraw-Hill, New York; Pergamon Press, London, 1953. 128 p.
6. *Белов С.П., Рачинский С.А., Белов А.С., Белов Ан.С., Ефимов Н.О.* О влиянии доплеровского сдвига частоты на помехоустойчивость спутниковых телекоммуникационных систем со сложными сигналами // Научные ведомости БелГУ. Серия: Экономика. Информатика. 2017. № 9 (258). Вып. 42. С. 179–186.
7. *Харис Б.Д., Крамер А.С.* Асимптотический метод вычисления функции неопределённости ЧМ сигналов высокочувствительных корреляционных гидролокаторах // ТИИЭР. 1968. Т. 56. № 12. С. 59–68.
8. *Либенсон Е.Б.* Об оценке функции неопределённости широкополосных ЧМ сигналов. // Труды V всеобщей школы-семинара по статистической гидроакустике (СГ-5). Новосибирск, 1974. 377 с.
9. *Келли У., Вишнер Р.* Теория согласованной фильтрации целей движущихся ускоренно с высокими скоростями // Зарубежная радиоэлектроника. 1965. № 10. С. 38.
10. *Бовбель Е.И., Гилевский С.В., Юровский А.А.* Некоторые свойства широкополосной функции неопределённости для детерминированных и стохастических сигналов // Зарубежная радиоэлектроника. 1977. № 6. С. 33–55.
11. *Кук Ч., Бернфельд М.* Радиолокационные сигналы: пер с англ. Москва: Советское радио, 1971. 568 с.
12. *Сапрыкин В.А., Рокотов С.П.* Теория гидроакустики и цифровая обработка сигналов. Л.: Изд-во ВВМУРЭ им. А.С. Попова, 1991. 415 с.
13. *Мочалов А.В., Павликов С.Н., Убанкин Е.И.* Новые направления в развитии телекоммуникационных систем: монография. Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2016. 116 с.
14. *Брычков Ю.А., Прудников А.П.* Интегральные преобразования обобщенных функций. М.: Наука, 1977. 287 с.
15. *Зарайский В.А., Тюрин А.М.* Теория гидролокации. Л.: Изд-во ВМА, 1975. 605 с.

STUDY OF AUTOCORRELATION FUNCTION OF A NEW CLASS OF BROADBAND SIGNALS

SERGEJ N. PAVLIKOV,

Vladivostok, Russia, psn1953@mail.ru

EVGENIY I. UBANKIN

Vladivostok, Russia, uei@inbox.ru

KEYWORDS: broadband signals; dispersion; doppler dispersion; correlation, transformation, processing, speed, radial, function, multiplicative, uncertainty.

ABSTRACT

Object of research broadband signals in radio communication systems. Subject: study of correlation properties of a new class of broadband signals. Aim is to justify the choice of method and signal processing to ensure maximum response coordinated the filter at high values of the relative radial velocity between the transmitter and receiver and significantly exceeding the noise level above the level of the signal at the input of the receiver. In the analysed

avtokorreljacionnye and mutual correlation functions define the scope of the use of signals from an ensemble. In the time-frequency plane time and frequency correlation functions form a surface called a function of uncertainty, which is a measure of the ability of a telecommunications system to distinguish the signals taken by delay and the relative radial velocity. Function of uncertainty imposed by Woodward and found wide application in the analysis of signals,



according to the classification of the transformations of time corresponds to the parabolicheskomu type. It is shown that under additive and multiplicative models transformation ability to speed resolution is determined by the width of the stripe Mellin signal, which is associated with the introduction of the delayed start of multiplicative signal relative to the beginning of it. To identify the properties of multiplicative correlation dependence of the signal (MS) from shift relative to the start signal numerical modelling in MathCad Wednesday. Analysis of the results showed an increase in the noise immunity of communication systems by eliminating losses associated with Doppler dispersion and reduces an item permissions allowing, in turn, increase orthogonal ensemble signals and thereby increase the number of simultaneous lines of communication. In the result of numerical simulations obtained maximum contrast response agreed to filter the relative radial velocity 10^6 m/s and additive noise interference when the SWAPS at the entrance of the receiver in the range 0.25-0.15.

REFERENCES

1. Varakin L.E. *Teoriya sistem signalov* [Systems theory signals]. Moscow: Sovetskoe radio, 1970. 376 p. (In Russian)
2. Tuzov G.I. *Statisticheskaya teoriya priema slozhnykh signalov* [Statistical theory demanding signals reception]. Moscow: Sovetskoe radio, 1977. 400 p. (In Russian)
3. Pestryakov V.B. (Ed.) *Shumopodobnye signaly v sistemakh peredachi informatsii* [Pseudonoise signals information transmission systems]. Moscow: Sovetskoe radio, 1973. 424 p. (In Russian)
4. Max J. *Methodes es techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques*. Masson, 1972. Vol. 1. 355 p.
5. Woodward P.M. *Probability and Information Theory, with Applications to Radar*. McGraw-Hill, New York; Pergamon Press, London, 1953. 128 p.
6. Belov S.P., Raczynski S.A., Belov A.S., Belov An. S., Efimov N. O. On the impact of doppler frequency shift on the noise immunity of telecommunication system with complex signals. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika* [Scientific statements, technopark, economy series. Informatics]. 2017. No. 9 (258). Issue 42. Pp. 179-186. (In Russian)
7. Harris B.D., Kramer A.S. Asymptotic evaluation of the ambiguity functions of high-gain FM matched filter sonar systems // *Proceedings of the IEEE*. 1968. Vol. 56. No. 12. Pp. 2149-2157. DOI: 10.1109/PROC.1968.6828
8. Libenson E.B. Ob otsenke funktsii neopredelennosti shirokopolosnykh ChM signalov [On the evaluation function uncertainty broadband FM signals]. *Trudy V vsesoyuznoy shkoly-seminara po statisticheskoy gidroakustike (SG-5)* [Proceedings of V all-Union seminar on statistical hydroacoustics (SG-5)]. Novosibirsk, 1974. 377 p. (In Russian)
9. Kelly U., Vishner P. Teoriya soglasovannoy fil'tratsii tseley dvizhushchikhsya uskorenno s vysokimi skorostyami [Theory of coherent filtering purposes moving rapidly with high speeds]. *Zarubezhnaya radioelektronika* [Foreign radioelectronics]. 1965. No. 10. Pp. 38. (In Russian)
10. Bowbel E.I., Gilevskiy S.V., Yurovsky A.A. Nekotorye svoystva shirokopolosnoy funktsii neopredelennosti dlya determinirovannykh i stokhasticheskikh signalov [Some properties of broadband features uncertainty for deterministic and stochastic signals]. *Zarubezhnaya radioelektronika* [Foreign radioelectronics] 1977. No. 6. Pp. 33-55. (In Russian)
11. Cook Ch.E., Bernfeld M. *Radar signals*. Academic Press, 1967. 531 p.
12. Saprykin V.A., Rocatov S.P. *Teoriya gidroakustiki i tsifrovaya obrabotka signalov* [Hydroacoustics theory and digital signal processing]. Leningrad: Voenno-morskoy institut radioelektroniki imeni A.S. Popova Publ., 1991. 415 p. (In Russian)
13. Mochalov A.V., Pavlikov S.N., Ubankin E.I. *Novye napravleniya v razvitiy telekommunikatsionnykh sistem: monografiya* [New directions in development of telecommunication systems: monograph]. Vladivostok: Vladivostok State University of Economics and Service Publ., 2016. 116 p. (In Russian)
14. Brichkov U.A., Prudnikov A.P. *Integral'nye preobrazovaniya obobshchennykh funktsiy* [Integral transforms generalized functions]. Moskov: Nauka, 1977. 287 p. (In Russian)
15. Zaraysky V.A., Tyurin A.M. *Teoriya gidrolokatsii* [Sonar theory]. Leningrad: S.M. Kirov Military Medical Academy Publ., 1975. 605 p. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Pavlikov S.N., PhD, Full Professor, Professor of the Department of Radioelectronics and telecommunications of Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy;
Ubankin E.I., PhD, Docent, Associate Professor of the Department of Radioelectronics and telecommunications of the Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy.



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10269

ПОСТРОЕНИЕ ОПОРНОЙ СЕТИ СВЯЗИ НА БАЗЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ОТСУТСТВИЕМ НАЗЕМНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

ЧЕРТОВА**Ольга Георгиевна¹****ЧИРОВ****Денис Сергеевич²****АННОТАЦИЯ**

В работе рассмотрен перспективный способ организации сети связи в условиях сложной помехоустойчивой обстановки и отсутствия наземной инфраструктуры. Оперативная система связи разработана с помощью самоорганизующейся сети с архитектурой Ad-hoc на базе стандарта WiMAX, причем опорная сеть связи организована в виде группировки малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Внесены изменения в существующий протокол маршрутизации AODV, что позволило решить проблемы, возникающие при быстром и частом изменении топологии сети. В основе метода лежит принцип ретрансляции трафика через ближайших соседей для канала с аддитивным белым гауссовским шумом и вероятностью ошибки 10^{-6} .

Работоспособность системы подтверждается расчетом бюджета линии связи вверх и вниз с помощью разработанного программного обеспечения, которое облегчает пересчет всех параметров при адаптации системы к динамически изменяющимся условиям окружающей среды. Расчет параметров частотно-территориального планирования показал, что один беспилотный летательный аппарат может обеспечивать связью до 1000 наземных абонентов (робототехнических комплексов) в своей зоне обслуживания, находясь при этом на расстоянии 3-9 километров от других летательных аппаратов, обеспечивая устойчивость к интерференционным помехам.

Таким образом, создание опорной системы связи на базе беспилотных летательных аппаратов является актуальной. Данное техническое решение отличается от известных самоорганизующихся систем связи возможностью реализации на базе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов российского производства.

Сведения об авторах:

¹аспирант Московского технического университета связи и информатики, научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения «Главный научно-исследовательский центр робототехники» Министерства обороны Российской Федерации, г. Москва, Россия, Olya-932007@yandex.ru,

²д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, den-chirov@yandex.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: малоразмерный беспилотный летательный аппарат; опорная сеть связи; самоорганизующаяся сеть связи Ad-hoc; протокол маршрутизации AODV, стандарт WiMAX; наземный робототехнический комплекс.

Для цитирования: Чертова О.Г., Чиров Д. С. Построение опорной сети связи на базе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с отсутствием наземной инфраструктуры // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 60-71. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10269



Введение

Несмотря на высокий технологический уклад, современное общество подвержено влиянию техногенных и природных аварий и катастроф, в результате которых наблюдается деградация, вплоть до полного разрушения инфраструктуры в районе аварии, в том числе сетей и средств связи. Поэтому при ликвидации последствий аварии (катастрофы) возникает необходимость оперативного развертывания систем связи для обеспечения связью специальных служб. Одним из возможных вариантов оперативного создания сети связи является организация опорной сети на беспилотных летательных аппаратах (БЛА). Задачей опорной сети является оперативная замена уничтоженной наземной инфраструктуры связи.

Методика исследования

Чаще всего для обеспечения связью пользуются средства УКВ диапазона, но максимальное расстояние работы в этом диапазоне ограничено 10 км [1]. Для обеспечения связи на большие расстояния требуется увеличение зоны покрытия. В случае с базовыми станциями (БС) пришлось бы выносить их антенны на большую высоту, что нарушает скрытность и неизбежно привлекает внимание противника с последующим огневым поражением или функциональным подавлением. Альтернативным способом решения задачи является организация связи на БЛА малого класса, которые используются в качестве ретрансляторов и базовых станций, но расположенных не на земле, а в воздухе. Использование малоразмерных БЛА вместо БС обеспечивает:

- высокую отказоустойчивость. Оперативное восстановление опорной сети за счет запуска дополнительных БЛА;
- возможность оптимального покрытия обслуживаемой территории;
- возможность перемещения БЛА в воздухе для покрытия максимально возможной площади;
- быстрое развертывание сети;
- возможность БЛА летать над определённым подвижным абонентом, тем самым постоянно обеспечивать его соединение;
- увеличение зоны обслуживания за счёт взлёта БЛА на большую высоту;
- более низкая стоимость по сравнению с развертыванием наземной инфраструктуры.
- масштабируемость сети в режиме самоорганизации.

Однако организация мобильной связи на БЛА обусловлена рядом недостатков: необходимостью создания густой сети покрытия, жёсткая фиксация узлов и маршрутов, возможна неполная зона покрытия, обязательно плотное расположение беспилотников и т.д. Эти недостатки отсутствуют у самоорганизующихся сетей связи.

Одним из типов беспроводной самоорганизующейся сети является децентрализованная сеть связи Ad-hoc, которая обладает важным свойством — адаптивностью к быстроменяющейся обстановке.

Построение опорной сети связи на базе малоразмерных БЛА возможно с помощью Ad-hoc архитектуры (беспроводная динамическая сеть или беспроводная самоорганизующаяся сеть, не имеющая постоянной структуры). Её используют в случаях, когда мобильные устройства принадлежат разным абонентам и единое централизованное управление отсутствует. Клиентские устройства соединяются «на лету», образуя собой сеть. Каждый узел сети пытается переслать данные, предназначенные другим узлам [2]. При этом определение того, какому узлу пересылать данные, производится динамически, на основании связности сети. Это является отличием Ad-hoc сети от проводных сетей и управляемых беспроводных сетей, в которых задачу управления потоками данных выполняют маршрутизаторы (в проводных сетях) или точки доступа (в управляемых беспроводных сетях). Каждое устройство Ad-hoc сети является как абонентским терминалом, так и маршрутизатором.

Поскольку в процессе выполнения задачи организации связи, действующие узлы могут отключаться, а новые узлы подключаться — топология сети подвержена быстрым и частым изменениям. Соответственно такие же изменения присутствуют в маршрутах доставки данных от БЛА к абоненту. Это приводит к тому, что применение известных протоколов маршрутизации (AODV, OLSR) приводит к невозможности организации связи при адаптации их к работе на малоразмерных БЛА в стандарте WiMAX.

Стандарт WiMAX позволяет работать в любых условиях, в том числе в условиях плотной городской застройки, обеспечивая большую дальность связи, высокое качество связи и скорость передачи данных. Сеть позволяет предоставлять услуги телефонии, доступа в Интернет и передачи данных без использования кабельных линий. Также сеть дает возможность оператору при дальнейшем росте числа абонентов производить масштабирование, не затрачивая при этом больших средств [3].

Передача данных в самоорганизующихся сетях связи построена на IP-протоколе, а данные маршрутизируются на сетевом уровне модели OSI [4]. Такой подход используется в самоорганизующихся сетях и полагается на особые протоколы маршрутизации (AODV, OLSR, HWMP и другие). Решение о применении того или иного протокола маршрутизации зависит от условий работы узлов для каждой конкретной задачи. Для решения задачи организации связи с помощью БЛА целесообразно использовать протокол AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) [5–7], поскольку AODV разработан для снижения задержек на передачу управляющих сообщений, улучшения мас-

штабируемости и производительности работы сети в сетях различного размера и представляет собой комбинацию двух протоколов: реактивного и проактивного, от которого он наследует концепцию hello-сообщений. Эти служебные сообщения, рассылаемые на расстояние одного транзитного участка, служат для поддержания узлом актуального списка своих соседей, что позволяет ускорить процесс рассылки запросов на построение маршрута.

Для поддержки требуемого качества передачи сообщений при решении поставленной задачи целесообразно внести в протокол ряд изменений [8–10]:

- все служебные пакеты инкапсулируются не в протокол UDP, а в протокол канального уровня, что позволяет локализовать область, в которой могут подделываться адреса отправителей в сообщениях;

- ввести механизм периодического обмена таблицами маршрутизации, чтобы к знаниям узла о топологии сети добавить знания его соседей;

- ввести два порядковых номера: для источника и для адресата, что позволит отслеживать новизну информации о топологии сети при использовании маршрута от адресата к источнику;

- ввести механизм быстрого восстановления маршрутов в случае нарушения одной из промежуточных связей, при этом многократно сократится время на восстановление нарушенного маршрута, а также уменьшится объём трафика, передаваемого по сети для восстановления нарушенного маршрута.

Данные изменения позволяют осуществлять передачу трафика с требуемым качеством в рамках стандарта WiMAX.

Способ применения технологии Ad-hoc для построения опорной сети связи с использованием малоразмерных БЛА заключается в следующем. Существует несколько абонентов (для конкретного примера в качестве абонентов рассматриваем наземные робототехнические комплексы (НРТК)) в условиях динамически изменяющейся окружающей среды с отсутствием наземной инфраструктуры. НРТК необходимо организовывать в единую робототехническую систему, скоординированную по целям и задачам. Для обеспечения связи над ними летает БЛА (рис. 1). На борту БЛА размещается два приёмно-передающих модуля (ППМ), один для обеспечения связи БЛА-БЛА (пунктирная линия), второй, работающий на другой частоте и с другой мощностью, для обеспечения связи БЛА-НРТК (кругами отмечены зоны покрытия).

Стоит отметить, что связь между БЛА необходимо реализовать на основе протоколов геомаршрутизации. Геомаршрутизация подразумевает передачу данных для группы получателей в сети, идентифицируясь по их географическому местоположению. Основным преимуществом протоколов такого типа является отсутствие необходимости в хранении маршрутной информации на транзитных узлах сети и возможность оптимизации маршрутов, с учетом текущей информации о местоположении узлов. Для построения оптимальных маршрутов, протоколы гео-

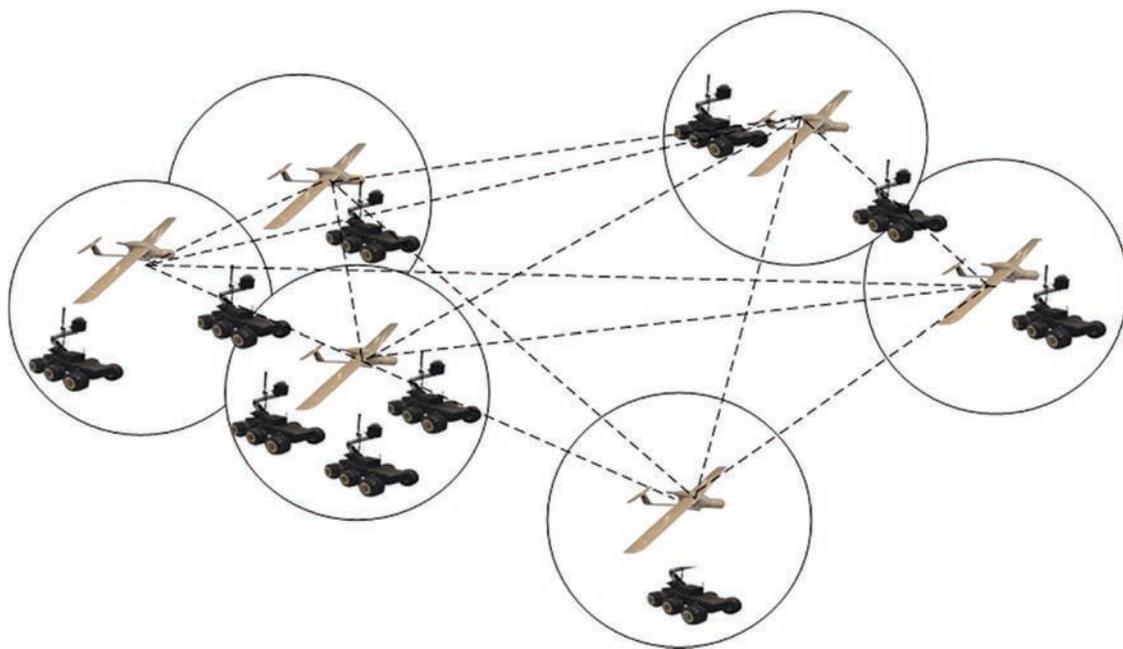


Рис. 1. Схема организации опорной Ad-hoc сети связи на базе малоразмерных БЛА



маршрутизации используют текущие геопространственные данные о положении БЛА в опорной сети, полученные от бортовых навигационных систем (например, аппаратуры спутниковой навигации «Глонасс»).

Рассмотрим возможность организации опорной Ad-hoc сети на основе базовой станции Air4gp стандарта IEEE802.16e с конфигурацией антенны типа MIMO и возможностью автоматического выбора модуляции. Преимущество использования стандарта WIMAX является его адаптация к внешним помехам, т.е. система может программно подстраиваться к текущим характеристикам канала связи. При низком уровне помех система будет использовать модуляцию QAM-64 и высокую скорость сверточного кодирования, что обеспечит максимальную скорость пере-

дачи данных [11, 12]. При высоком уровне помех будет использоваться модуляция QPSK при более низкой скорости кодирования и при меньшей скорости передачи данных.

Такую систему возможно реализовать на малоразмерных БЛА типа «Орлан-10», «Леер-3», «Птеро-СМ», «Ворон-300», «Нелк-В6» и т.д. Технические характеристики которых позволяют разместить на борту указанную базовую станцию [13].

Для оценки реализуемости представленного способа был проведен расчет бюджета линии связи вверх и вниз по формуле (1) относительно мощности переданного сигнала [13], который показал, что сигнал будет передаваться с заданным качеством и постоянной скоростью $V=75$ Мбит/с в любой, даже сложной помехоустойчивой обстановке.

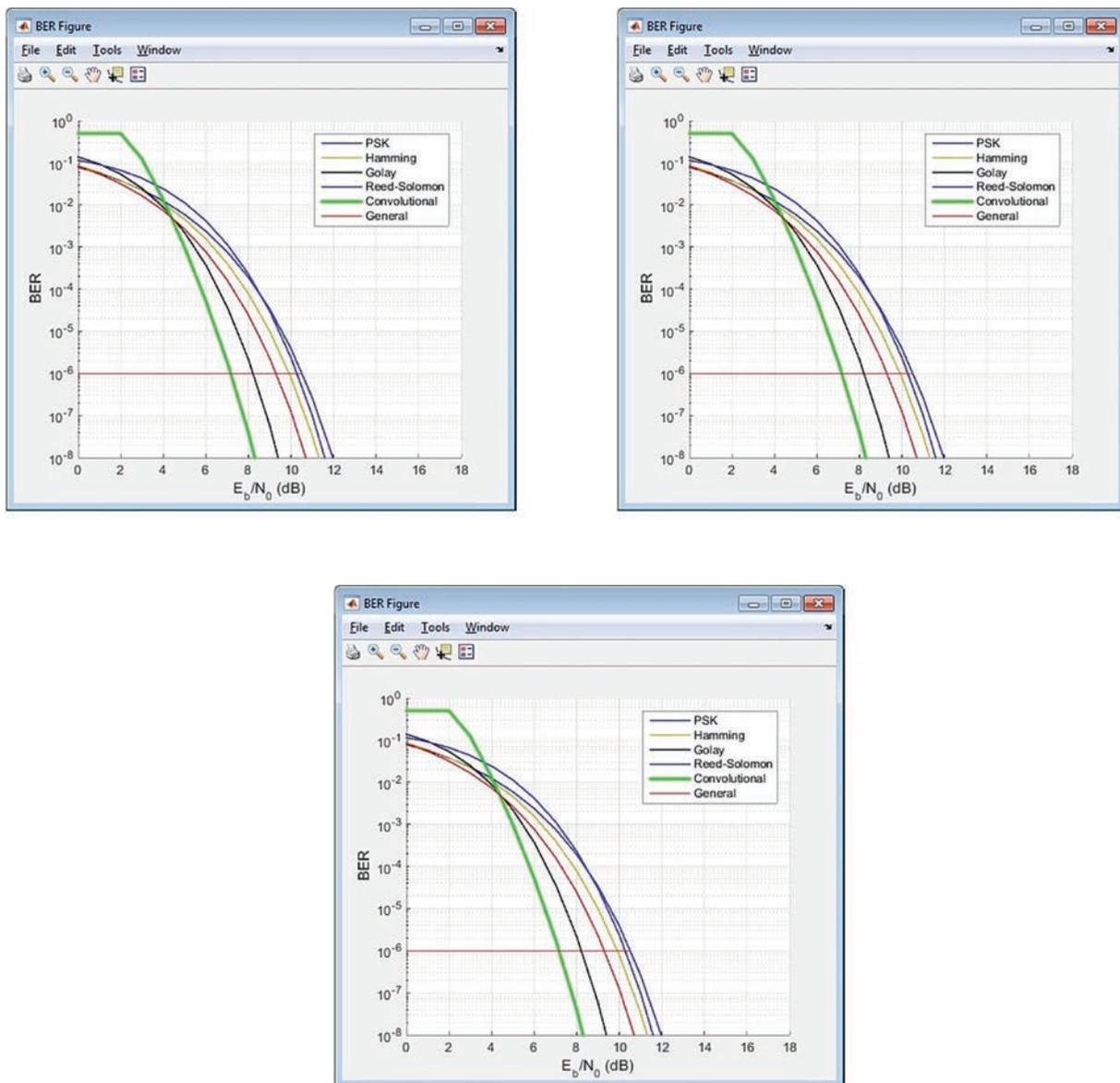


Рис. 2. Кривые помехоустойчивости для разных типов модуляции

$$P_{pd} = K_{c/sh} - G_{pm} + L_{\Sigma} + k_b + V, \quad (1)$$

где $K_{c/sh}$ — требуемое отношение сигнал/шум (ОСШ) для сверточного кодирования с вероятностью ошибки 10^{-6} (рис. 2), зависящее от кратности модуляции и при QAM 64 $K_{c/sh} = 32,882$ дБ;

G_{pm} — усиление принимающей антенны, у НРТК $G_{pm} = 15$ дБи, что соответствует усилению антенны современного автомобиля;

L_{Σ} — суммарные потери, влияющие на канал, при расчете брались наихудшие условия (выпадение осадков) $L_{\Sigma} = 85,533$ дБ;

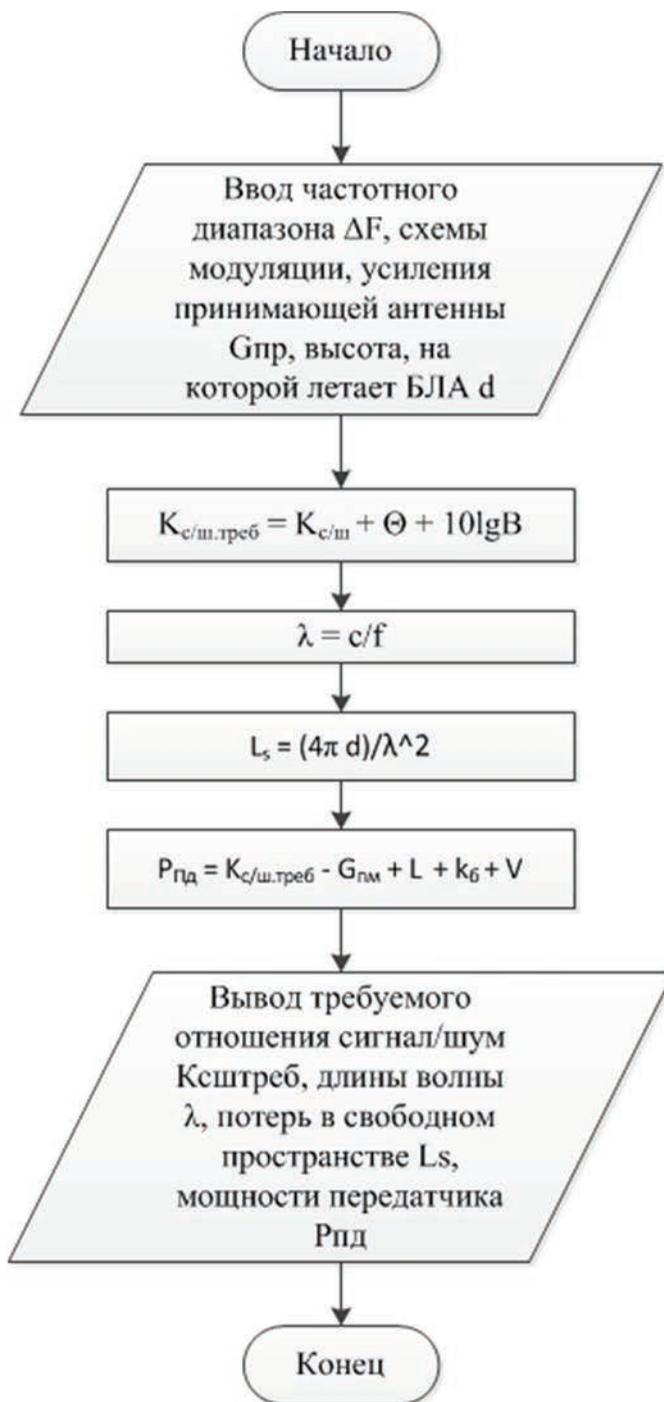


Рис. 3. Алгоритм работы программы



$k_b = -228,6 \text{ дБ*Вт/(Гц*К)}$ — постоянная Больцмана;
 V — ширина канала программно-настраиваемая
от 1,25 до 13,6 МГц.

Расчет выполнялся для линии вверх и вниз при разных способах модуляции, с помощью программного обеспечения, согласно разработанному алгоритму (рис. 3).

Пример работы программы представлен на рис. 4.

С помощью разработанной программы был проведен анализ зависимости мощности передающего модуля от высоты барражирования БЛА при разных рабочих частотах (рис. 5). Пунктирная линия соответствует ограничению по мощности $P = 0,159 \text{ Вт}$. Это максимальная мощность передатчика, размещенного в ППМ БЛА, соответствующего стандарту WiMAX и антенне типа ММО для базовой станции Air4gr.

Из рис. 5. видно, что система является работоспособной и на частотах до 4 ГГц работает при любой из заданных модуляций на рабочей высоте малоразмерного БЛА (до 3 метров). На частотах от 4 до 12 ГГц не на всей рабочей высоте работает с необходимым качеством модуляция QAM 64, а при 12–13,6 ГГц на всей рабочей высоте с необходимым качеством работает только QPSK. Таким образом, при динамически изменяющихся условиях окружающей среды следует постоянно изменять вид модуляции

и тщательно следить за высотой барражирования БЛА, что и обеспечивает разработанная программа.

Однако при смене вида модуляции изменяется скорость передачи символов, что может ухудшить качество передачи информации НРТК. Выбор модуляции влияет на скорость передачи символов R_s по следующей формуле (2).

$$R_s = \frac{V}{\log_2 B} \quad (2)$$

где V — скорость передачи данных 75 Мбит/с, B — кратность модуляции. Получим следующие значения (табл. 1).

Таблица 1

Символьная скорость

QPSK	37,5 Мбит/символ
QAM 16	18,75 Мбит/символ
QAM 64	12,5 Мбит/символ

Согласно рис. 5 и табл. 1, можно работать на максимальной символьной скорости до рабочей частоты $f=4 \text{ ГГц}$,

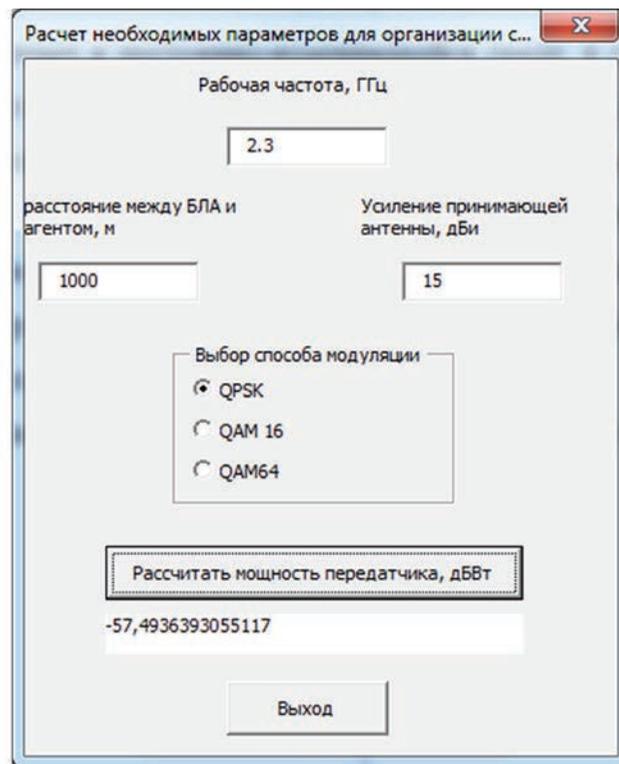


Рис. 4. Результат работы программы

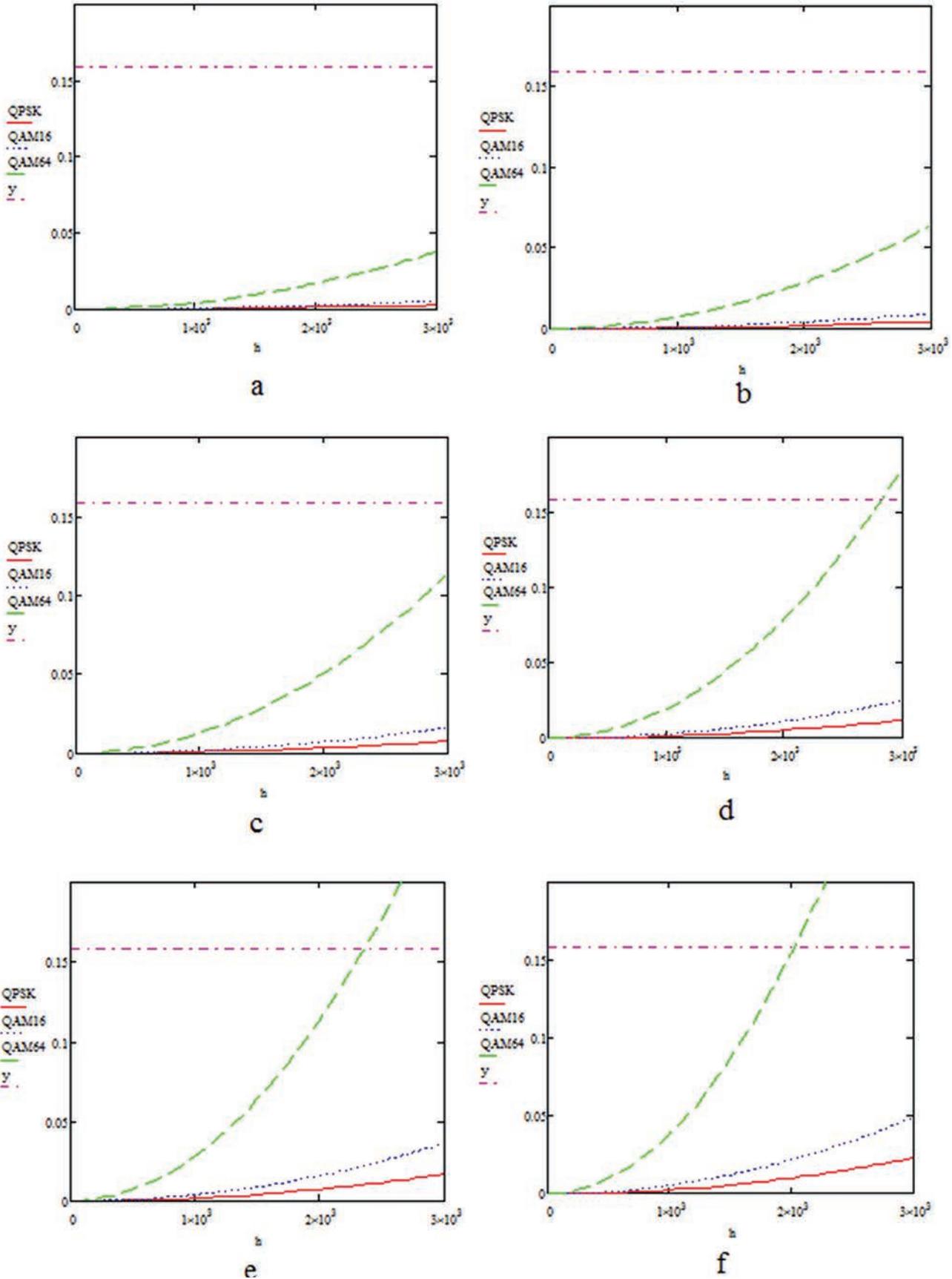


Рис. 5a,b,c,d,e,f. $a-f=2,3$ ГГц, $b-f=3,0$ ГГц, $c-f=4,0$ ГГц, $d-f=5,0$ ГГц, $e-f=6,0$ ГГц, $f-f=7,0$ ГГц, $g-f=8,0$ ГГц, $h-f=9,0$ ГГц, $i-f=10,0$ ГГц, $j-f=11,0$ ГГц, $k-f=12,0$ ГГц, $l-f=13,0$ ГГц, $m-f=13,6$ ГГц

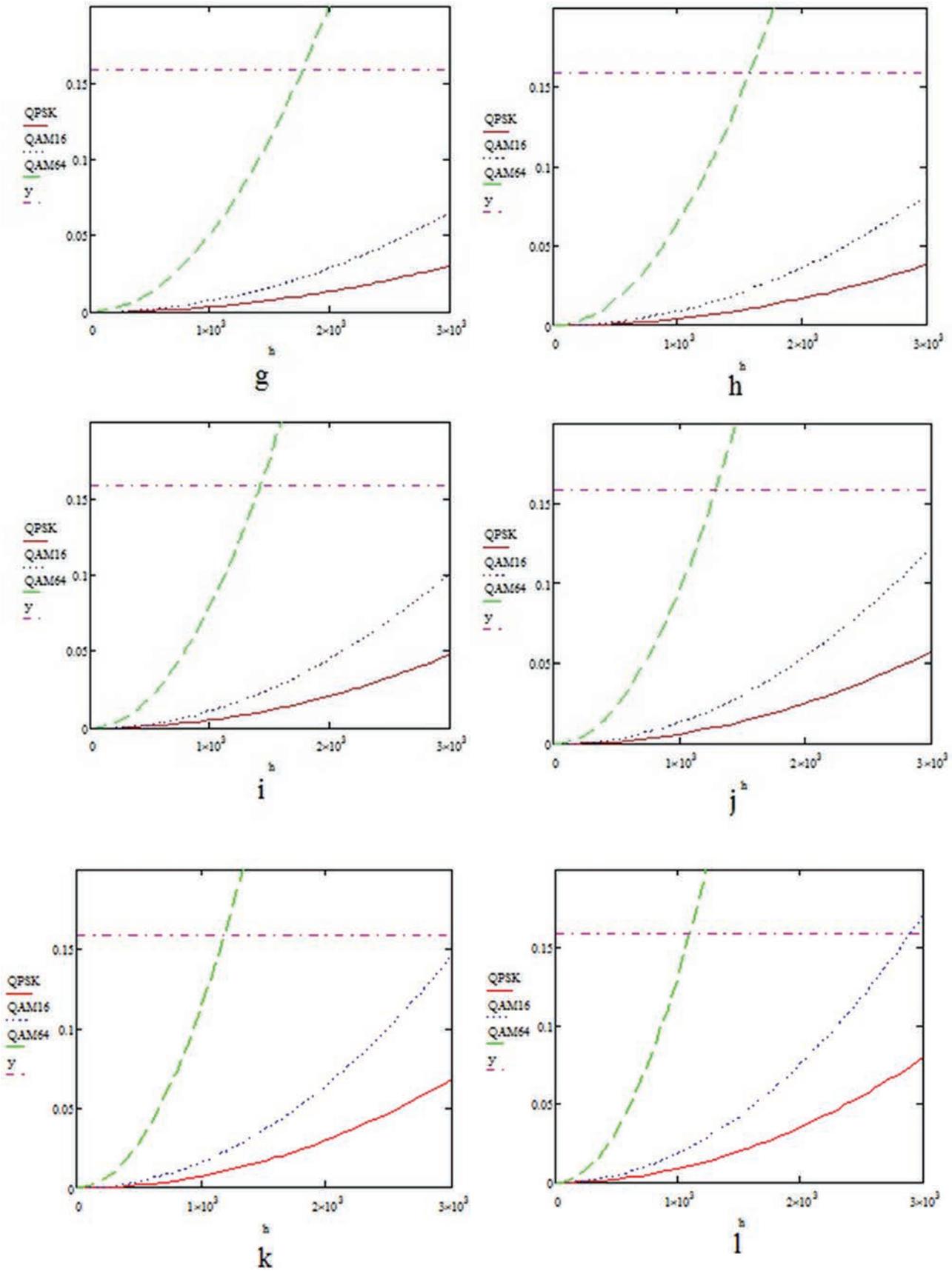


Рис. 5g,h,i,j,k,l. $a-f = 2,3$ ГГц, $b-f = 3,0$ ГГц, $c-f = 4,0$ ГГц, $d-f = 5,0$ ГГц, $e-f = 6,0$ ГГц, $f-f = 7,0$ ГГц, $g-f = 8,0$ ГГц, $h-f = 9,0$ ГГц, $i-f = 10,0$ ГГц, $j-f = 11,0$ ГГц, $k-f = 12,0$ ГГц, $l-f = 13,0$ ГГц, $m-f = 13,6$ ГГц

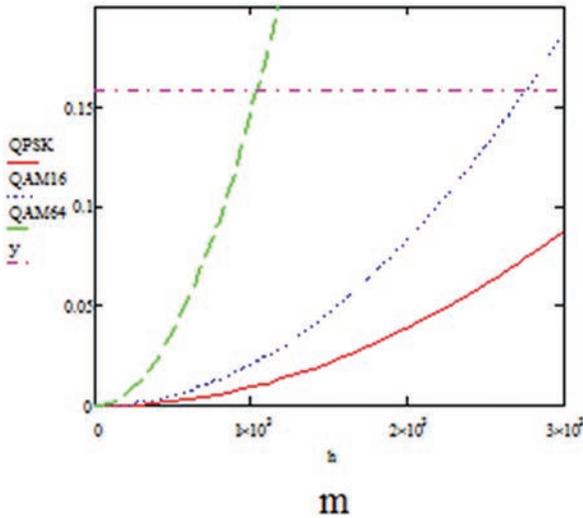


Рис. 5m. $a-f=2,3$ ГГц, $b-f=3,0$ ГГц, $c-f=4,0$ ГГц, $d-f=5,0$ ГГц, $e-f=6,0$ ГГц, $f-f=7,0$ ГГц, $g-f=8,0$ ГГц, $h-f=9,0$ ГГц, $i-f=10,0$ ГГц, $j-f=11,0$ ГГц, $k-f=12,0$ ГГц, $l-f=13,0$ ГГц, $m-f=13,6$ ГГц

от $f = 4$ ГГц до $f = 13$ ГГц стоит переключиться на модуляцию QAM 16, а на предельно возможной рабочей частоте $f = 13,6$ ГГц возможно использовать только QPSK.

Основной задачей спектрально эффективных модуляций является максимизация эффективности использования полосы частот [14].

Низкая скорость передачи данных уменьшает ширину пропускания, а любое повышение скорости передачи сигналов требует увеличения ширины полосы пропускания.

Запишем формулу спектральной эффективности (3) и рассмотрим её для всех значений ширины полосы в табл. 2.

$$Z = \frac{V}{\Delta f} \tag{3}$$

Таблица 2

Зависимость спектральной эффективности от разных значений ширины полосы

$\Delta f = 1,25$ МГц	$Z = 60$ бит/с/Гц
$\Delta f = 5,0$ МГц	$Z = 15$ бит/с/Гц
$\Delta f = 10,0$ МГц	$Z = 7,5$ бит/с/Гц
$\Delta f = 13,6$ МГц	$Z = 5,5$ бит/с/Гц

На рис. 6 продемонстрировано, что при фиксированной скорости $V = 75$ Мбит/с и при ширине полосы $\Delta f = 10,0$ МГц лучше использовать QAM 64, а при $\Delta f = 13,6$ МГц — QPSK.

Кривая линия на графике — это граница, разделяющая область реальных прикладных систем связи и область, в которой такие системы связи теоретически невозможны.

При выборе тех или иных параметров связи всегда нужно искать компромисс между несколькими параметрами: так, увеличивая символьную скорость, увеличивается мощность на передатчике. При выборе модуляции с низким отношением сигнал/шум требуется значительно увеличить значение ширины полосы.

Разработанная программа поможет оператору не тратить время на пересчет и перестройку параметров на БЛА. В дальнейшем планируется сделать эту работу автоматической.

Также рассмотрена задача частотно-территориального планирования (ЧТП), в ходе которой установлено, что максимальное число НРТК при идеальных условиях приёма, обслуживаемое одним БЛА, может достигать $N_{ab} \approx 1000$ НРТК. Значение получено в соответствии с выражением (4):

$$N_{ab} = M_s \frac{A_s}{A_1} \tag{4}$$

где M_s — число секторов в антенне, была использована узконаправленная антенна;

A_s — допустимая нагрузка в секторе одного БЛА при допустимом значении числа каналов трафика в соответствии с моделью Эрланга (рис. 7) $A_s = 0,001 \dots 50$ [15];

A_1 [Эрл] — средняя по всем видам трафика абонентская нагрузка от одного НРТК.

Целью ЧТП является нахождение значения величины защитного интервала между БЛА, которое находится из выражения (5). Защитный интервал необходим для борьбы с интерференцией между одинаковыми частотными каналами.

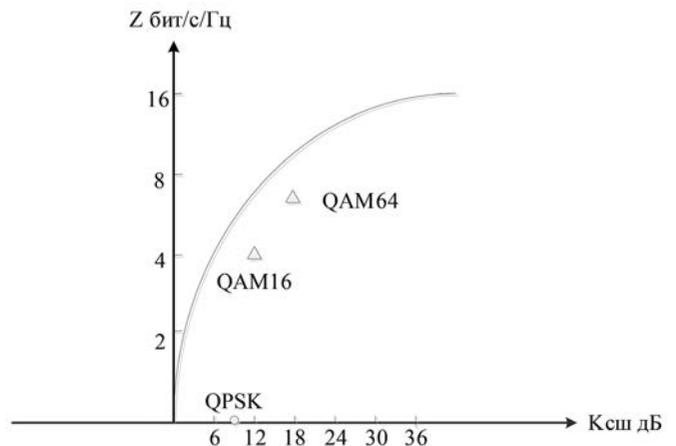


Рис. 6. Плоскость «полоса – эффективность»

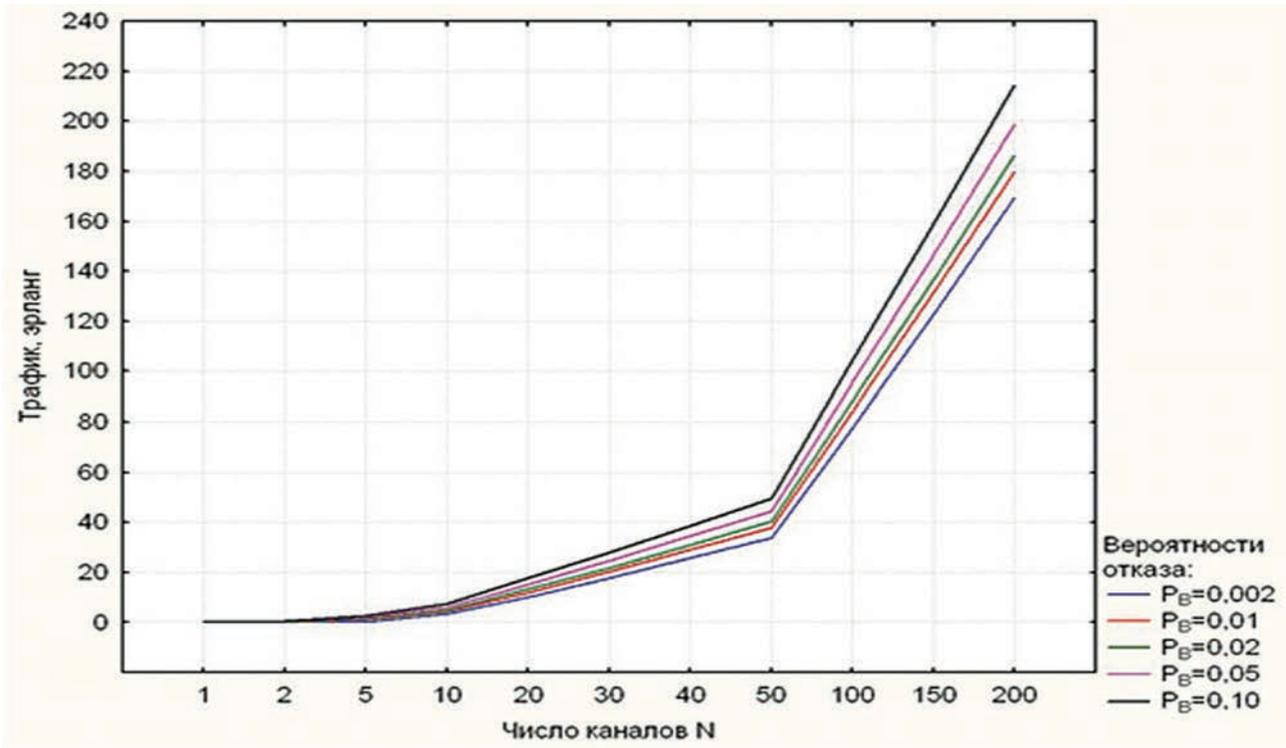


Рис. 7. Зависимость трафика от числа каналов в системе

$$D = R\sqrt{3N_{kt}} \quad (5)$$

где $R = 4-5$ км — радиус зоны покрытия в соответствии с характеристиками стандарта базовой станции;

N_{kt} — число каналов трафика в одном радиоканале, определяемое стандартом радиодоступа (для OFDM $N_{kt} = 1...3$). Итого получим $D = 9-13$ км.

Выводы

В работе рассмотрено применение БЛА в качестве ретранслятора и БС в областях с отсутствующей наземной инфраструктурой. Особенности Ad-hoc архитектуры на базе стандарта WiMAX позволяют создать опорную сеть связи с возможностью оперативной адаптации к динамически изменяющейся обстановке. Однако существующие протоколы маршрутизации не позволяли реализовать работу системы с необходимым качеством. Для решения этой проблемы использован оптимизированный под конкретную задачу протокол маршрутизации AODV, который позволяет быстро восстанавливать маршруты в случае нарушения одной из промежуточных связей с минимальной задержкой при установлении соединения с новым узлом, маршрут до которого был ранее не известен.

Работоспособность разработанной модели сети связи на базе малоразмерных БЛА проверена с помощью анализа бюджета линии связи вверх и вниз для этого была разработано программное обеспечение на языке Visual Basic. По результатам анализа полученных данных выявлены нелинейные зависимости параметров друг от друга, поэтому при перестроении системы под изменения окружающей обстановки многие из них приходится пересчитывать и принимать решения об изменении. Так при увеличении пропускной способности увеличивается отношение сигнал/шум, который, в свою очередь, увеличивается при повышении скорости передачи данных. В дальнейшем планируется усовершенствование программы с целью перехода системы к полностью автономной работе.

Литература

1. Донченко А.А., Чиров Д.С. Обоснование требований к системе связи беспилотных летательных аппаратов средней и большой дальности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. №. 12. С. 12–16.
2. Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Диане С.А.-К. Перспективы применения, принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем // Сборник трудов XII всероссийского совещания по



проблемам управления ВСПУ-2014 (Москва, 16–19 июня 2014 г.). М., 2014. С. 3810–3821.

3. PCI DSS Wireless Guidelines, 2011. URL: https://www.pcisecuritystandards.org/pdfs/PCI_DSS_v2_Wireless_Guidelines.pdf (дата обращения: 22.12.2018).

4. Абилов А. В. Сети связи и системы коммутации. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2002. 147 с.

5. Shirani R., St-Hilaire M., Kunz T., Zhou Y., Li J., Lamont L. Combined reactive-geographic routing for unmanned aeronautical ad-hoc networks // 8th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC-2012). 2012. Pp. 820–826.

6. Frew E. W., Brown T. X. Airborne communication networks for small unmanned aircraft systems // Proc. IEEE 96(12). 2008. Pp. 2008–2027.

7. Bani Yassein M., Damer N. A. Flying Ad-Hoc Networks: Routing Protocols, Mobility Models, Issues // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2016. Vol. 7. No. 6. Pp. 162–168. Doi:10.14569/IJACSA.2016.070621

8. Сорокин А. С. Сотовые системы радиосвязи. Курсовое и дипломное проектирование. М.: Изд-во МТУСИ, 2006. 30 с.

9. Чертова О. Г. Исследование возможности построения сети связи на базе беспилотных летательных аппаратов специального назначения // Сборник докладов

Восьмой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (Москва, 26 октября 2017 года) / под общей редакцией канд. техн. наук Н. Э. Ненартовича. М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2018. С. 531–538.

10. Васильев Д. С., Абилов А. В. Протоколы маршрутизации в MANET // Электросвязь. 2014. № 11. С. 52–54.

11. Grace D., Morhociu M. Broadband Communications via High-Altitude Platforms. Wiley, 2011. 398 p.

12. Чиров Д. С., Лобов Е. М. Выбор сигнально-кодовой конструкции для командно-телеметрической линии радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами средней и большой дальности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 10. С. 21–28.

13. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620925. База данных робототехнических комплексов / А. А. Данилевич, О. Г. Чертова, Е. А. Горохова, И. О. Старикова, М. С. Тофоров, Г. Н. Настас, И. В. Благодарящев; заявл. 15.08.17.

14. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: под ред. А. В. Назаренко. М.: Вильямс, 2004. 1099 с.

15. Васильев Д. С. Разработка алгоритмов передачи потоковых данных на прикладном уровне в сетях беспилотных летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2015. 147 с.

BUILDING A CORE COMMUNICATION NETWORK WHICH IS BASED ON SMALL SIZE UNMANNED AIRCRAFT VEHICLE WITHOUT GROUND INFRASTRUCTURE

OLGA G. CHERTOVA,

Moscow, Russia, Olya-932007@yandex.ru

DENIS S. CHIROV,

Moscow, Russia, den-chirov@yandex.ru

KEYWORDS: small-sized unmanned aerial vehicles, core communication system, Ad-hoc self-organizing communication system, routing AODV protocol, WiMAX standard, ground-based robotics complex.

ABSTRACT

In work are reviewed perspective way of organization a core communication network between small size unmanned aircraft vehicle and ground-based robotics complex in condition of noise immunity and without ground infrastructure. Operative communication system is developed by self-organizing network which is based on Ad-hoc architecture and WiMAX wireless standard. Changes that introduced in existing routing AODV protocol allowed solving problems which appeared due to fast and often network topology changes.

The method is based on traffic retranslation principles through the nearest neighbors for channels with additive white gaussian noise and 10^{-6} probability of error.

Efficiency of system is checked by up-link and down-link budget calculation with developed program soft which alleviate counting all parameters while system is adjusting to dynamic changing environmental conditions. The main results are shown in tables and graphs; as a result, the main task of spectrally effective modulation is visible:



maximum bandwidth efficiency.

Separately, was made the calculation of the parameters of the frequency-territorial planning, which showed that one unmanned aerial vehicle can provide communications up to 1000 ground-based robotic complexes in its service area, while being at a distance of 3 to 9 kilometers from other aircraft, resisting interference.

Thus, a core communication system is relevant and efficient, differs from the known self-organizing communication systems by the possibility of implementation on the basis of small-sized unmanned aerial vehicles of Russian production.

REFERENCES

1. Donchenko A.A., Chirov D.S. Rationale requirements for the communication system of UAVS medium and long range. *T-Comm*. 2015. Vol. 9. No. 12. Pp. 12-16. (In Russian)
2. Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P., Diane S. AK. Perspektivy primeneniya, principy postroeniya i problemy razrabotki mul'ti-agentnyh robototekhnicheskikh sistem [Application prospects, principles of construction and problems of developing multi-agent robotic systems]. *Sbornik trudov XII vserossijskogo soveschaniya po problemam upravleniya VSPU-2014* [Proc. of the XII All-Russian Meeting on the Control System -2014, Moscow, June 16-19, 2014]. Pp. 3810-3821. (In Russian)
3. PCI DSS Wireless Guidelines, 2011 [Electronic resource]. URL: https://www.pcisecuritystandards.org/pdfs/PCI_DSS_v2_Wireless_Guidelines.pdf (access date: 12.22.2018).
4. Abilov A.V. *Seti svyazi i sistemy kommutacii* [Communication networks and switching systems]. Izhevsk: Kalashnikov Izhevsk State Technical University Publ., 2002. 147 p. (In Russian)
5. Shirani R., St-Hilaire M., Kunz T., Zhou Y., Li J., Lamont L. Combined reactive-geographic routing for unmanned aeronautical ad-hoc networks. *8th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC-2012)*. 2012. Pp. 820-826.
6. Frew E.W., Brown T.X. Airborne communication networks for small unmanned aircraft systems. *Proc.IEEE96(12)*. 2008. Pp. 2008-2027.
7. Bani Yassein M., Damer N.A. Flying Ad-Hoc Networks: Routing Protocols, Mobility Models, Issues. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2016. Vol. 7. No. 6. Pp.162-168. Doi:10.14569/IJACSA.2016.070621
8. Sorokin A.S. *Sotovye sistemy radiosvyazi. Kursovoe i diplomnoe proektirovanie* [Cellular radio systems. Course and diploma design. Study Guide]. Moscow: Moscow technical university of communications and informatics Publ., 2006. 30 p. (In Russian)
9. Chertova O.G. Issledovanie vozmozhnosti postroeniya seti svyazi na baze bespilotnyh letatel'nyh apparatov special'nogo naznacheniya [Research of a possibility of creation of a communication network on the basis of unmanned aerial vehicles of a special purpose]. *Sbornik dokladov Vos'moj nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchenykh i specialistov* [Proc. of the Eighth scientific and technical conference of young scientists and experts, Moscow, October 26, 2017]. Moscow: Almaz, 2018. Pp. 531-538. (In Russian)
10. Vasiliev D.S., Abilov A.V. Routing protocols in MANET. *Elektrosvyaz'* [Electric communication]. 2014. No. 11. Pp. 52-54. (In Russian)
11. Grace D., Morhocic M. *Broadband Communications via High-Altitude Platforms*. Wiley, 2011. 398 p.
12. Chirov D.S., Lobov E.M. Choice signal-code designs for command-telemetry communication radio line with unmanned aerial vehicle average and big range. *T-Comm*. 2017. Vol. 11. No. 10. Pp. 21-28. (In Russian)
13. Certificate of State Registration of Database No. 2017620925. *Baza dannyh robototekhnicheskikh kompleksov* [Database of robotic complexes] / A.A. Danilevich, OG Chertova, E.A. Gorokhova, I.O. Starikova, M.S. Toforov, G.N. Nastas, I.V. Gratitude. Declared 15.08.17. (In Russian)
14. Sklar B. *Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. By ed. A.V. Nazarenko. Moscow: Williams, 2004. 1099 p. (In Russian)
15. Vasiliev D.S. Razrabotka algoritmov peredachi potokovyh dannyh na prikladnom urovne v setyah bespilotnyh letatel'nyh apparatov: dis. ... kand. tehn. nauk [Development of streaming data transfer algorithms at the application level in networks of unmanned aerial vehicles. Dr. tech. sci. diss.]. Izhevsk, 2015. 147 p. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Chertova O. G., postgraduate student of Moscow technical university of communication and informatics, researcher of Federal state budgetary institution «General scientific research center of robotics» Ministry of Defence of Russian Federation;
Chirov D. S., PhD, Docent, leading researcher of Moscow technical university of communication and informatics.



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10270

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОРСКОЙ БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ С ПОМОЩЬЮ БОРТОВОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

**АБДУЛЛАЕВА
ЛАТИФА ДЖАФАРАГА КЫЗЫ**

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена вопросам определения морской береговой линии с помощью бортовых измерительных систем. Отмечено, что основной недостаток спектрального метода определения береговой линии может быть устранено путем реализации измерений с применением разноформатных окон. Показано, что в качестве границы вода-суша можно принять критерий, когда показатель водное содержание почвы достигает величины 40%. Рассмотрена возможность построения гиперспектральной измерительной системы на базе индекса WISOil с применением управляемого жидкокристаллического фильтра. Сформулировано требование к скорости передвижения носителя системы измерения. Оптимизирован режим работы измерителя в смысле уменьшения избыточности информации путем введения адаптивного режима измерения. Проанализированы вопросы разработки многоволнового метода дистанционного определения береговой линии в условиях сильного аэрозольного загрязнения атмосферы. Предложена модель оценки сигналов спутниковых спектрорадиометров для случая аномального загрязнения атмосферы аэрозолями. На основе предложенной модели разработан многоволновый метод определения береговой линии, позволяющий устранить аэрозольную погрешность известного двухволнового метода.

Сведения об авторе:

ведущий научный сотрудник
Национального аэрокосмического агентства,
г. Баку, Азербайджан, latifa.abdullayeva@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автоматизированная система военного назначения; информационная система; средства автоматизации; качество; характеристики; жизненный цикл.

Для цитирования: *Абдуллаева Л.Д.* Методы определения морской береговой линии с помощью бортовой многоканальной измерительной системы // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 72-80. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10270



Введение

Хорошо известно, что проведение достоверного мониторинга береговых зон является важнейшей задачей для устойчивого развития прибрежных территорий и защиты окружающей среды в этих регионах [1–2]. При этом особую важность имеет исследование долговременной и сезонной динамики береговых линий различных водоёмов. Как отмечается в [3], береговая линия является наиболее важной характеристикой земной поверхности, обладающей временной динамикой. Применение дистанционного спектрального зондирования в целях определения береговой линии основывается на свойствах водной среды поглощения оптической радиации в инфракрасной области и сильного отражения этой радиации почвой и растительностью. Эти спектральные свойства компонентов прибрежных зон обуславливают использование изображений видимого и инфракрасного диапазонов для решения задач картирования береговых линий [1].

Методика исследования

Как сообщается в работе [4], форма береговой линии находится под воздействием таких факторов как гидрография, геология, климат и растения. Использование самолетных средств для аэрофотографирования береговых зон с целью контроля береговых линий связано с большими затратами, что обосновывает использование космических снимков в этих целях.

Согласно работе [4], для исследования динамики береговой линии могут быть использованы различные источники данных, такие как картографические данные, спутниковые снимки (SPOT-PX/XS, Landsat-TM, Corona), а также самолетные данные.

Как отмечается в работе [5], результаты дистанционного зондирования такого показателя, как водное содержание почвы (SMC) зависит от неровностей поверхности почвы. Информативность гиперспектральных изображе-

ний при исследовании влажности почвы зависит от цвета почвы, а также от текстуры почвы.

Несмотря на вышеуказанные недостатки, гиперспектральные методы исследования водного содержания почвы в 2015–2018 гг. продолжались развиваться. В течении этих годов на орбиту были выведены гиперспектрометры, работающие по программам PRISMA и EnMAP. Указанные приборы охватывают спектральный диапазон 0,4–2,5 мкм со спектральным разрешением 10 нм.

Вместе с тем, в принципе, береговая линия может быть определена с помощью сигнала одного спектрального канала спектрометра. Например, сигнал отражения воды в ИК диапазоне существенно ниже по уровню сигнала отражения почвы и других компонентов прибрежной суши. С этой целью могут быть использованы один из ИК каналов аппаратуры ТМ или ЕТМ⁺. Согласно [3], для этой цели наиболее подходящим является 5-й канал среднего ИК диапазона ТМ. Однако, как отмечается в [1], если граница земля-вода имеет комплексный характер и заполнена водными растениями, то из-за высокой отражательной способности растений возникает некоторая погрешность определения береговой линии. Для устранения указанного недостатка используется двухволновая методика, например сигналы каналов 4 и 2 аппаратуры ЕТМ⁺/ТМ. В табл. 1 приведены данные спектральных каналов ЕТМ⁺/ТМ.

Как отмечается в работе [1], для определения береговой линии может быть использовано следующее свойство спектральных каналов: отношение сигналов каналов 2 и 5, т.е. b_2/b_5 применительно к водной среде больше, чем единица, однако меньше единицы для суши. Однако, существенный недостаток данного метода заключается в том, что некоторые растительные участки, существующие в береговой зоне могут быть отнесены к водной территории. Другим, не менее существенным недостатком данного метода, на наш взгляд, является незащищённость от влияния аномального атмосферного аэрозоля, что может привести

Таблица 1

Данные спектральных каналов ЕТМ/ТМ

Номер канала	Спектральный диапазон ЕТМ ⁺	Спектральный диапазон ТМ
1	0,45 – 0,515	0,45-0,52
2	0,525 – 0,6	0,53-0,60
3	0,63 – 0,69	0,63-0,69
4	0,75 – 0,9	0,76-0,90
5	1,55 – 1,75	1,55-1,75
6	10,4 – 12,5	10,5-12,4
7	2,09 – 2,35	2,08-2,35

к уменьшению сигнала b_2 . Как результат, уменьшение b_2/b_3 может привести к оценке некоторых водных участков в качестве суши. Для устранения вышеуказанного недостатка в настоящей статье также рассматривается возможность разработки теоретических основ многоволнового метода определения береговой линии, основу которой составляет трёхволновый метод устранения аэрозольной погрешности в солнечных фотометрах, изложенный в работах [6–7].

Наиболее полное теоретическое обоснование возможности применения показателя SMC в качестве индикатора для определения береговой линии приведено в работе [8]. Согласно [8], комбинация сред «вода-песок» по результатам спектральных измерений может быть разделена на четыре группы: сухой песок; влажный песок; мокрый песок; насыщенный песок. Спектральные сигнатуры этих четырех классов показаны на рис. 1.

В табл. 1 приведены данные по выбору границ между вышеуказанными группами и водной средой.

Вместе с тем, очевидно что высказанные в работе [5] критические замечания на счет влияния неровности поверхности почвы должны быть приняты во внимание. Для решения указанного вопроса воспользуемся результатами исследований, приведенных в работе [9].

Как отмечается в работе [9], на результаты спектральных измерений влажности почвы могут повлиять такие факторы как контраст, гомогенность, текстура и энергетические характеристики. Для исследования влияния

текстуры почвы предлагается проводить измерения с разноформатными окнами: 3×3 ; 7×7 ; 15×15 ; 31×31 ; и 63×63 . Отмечается что использование результатов таких измерений с применением алгоритма необучаемой классификации ISODATA позволяет четко установить границы вышеуказанных групп.

Таким образом, наиболее общий недостаток спектрального метода определения береговой линии может быть устранен с применением способа измерений разноформатного окна.

Подробное описание и обоснование метода разноформатного окна приведено в работе [9] и здесь далее не обсуждается. Более подробно рассмотрим вопросы использования спектрального метода определения береговой линии.

Как указано в работе [5], в основе спектрального метода определения влажности почвы лежит полуэмпирическая модель, связывающая коэффициент отражения почвы $\rho(\lambda)$ с показателем SMC и некоторыми коэффициентами $a(\lambda)$, $b(\lambda)$, $c(\lambda)$, зависящими от длины волны проводимых измерений:

$$\rho(\lambda) = a(\lambda) \cdot SMC^2 + b(\lambda) SMC + c(\lambda) \quad (1)$$

где $c(\lambda)$ —спектральный коэффициент, эквивалентный спектральной сигнатуре сухой почвы; $a(\lambda)$, $b(\lambda)$ — спектральные коэффициенты, подробно измеренные в [10].

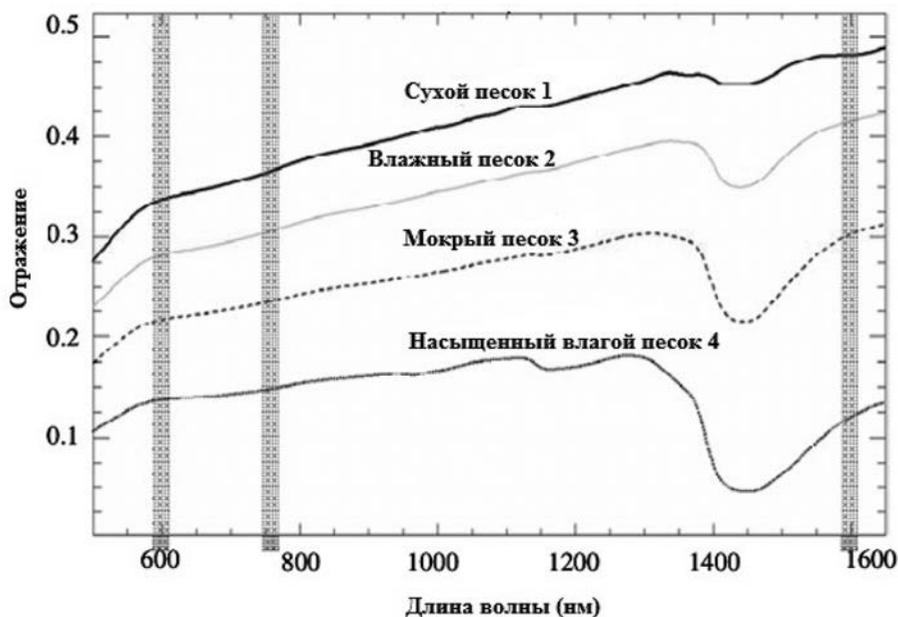


Рис.1. Спектральные сигнатуры 4-х групп комбинаций «вода-песок»: 1 — сухой песок; 2 — влажный песок; 3 — мокрый песок; 4 — насыщенный песок

Таблица 2

Данные по выбору границ между вышеуказанными группами и водной средой

Группы	Водное содержание	Границы между группами и водой
Сухой песок	0-10%	Граница между сухим и влажным песком
Влажный песок	10-20%	Граница между влажным и мокрым песком
Мокрый песок	20-30%	Граница между мокрым и насыщенным песком
Насыщенный влагой песок	30-40%	Граница между насыщенным песком и водой

Очевидно, что если $\rho(\lambda)$, $a(\lambda)$, $b(\lambda)$, $c(\lambda)$ известны, то SMC может быть вычислен путем решения соответствующего квадратичного уравнения

$$SMC^2 + \frac{b(\lambda)}{a(\lambda)} SMC + \frac{c(\lambda) - \rho(\lambda)}{a(\lambda)} = 0 \quad (2)$$

Согласно (2), для оценки SMC также пригодны спектральные индексы NSMI и WISOIL, определяемые как

$$NSMI = \frac{\rho_{1,8} - \rho_{2,119}}{\rho_{1,8} + \rho_{2,119}} \quad (3)$$

$$WISOIL = \frac{\rho_{1,45}}{\rho_{1,30}} \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) в индексах указаны значения длин волн проводимых измерений в мкм.

Как видно из вышеприведенных формул (3) и (4), для определения величины SMC необходимо проведение гиперспектральных измерений. Однако, применение гиперспектрометров не является единственным решением данной проблемы.

Далее, в настоящей статье покажем, что для этой цели могут быть использованы жидкокристаллические фильтры.

В настоящее время многие компании мира изготавливают жидкокристаллические фильтры с перестраиваемой длиной волны. Например, компания AZIMUT-FOTONIKS производит перестраиваемый жидкокристаллический фильтр, у которого длина волны может быть изменена с шагом 20 нм в диапазоне 650–1100 нм. На рис. 2 приведена блок-схема гиперспектрального определителя береговой линии, построенного на базе жидкокристаллического фильтра.

Устройство работает следующим образом. При поступлении на вход жидкокристаллического фильтра 1 оптического сигнала блок управления 6 подключает выход генератора 2 на управляемый вход фильтра. Сигналы на

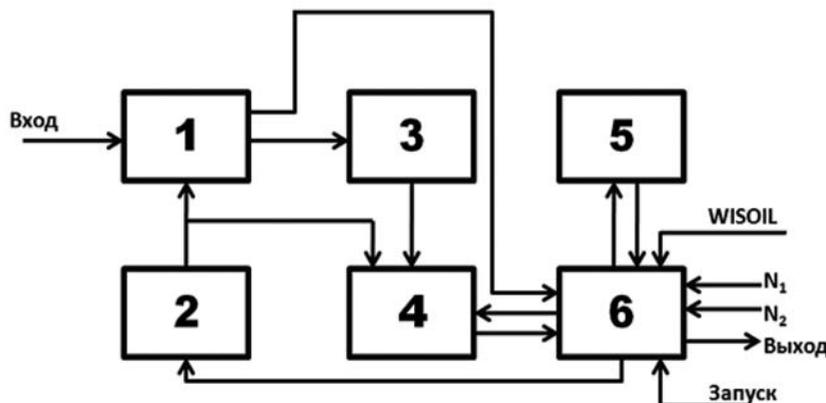


Рис. 2. Блок-схема гиперспектрального определителя береговой линии на основе жидкокристаллического фильтра:

- 1 — жидкокристаллический фильтр; 2 — генератор импульсов; 3 — фотодетектор;
- 4 — счетчик; 5 — GPS; 6 — блок управления; N_1, N_2 — внешне задаваемые коды

выходы фильтра поступают на вход фотодетектора 3, сформированные импульсы которого подсчитываются на счетчике 4. При достижении равенства кода счетчика с внешне заданным кодом (N_1) блок управления запоминает выходной оптический сигнал фильтра 1 и после повтора всей вышеописанной процедуры для внешне заданного кода N_2 вычисляет значение индекса WISOIL. При равенстве вычисленного значения индекса WISOIL с внешне заданной пороговой величиной WISOIL первый блок управления подает команду на блок 5, содержащий GPS и считанный сигнал географической координаты точки береговой линии поступает на выход всего устройства.

Так как устройство определения береговой линии устанавливается на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА), рассмотрим требование к скорости передвижения БПЛА.

Если время переключения каналов фильтра обозначить как ΔT , а количество спектральных каналов N то общее время T_0 вычисления индекса WISOIL в первом приближении оценим как

$$T_0 = 2N \cdot \Delta T \quad (5)$$

Далее, если обозначить скорость передвижения как v , а допустимую геометрическую погрешность определения береговой линии как ΔL , то запишем

$$T_0 \cdot v \leq \Delta L \quad (6)$$

С учетом (5) и (6) получим

$$2N \cdot \Delta t \cdot v \leq \Delta L \quad (7)$$

Из выражения (7) имеем

$$v \leq \frac{\Delta L}{2N \cdot \Delta t} \quad (8)$$

Таким образом, между v и N существует гиперболическая зависимость, т.е. может расти с ростом L и уменьшаться с уменьшением N и t .

Проанализируем информативность проводимых измерений. Рассмотрим следующее модельное представление проводимых измерений. Считаем, что поперек береговой линии $A_1 A_2$ проводятся измерения отраженной радиации на трассах длиной L_i , причем множество $L = \{L_i\}$; $I = I, n$; является упорядоченным, т.е.

$$\begin{aligned} L_i &= L_{i-1} + \Delta L; \\ \Delta L &= \text{const}; \\ L_0 &= 0 \end{aligned}$$

С учетом вышеприведенных допущений, выработанное количество информации в течении одного цикла измерений определим как

$$M = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \log \frac{U_{\max}}{\Delta U} \quad (9)$$

где $N_i = \frac{L_i}{\Delta L}$;

N_i — количество измерений на трассе длиной L_i .

U_{\max} — максимально возможный сигнал на входе измерителя

ΔU — квант сигнала.

Рассмотрим адаптивный режим измерений, когда между U и N_i вводится функциональная связь, т.е. существует функция

$$\Delta U_i = f(N_i) \quad (10)$$

Смысл функции (10) заключается в стремлении уменьшения избыточности вырабатываемой информации.

С учетом выражений (9) и (10) приняв ограничительное условие

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n f(N_i) &= C \\ C &= \text{const} \end{aligned} \quad (11)$$

Можно составить задачу дискретной вариационной оптимизации, целевой функционал которой будет иметь вид

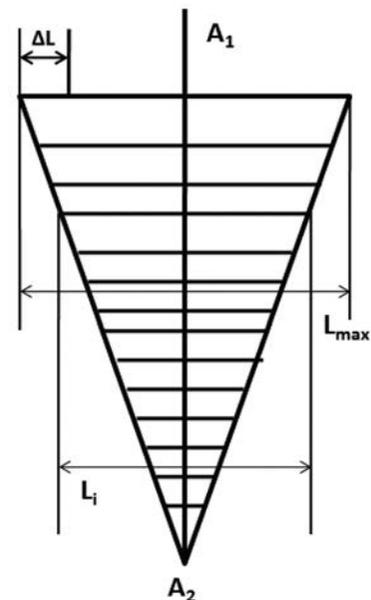


Рис. 3. Геометрическое представление рассматриваемой модели проводимых измерений

$$F_1 = \sum_{i=1}^n N_i \log \frac{U_{\max}}{f(N_i)} dN + \gamma \left[\sum_{i=1}^n f(N_i) - C \right] \quad (12)$$

Для удобства решения вышеуказанной задачи представим функционал (12) в непрерывном виде

$$F_2 = \int_0^{N_{\max}} N \cdot \log \frac{U_{\max}}{f(N)} dN + \gamma \left[\int_0^{N_{\max}} f(N) dN - C \right] \quad (13)$$

Решение оптимизационной задачи (13) по методу Эйлера-Лагранжа [11] получено в виде

$$f(N) = \frac{2CN}{N_{\max}^2} \quad (14)$$

При этом легко показать, что при условии (14) функционал (13) достигает минимума, т.е. задача уменьшения избыточности информации выполняется.

Прежде всего изложим предлагаемую модель оценки сигналов спутниковых спектрорадиометров. Считаем, что на исследуемую поверхность прибрежной зоны попадают две составляющие солнечной радиации:

1. $I_{\text{пр}}$ — прямая солнечная оптическая радиация.
2. $I_{\text{рас.н.п.}}$ — половина рассеянной солнечной оптической радиации, направленная в нижнюю полусферу (рис. 4).

При этом, в противоположном направлении излучается в космос вторая половина суммарной рассеянной радиации $I_{\text{рас.в.п.}}$. Таким образом, в зону береговой линии попадает суммарная радиация.

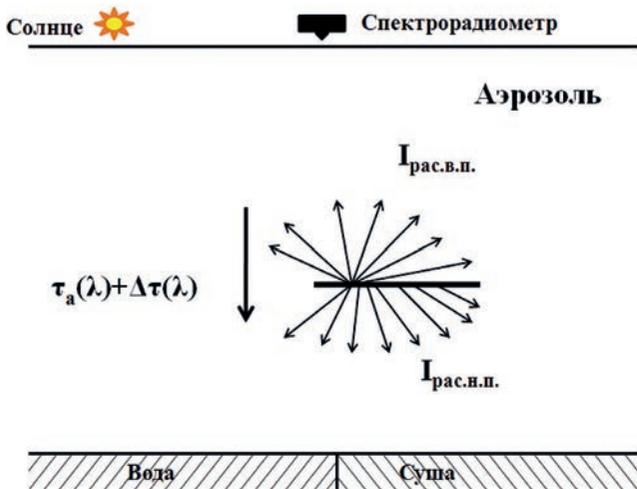


Рис. 4. Предлагаемая модель формирования входной оптической радиации спектрорадиометра

$$I_{\Sigma} = I_{\text{пр}} + I_{\text{рас.н.п.}} \quad (15)$$

Отражённая радиация может быть оценена как

$$I_{\text{отр}} = \alpha(\lambda)(I_{\text{пр}} + I_{\text{рас.н.п.}}) \quad (16)$$

где $\alpha(\lambda)$ — альбедо отражения в прибрежной зоне.

Так как $I_{\text{отр}}$ направлен в сторону спектрорадиометра, то на его вход поступает суммарная радиация F_0 , определяемая как

$$F_0 = \int_{\omega} \left[I_{\text{пр}} + \frac{I_{\text{рас.н.п.}}}{2} \right] \cdot \alpha(\lambda) + \frac{I_{\text{отр}}}{2} e^{-\tau_a(\lambda)} d\omega \quad (17)$$

где ω — угол обзора оптики спектрорадиометра.

$T(\lambda)$ — оптическая толщина атмосферного аэрозоля.

Хорошо известно, что спектрорадиометры, установленные на спутниках дистанционного зондирования осуществляют атмосферную коррекцию, включая аэрозольную коррекцию по собственному алгоритму. Вместе с тем, как было показано в работе [12], валидационные оценки с использованием данных AERONET показывают разность оптических толщин аэрозоля, измеренных с помощью спутника и AERONET, достигающую 0,1.

Таким образом, оптическую толщину атмосферного аэрозоля можно определить как

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{\text{а.н.}}(\lambda) + \tau_{\text{а.а.}}(\lambda) \quad (18)$$

где первая составляющая в (18) определяет корректируемую на борту часть оптической толщины аэрозоля, а вторая составляющая некорректируемую часть.

С учётом выражений (17) и (18) имеем

$$e^{-\tau_{\text{а.а.}}(\lambda)} \cdot \int_{\omega} \left[I_0 + \frac{I_{\text{рас.н.п.}}}{2} \right] \alpha(\lambda) + \frac{I_{\text{отр}}}{2} e^{-\tau_{\text{а.н.}}(\lambda)} d\omega \quad (19)$$

Выражение (19), в коротком виде напишем как

$$F_0(\lambda) = e^{-\tau_{\text{а.а.}}(\lambda)} \times F_1 \left[I_0, I_{\text{рас.н.п.}}, I_{\text{рас.в.п.}}, \tau_{\text{а.н.}}(\lambda) \right] e^{\tau_{\text{а.н.}}(\lambda)} \cdot F_1(\lambda) \quad (20)$$

где F_1 — суммарная оптическая радиация на входе спектрорадиометра при $\tau_{\text{а.а.}}(\lambda) = 0$.

С учётом модели (20), вышеупомянутое отношение b_2/b_5 , предложенное в [1] может быть оценено как

$$\frac{b_2}{b_5} = \frac{b_2(\lambda_2)}{b_5(\lambda_5)} = \frac{e^{-(\tau_{\text{а.а.}}(\lambda_2) - \tau_{\text{а.а.}}(\lambda_5))} \cdot F_1(\lambda_2)}{F_1(\lambda_5)} = \frac{C_0 \cdot F_1(\lambda_2)}{F_1(\lambda_5)} \quad (21)$$

Как видно из выражения (21), двухволновый метод, изложенный в [1], будет давать результат, зависящий от

$$\Delta\tau_{\text{a.a.}} = \tau_{\text{a.a.}}(\lambda_2) - \tau_{\text{a.a.}}(\lambda_3) \quad (22)$$

т.е. от случайной величины $\Delta\tau_{\text{a.a.}}$ ввиду случайного характера величины оптической толщины атмосферного аэрозоля.

С учётом вышеизложенного, нами предлагается многоволновый метод определения береговой линии в условиях сильного аэрозольного загрязнения.

Суть предлагаемого метода заключается в использовании известной трёхволновой методики [6–7] применительно к $b_2(\lambda_2)$ и $b_5(\lambda_5)$ для устранения влияния $\tau_{\text{a.a.}}(\lambda_2)$ и $\tau_{\text{a.a.}}(\lambda_5)$ соответственно. Согласно трёхволновой методике вводится промежуточный показатель γ , определяемый как

$$\gamma_1 = \frac{I_1(\lambda_1)^{K_1} \cdot I_3(\lambda_3)^{K_2}}{I_2(\lambda_2)} \quad (23)$$

где $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$;

$I_1(\lambda_1), I_2(\lambda_2), I_3(\lambda_3)$ — результаты спектрометрических измерений на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$;

K_1, K_2 — коэффициенты коррекции, вычисляемые с учётом модели Ангрстрема атмосферного аэрозоля в виде

$$\tau_a = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (24)$$

где β — показатель аэрозольной мутности атмосферы;

α — показатель Ангрстрема, а также аддитивной модели атмосферного аэрозоля в виде

$$\tau_a = \tau_{ac} + \tau_{af} \quad (25)$$

где τ_{ac} — оптическая плотность крупнодисперсной составляющей аэрозоля;

τ_{af} — оптическая плотность мелкодисперсной составляющей аэрозоля.

С учётом методики, заключённой в выражениях (23) — (25), введём промежуточный показатель $\gamma_1(b_2)$ применительно к b_2 , подобно (9). Имеем

$$\gamma_1(b_2) = \frac{\left[F_1(\lambda_2^+) \cdot e^{-\tau_{\text{a.a.}}(\lambda_2^+)} \right]^{K_{11}} \cdot \left[F_1(\lambda_2^-) \cdot e^{-\tau_{\text{a.a.}}(\lambda_2^-)} \right]^{K_{21}}}{F_1(\lambda_2) \cdot e^{-\tau_{\text{a.a.}}(\lambda_2)}} \quad (26)$$

где $\lambda_2^+ = \lambda_2 + \Delta\lambda$;

$\lambda_2^- = \lambda_2 - \Delta\lambda$;

$\Delta\lambda = \text{const}$.

Очевидно, что условия устранения влияния атмосферного аэрозоля в (26) имеем следующий вид

$$K_{11}\tau_{\text{a.a.}}(\lambda_2^+) + K_{21}\tau_{\text{a.a.}}(\lambda_2^-) = \tau_{\text{a.a.}}(\lambda_2) \quad (27)$$

С учётом выражений (24), (25), и (27) получим следующую систему уравнений для вычисления коэффициентов K_{11} и K_{21} .

$$K_{11} \cdot \lambda_2^{-\alpha_f} + K_{21} \cdot \lambda_2^{-\alpha_c} = \lambda_2^{-\alpha_f} \quad (28)$$

$$K_{11} \cdot \lambda_2^{-\alpha_c} + K_{21} \cdot \lambda_2^{-\alpha_c} = \lambda_2^{-\alpha_c} \quad (29)$$

где α_f, α_c — показатели Ангрстрема для мелкодисперсного и крупнодисперсного составляющих аэрозоля соответственно.

Очевидно, что вычисление K_1 и K_2 позволяет нам написать выражение (26) в виде

$$\gamma_1(b_2) = \frac{F_1(\lambda_{1^+})^{K_{11}} \cdot F_1(\lambda_{2^-})^{K_{21}}}{F_1(\lambda_2)} \quad (30)$$

Повторив все процедуры трёхволновой методики для $b_5(\lambda_5)$ получим

$$\gamma_1(b_5) = \frac{F_1(\lambda_{5^+})^{K_{12}} \cdot F_1(\lambda_{5^-})^{K_{22}}}{F_1(\lambda_5)} \quad (31)$$

С учётом (30) и (31) имеем

$$\chi = \frac{\gamma_1(b_5)}{\gamma(b_2)} = \frac{C_1 \cdot F_1(\lambda_2)}{F_1(\lambda_5)} \quad (32)$$

$$\text{где } C_1 = \frac{F_1(\lambda_{5^+})^{K_{12}} \cdot F_2(\lambda_{5^-})^{K_{22}}}{F_1(\lambda_{1^+})^{K_{11}} \cdot F_1(\lambda_{2^-})^{K_{21}}} \quad (33)$$

Сравнивая выражения (21) и (32), можно заметить их схожесть по форме, однако, существенное различие заключается в том, что C_0 является случайной величиной, а C_1 — детерминированной.

Возвращаясь к решаемой задаче определения береговой линии двухволновым методом, критерий, изложенный в работе [1], на основании выражения (32) можно переформулировать следующим образом: отношение $\frac{C_1 \cdot F_1(\lambda_2)}{F_1(\lambda_5)}$ применительно к водной среде больше, чем C_1 и меньше, чем C_1 для суши. Таким образом, проведённый анализ позволяет усовершенствовать известную двухволновую методику в смысле устранения влияния аномальных величин атмосферного аэрозоля.

Применительно к практическому использованию предлагаемого многоволнового метода отметим, что пока-



затели Ангстрема α_j и α_c могут изменяться с интервалом автокорреляции величиной одной сутки и даже меньше, что диктует необходимость проведения операций коррекции коэффициентов K_1 и K_2 . Для этой цели могут быть использованы данные всемирной сети AERONET, а также других региональных сетей измерения атмосферного аэрозоля.

Заключение

Сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. Отмечено, что основной недостаток спектрального метода определения береговой линии может быть устранено путем реализации измерений с применением разноформатных окон.
2. Отмечено, что в качестве границы вода-суша можно принять критерий, когда показатель SMC достигает величины 40%.
3. Рассмотрена возможность построения гиперспектральной измерительной системы на базе индекса WISOIL с применением управляемого жидкокристаллического фильтра.
4. Сформулировано требование к скорости передвижения носителя системы измерения.
5. Оптимизирован режим работы измерителя в смысле уменьшения избыточности информации путем введения адаптивного режима измерения.
6. Предложена модель оценки сигналов спутниковых спектрорадиометров для случая аномального загрязнения атмосферы аэрозолем.
7. На основе предложенной модели разработан многоволновый метод определения береговой линии, позволяющий устранить аэрозольную погрешность известного двухволнового метода.

Литература

1. *Alesheikh A.A., Ghorbanali A., Nouri N.* Coastline change detection using remote sensing // *International Journal of Science and Technology*. 2007. No. 4(1). Pp. 61–66.
2. *Guariglia A., Buonamassa A., Losurdo A., Saladina R., Trivigno M.L., Zaccagnino A., Colangelo A.* A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes // *Annals of Geophysics*. 2006. Vol. 49. No. 1. Pp. 295–304.
3. *Winarso G., Budhiman S.* The potential application of remote sensing data for coastal study // *Proc. 22nd Asian Conference on Remote Sensing (Singapore, 5–9 November 2001)*. 2001. No. 16 (1). Pp. 111–124. URL: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001> (дата обращения 25.03.2019)
4. *Chen L. C., Rau J. Y.* Detection of shoreline changes for tideland areas using multi-temporal satellite images // *Int. J. Remote Sens.* 1998. No. 19(10). Pp. 3383–3397.
5. *Fabre S., Briottet X., Lesaignoux A.* Estimation of Soil

Moisture Content from the Spectral Reflectance of Bare Soils in the 0.4–2.5 μ m Domain // *Sensors*. 2015. No. 15. Pp. 3262–3281. doi:10.3390/s150203262

6. *Asadov H. H., Isayev A. A.* Three waves methods for measurements of total content of ozone. Full Compensation of measurements error // *Proceedings of the XX Quadrennial Ozone Symposium*. (1–8 June, 2004, Kos, Greece). 2004. Vol. 1. Pp. 477–485.
7. *Асадов Х.Г., Исаев А.А.* Общая теория трехволновых озонметрических измерений // *Измерительная техника*. 2005. № 8. С. 66–68.
8. *Méndez Alves MV.* Detection of physical shoreline indicators in an object based classification approach. Study case: Island of Schiermonnikoog, The Netherlands: abstract. 2007. 53p. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/67d3/010222e193928e27a120167cf491f6894c3f.pdf>. (дата обращения 25.03.2019)
9. *Su L., Gibeaut J.* Using UAS Hyperspatial RGB Imagery for Identifying Beach Zones along the South Texas Coast // *Remote Sens.* 2017. No. 9. URL: www.mdpi.com/journal/remotesensing. (дата обращения 25.03.2019).
10. *Lesaignoux A., Fabre S., Briottet X.* Influence of soil moisture content on spectral reflectance of bare soils in the 0.4–14 μ m domain // *Int. J. Remote Sens.* 2013. No. 34. Pp. 2268–2285.
11. *Эльскольц Л.Е.* Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М. Наука, 1974. 432 с.
12. *Pflug B., Main-Knorn M., Makarav A., Richter R.* Validation of aerosol estimation in atmospheric correction algorithm ARCOR // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment (11–15 May 2015, Berlin, Germany)*. 2015. Vol. XL-7/W3. Pp. 677–683. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-7-W3/677/2015/> (дата обращения 25.03.2019).
13. *Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornblüeh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U., Tompkins A.* The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description. Report No. 349, 354. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 2003. 127 p.
14. *Walker W.A., Garder C.* Comparison of ISCCP and other cloud amounts // *J. Climate*. 1993. No. 6. Pp. 2394–2418.
15. *Schaaf C. B., Gao F., Strahler A. H., Lucht W. L., Li X., Tang T., Strucknell N. C., Zhang X., Jin Y., Mueller J.-P., Lewis P., Barnsley M., Hobson P., Disney M., Roberts G., Dunderdale M., Doll C., D'entremont R. P., Hu B., Liang S., Privette J. L., Roy D.* First observational BRDF, albedo and nadir reflectance from MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 2002. No. 83. Pp. 135–148. Doi:10.1016/s0034-4257(02)00091-3



METHODS FOR DETERMINATION OF MARITIME COASTLINE USING ABOARD MULTICHANNEL MEASURING SYSTEM

ABDULLAYEVA LYATIFA DJAFARAGA KIZI,

Baku, Azerbaijan, latifa.abdullayeva@mail.ru

ABSTRACT

The work is devoted to questions of coastline determination using aboard measuring systems. It is noted that major drawback of spectral method for determination of coastline can be removed by realization of windows of different sizes. It is shown that as a border between water and soil media criterion stating that the water content of the soil at the border should reach 40% may be adopted. The feasibility for development of hyperspectral measuring system on the basis of WISOIL index by utilization of controlled liquid crystalline filter is considered. The requirement for speed of movement of carrier of measuring system is formulated. The operation regime of measuring instrument is optimized in direction of decrease of information exorbitance by way of use of adaptive measuring regime. Questions on development of multiwave method of remote determination of coastline in condition of heavy aerosol pollution of atmosphere are analyzed. The model for assessment of signals of satellites spectroradiometers in condition of abnormal aerosol pollution of atmosphere is suggested. On the suggested model the multiwave method for determination of coastline is developed which makes it possible to remove the aerosol error of known two wavelength method.

REFERENCES

1. Alesheikh A.A., Ghorbanali A., Nouri N. Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Science and Technology*. 2007. No. 4(1). Pp. 61-66.
2. Guariglia A., Buonamassa A., Losurdo A., Saladina R., Trivigno M.L., Zaccagnino A., Colangelo A. A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes. *Annals of Geophysics*. 2006. Vol. 49. No. 1. Pp. 295-304.
3. Winarso G., Budhiman S. The potential application of remote sensing data for coastal study. *Proc. 22nd Asian Conference on Remote Sensing (Singapore, 5-9 November 2001)*. 2001. No. 16 (1). Pp. 111-124. URL: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001> (date of access 25.03.2019)
4. Chen L.C., Rau J.Y. Detection of shoreline changes for tideland areas using multi-temporal satellite images. *Int. J. Remote Sens.* 1998. No. 19(10). Pp. 3383-3397.
5. Fabre S., Briottet X., Lesaignoux A. Estimation of Soil Moisture Content from the Spectral Reflectance of Bare Soils in the 0.4-2.5 μ m Domain. *Sensors*. 2015. No. 15. Pp. 3262-3281. Doi:10.3390/s150203262
6. Asadov H.H., Isayev A.A. Three waves methods for measurements of total content of ozone. Full Compensation of measurements error. *Proceedings of the XX Quadrennial Ozone Symposium. (1-8 June, 2004, Kos, Greece)*. 2004. Vol. 1. Pp. 477-485.

KEYWORDS: coastline; measuring system; hyperspectrometer; liquid crystalline filter; informativity; optimization.

7. Asadov Kh.G., Isaev A.A. Obschchaya teoriya trekhvolnovykh ozonometricheskikh izmereniy [General theory of three-wave ozonometric measurements]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique]. 2005. No. 8. Pp. 66-68. (In Russian)
8. Méndez Alves MV. *Detection of physical shoreline indicators in an object based classification approach. Study case: Island of Schiermonnikoog, The Netherlands: abstract*. 2007. 53 p. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/67d3/010222e193928e27a120167cf491f6894c3f.pdf>. (date of access 25.03.2019)
9. Su L., Gibeaut J. Using UAS HyperspatialRGB Imagery for Identifying Beach Zones along the South Texas Coast. *Remote Sens.* 2017. No. 9. URL: www.mdpi.com/journal/remotesensing. (date of access 25.03.2019)
10. Lesaignoux A., Fabre S., Briottet X. Influence of soil moisture content on spectral reflectance of bare soils in the 0.4-14 μ m domain. *Int. J. Remote Sens.* 2013. No. 34. Pp. 2268-2285.
11. El'skol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* [Differential equations and calculus of variations]. Moscow: Nauka, 1974. 432 p. (In Russian)
12. Pflug B., Main-Knorn M., Makarav A., Richter R. Validation of aerosol estimation in atmospheric correction algorithm ARCOR. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment (11-15 May 2015, Berlin, Germany)*. 2015. Vol. XL-7/W3. Pp. 677-683. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-7-W3/677/2015/> (date of access 25.03.2019)
13. Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornblüeh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U., Tompkins A. *The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description*. Report No. 349. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 2003. 127 p.
14. Walker W.A., Garder C. Comparison of ISCCP and other cloud amounts. *J. Climate*. 1993. No. 6. Pp. 2394-2418.
15. Schaaf C.B., Gao F., Strahler A.H., Lucht W.L., Li X., Trang T., Stricknell N.C., Zhang X., Jin Y., Mueller J.-P., Lewis P., Barnsley M., Hobson P., Disney M., Roberts G., Dunderdale M., Doll C., D'entremont R. P., Hu B., Liang S., Privette J.L., Roy D. First observational BRDF, albedo and nadir reflectance from MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 2002. No. 83. Pp. 135-148. Doi:10.1016/s0034-4257(02)00091-3

INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Abdullayeva L.Dj., leading scientific collaborator of the National Aerospace Agency.



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10271

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ОБЩЕГО КОЛИЧЕСТВА ВОДЯНЫХ ПАРОВ В АТМОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОМЕТРОВ

АСАДОВ

Хикмет Гамид оглы¹

МАМЕДОВА

Улькер Физули гызы²

АННОТАЦИЯ

Общеизвестно, что одним из основных факторов, вызывающих климатические изменения на земле являются водяные пары, двуокись углерода и метан. Из-за наличия наличия у водяных паров сильных полос поглощения в близком инфракрасном и инфракрасном диапазонах, информативность спутниковой информации дистанционного зондирования земли сильно ограничивается. Вышеуказанное обуславливает насущную актуальность точной оценки общего количества водяных паров в атмосфере. Солнечный фотометр является одним из основных измерительных инструментов, используемых в настоящее время для измерения общего количества водяных паров в атмосфере. Работа посвящена предлагаемому новому методу измерения общего количества водяных паров в атмосфере с помощью солнечных фотометров. Измерение осуществляется на длине волны 940 нм. Погрешность аналогичных измерений в настоящее время достигает 5÷10 процентов, при этом одним из основных причин относительно небольшой точности таких измерений является влияние атмосферного аэрозоля. Для устранения указанного влияния широко применяется метод измерения оптической толщины аэрозоля на такой длине волны, где водяные пары не имеют полосы поглощения. Далее осуществляется экстраполяция полученного результата на длину волны 940 нм. Как результат, удается несколько повысить точность проводимых измерений. Однако гидрофизические свойства аэрозоля не позволяют полностью устранить указанную проблему. Различие временных масштабов увлажнения указанных компонентов аэрозоля не позволяет устранить влияние аэрозоля известными методами. На основе известного трехволнового метода солнечно-фотометрических измерений с корректирующими коэффициентами предложен новый трехволновый метод измерения водяных паров с практически полной компенсацией воздействия аэрозоля. Составлена методика проведения трехволновых скорректированных измерений общего количества водяных паров в атмосфере.

Сведения об авторах:

¹д.т.н., профессор, Научно-исследовательский институт Аэрокосмической информатики, г. Баку, Азербайджан, asadzade@rambler.ru

²аспирант Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджан, ulker-qasimova@bk.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: солнечный фотометр; водяные пары; измерения; атмосфера; длина волны.

Для цитирования: Асадов Х.Г., Мамедова У.Ф. Новый метод измерения общего количества водяных паров в атмосфере с помощью солнечных фотометров// Научное издание «Информатика, компьютерная инженерия и контроль». 2019. Т. 11. № 3. С. 81-88. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10271

Введение

Хорошо известно, что общий радиационный баланс Земли определяет ее климат и земная атмосфера выступает в качестве связывающего звена во взаимодействии космос — Земля в радиационном плане. Энергия Солнца значительно поглощается различными составляющими земной атмосферы [1–3]. Однако роль атмосферы в радиационном балансе этим не ограничивается. Атмосфера также противодействует прохождению собственного инфракрасного излучения Земли в космос. Двойственная роль атмосферы — основная причина шаткости того кажущегося равновесия в радиационном балансе Земли, которая легко может быть нарушена, или, скорее всего, уже нарушена бесконтрольным антропогенным фактором. Нарушение радиационного баланса Земли скорее всего выражается в климатических изменениях, происходящих на планете. Основными парниковыми газами, способствующими климатическим изменениям на Земле являются водяные пары, двуокись углерода и метан [4–6]. Точная оценка содержания указанных компонентов атмосферы по этой причине имеет важное значение. Будучи парниковым газом, водяные пары участвуют в формировании аэрозоля, что также подчеркивает важность и значимость исследования этого фактора. Вместе с тем, водяные пары активно влияют на рефрактивность тропосферы и тем самым, вызывая неоднородное свойство рефрактивности тропосферы, приводит к появлению специфической погрешности учета времени прохождения электромагнитных волн в геодезических измерительных приборах и сетях [7–9]. Водяные пары в атмосфере часто характеризуются таким параметром как «суммарная толщина осаждаемой воды», которая определяется толщиной эквивалентной водяной массы получаемой из суммарного количества водяных паров, имеющихся в атмосферном столбе с поперечным сечением 1 м^2 [10].

Наиболее широко используемыми методами измерения суммарного количества водяных паров являются:

1. Измерение с помощью микроволновых радиометров в гигагерцевом диапазоне (31,4 ГГц; 23,8 ГГц).
2. Измерение с помощью солнечных фотометров (на длинах волн 0,82 мкм и 0,94 мкм).
3. Измерения с помощью GPS систем.

При использовании солнечных фотометров для измерения общего количества водяных паров в атмосфере пользуются математическим выражением, частично включающим в себя закон Бугера-Бера [10]

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0 \cdot e^{-(C_1+C_2+C_3)m} \cdot T_{\lambda_i}, \quad (1)$$

где E_{λ}^0 - и E_{λ} - спектральная радиация на заданной длине волны λ , вне атмосферы и после прохождения через атмосферу с оптической массой m ;

- C_1 — оптическая толщина релеевского рассеяния;
- C_2 — оптическая толщина атмосферного аэрозоля;

C_3 — оптическая толщина атмосферного озона.

Оптическая воздушная масса m определяется как секанс зенитного угла z Солнца ($z \leq 62^\circ$); T_{λ_i} - коэффициент пропускания атмосферы, учитывающий наличие молекулярных полос водяных паров. Согласно [10], T_{λ_i} может быть представлен в следующих трех модельных формах:

$$T_{\lambda_1} = e^{-C_4(Wm)^{1/2}}, \quad (2)$$

$$T_{\lambda_2} = e^{-C_5 Wm}, \quad (3)$$

$$T_{\lambda_3} = 1 - C_6 m^{1/2}, \quad (4)$$

где m — оптическая масса водяного пара; W — количество осаждаемой воды в мм; C_4 , C_5 и C_6 — эмпирически определяемые постоянные.

Коэффициент T_{λ_1} применяется для сильных полос поглощения водяных паров. Коэффициент T_{λ_2} применяется для слабых молекулярных полос поглощения, а также для случаев малых оптических толщин. Коэффициент T_{λ_3} применяется на тех длинах волн, в которых поглощение водяных паров несущественно, однако имеет место некоторое поглощение солнечной радиации такими газами, как CO_4 , O_3 и O_2 .

Обнаруженный в 2000-м году факт наличия ошибок в широко используемой модели HITRAN96 по части интенсивностей линий поглощения H_2O стимулировали дальнейшие исследования в области модельных представлений влияния водяных паров на пропускание атмосферы. Вместе с тем, модель (2) будучи всеобщее признанной моделью, привела к появлению множества расчетных методик, номограмм, таблиц и графиков, которые облегчают расчеты по этой модели. Кроме того, измерительные приборы, и в частности солнечные фотометры, измеряющие суммарное количество водяных паров откалиброваны с учетом именно модели (2). Производственная и хозяйственная деятельность человека в масштабе всей планеты является одним из основных причин роста общего количества водных паров в атмосфере, что диктует необходимость организации постоянного контроля над этим важнейшим факторам радиационного баланса Земли. Очевидно, что для правильного прогнозирования радиационного баланса Земли должны быть разработаны более точные методы измерения паров воды. Общее количество водяных паров в глобальном масштабе измеряются с помощью спутниковых приборов (MODIS, TOVS и др.), точность измерения которых составляет 10–15%. В этом контексте существенно важно наличие точных наземных фотометрических средств в целях валидации и калибровки спутниковых измерительных приборов.



Следует отметить, что в научной литературе наиболее часто используется следующая модель оптической толщины водяных паров в атмосфере:

$$\tau_{H_2O} = c(m^d W^d), \quad (5)$$

где c и d являются коэффициентами, зависящими от длины волны и показателей оптического тракта солнечного фотометра, вертикального распределения водяных паров, температуры и давления в атмосфере.

Вместе с тем, имеется другая, немаловажная причина для организации широкомасштабных наземных измерений водяных паров в атмосфере, заключающаяся в наличии у водяных паров сильных полос поглощения в близком инфракрасном и инфракрасном диапазонах, существенно ограничивающих информативность спутниковой информации дистанционного зондирования Земли.

Одним из основных измерительных инструментов, используемых в настоящее время для измерения общего количества водяных паров является солнечный фотометр. Солнечно-фотометрическим измерениям водяных паров в атмосфере посвящено большое количество работ [10–15]. На рис. 1. показаны графики пропускания атмосферы на спектральном диапазоне 700÷1000 нм [10].

Как видно из графиков, представленных на рис. 1, водяные пары имеют полосы поглощения на длинах волн ≈ 720 нм; 815 нм и 940 нм. При этом полоса поглощения на длине волны 940 нм является наиболее сильной и широкой.

Как указывается в работе [11], пропускание атмосферы на длине волны 940 нм определяется как

$$T_{am} = e^{-m_0(\tau_R + \tau_a)} \cdot T \quad (6)$$

где m_0 — относительная оптическая масса воздуха;
 τ_a — оптическая толщина аэрозоля;
 τ_R — оптическая толщина Релеевского рассеяния;
 T — пропускание водяных паров, определяемое как

$$T_{am} = e^{-a(mW)^b} \quad (7)$$

где m — оптическая воздушная масса водяных паров;
 W — общее содержание водяных паров;
 a, b — постоянные коэффициенты для выбранной длины.

При этом оптическая толщина аэрозоля измеряется используя формулу Ангстрема

$$\tau_a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (8)$$

где α — показатель Ангстрема; β — показатель мутности атмосферы.

Как было отмечено выше, для проведения измерений оптической толщины атмосферы широко применяются солнечные фотометры. В качестве примера на рис. 2. приведена графическая схема конструкции солнечного фотометра типа ЕКО MS-115 японской фирмы Eko Instruments Co., Tokyo [12].

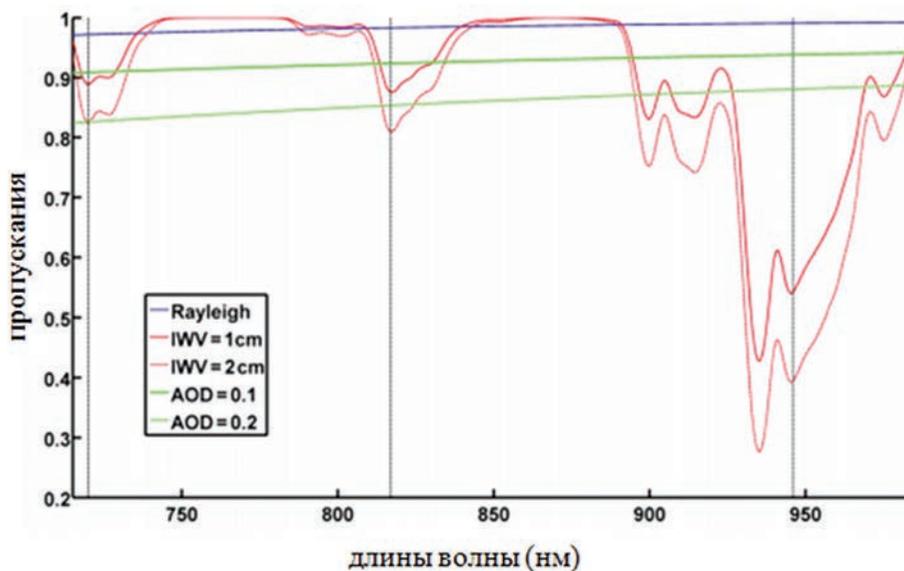


Рис. 2. Графики пропускания атмосферы в диапазоне 700÷1000 нм:
 1 — Пропускание атмосферы при общем количестве водяных паров (ОВП) равном 1 см и при оптической толщине аэрозоля (ОТА) равной 0,1;
 2 — при ОВП = 2 см; ОТА = 0,2 (Значения ОТА приведены для длины волны 700 нм)

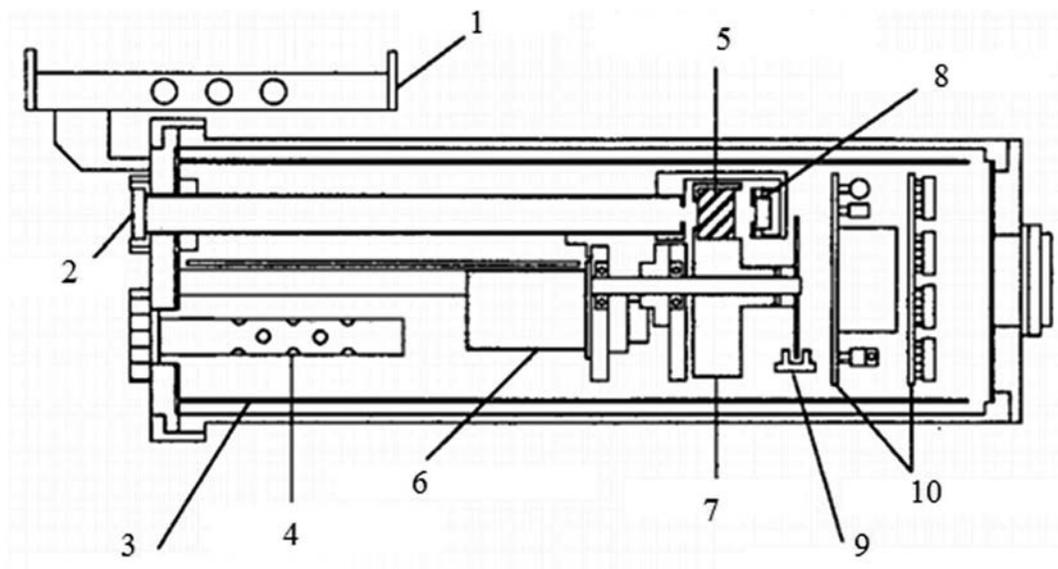


Рис. 2. Схематическое изображение солнечного фотометра MS-115: 1 — узел наведения; 2 — апертура; 3 — цилиндрический нагреватель; 4 — контейнер с силикагелем; 5 — интерференционный фильтр; 6 — двигатель; 7 — фильтры установленные на крутящемся колесе; 8 — фотодиод; 9 — сенсор положения фильтра; 10 — узлы электроники

Измерение ОВП с помощью солнечных фотометров в основном осуществляется на длине волны 940 нм. Особенности проведения измерений ОВП на длине волны 940 нм наиболее подробно изложены в работе [13].

Анализ, проведенный в работе [13], показывает, что в настоящее время погрешность измерения ОВП с помощью солнечных фотометров на длине волны 940 нм составляет 5÷10 процентов. Основной причиной относительно небольшой точности таких измерений на наш взгляд является влияние атмосферного аэрозоля. Для учета влияния аэрозоля на практике широко применяется метод измерения оптической толщины на такой длине волны, где полоса поглощения водяных паров отсутствует. Далее осуществляется экстраполяция полученного результата на длину волны 940 нм используя формулу Ангстрема (3). Такой метод дает возможность повысить точность проводимых измерений, однако физико-оптические свойства аэрозоля не позволяют полностью устранить указанную проблему. Дело в том, что по временному масштабу увлажнения аэрозоли делятся на гидрофобные и гидрофильные. Гидрофобным аэрозолям относят твердые минеральные частицы, увлажнение которых может длиться сутками (Black carbon и др.). Гидрофильные аэрозольные частицы способны увлажняться в течение нескольких минут, при этом процесс увлажнения оказывается нелинейным физическим процессом. Согласно результатам экспериментальных исследований, проведенных в [14], в начальные моменты резкого изменения ОВП в атмосфере наблюдается отрицательная корреляция между ОВП

и ОТА (рис. 3 [14]). Такой эффект может быть объяснен почти мгновенным увлажнением гидрофильного аэрозоля, приводящего к некоторому снижению ОВП. Однако, после увлажнения гидрофильных составляющих аэрозоля наблюдается положительная корреляция между ОВП и ОТА. Указанные процессы в конечном счете ограничивают точность оценки ОВП при проведении одноволновых измерений на длине волны 940 нм из — за неопределенности в установлении знака вышеуказанной корреляции. В качестве выхода из создавшегося положения нами предлагается использовать новую модификацию трехволнового метода измерения с корректирующими коэффициентами, впервые изложенного в работе [15].

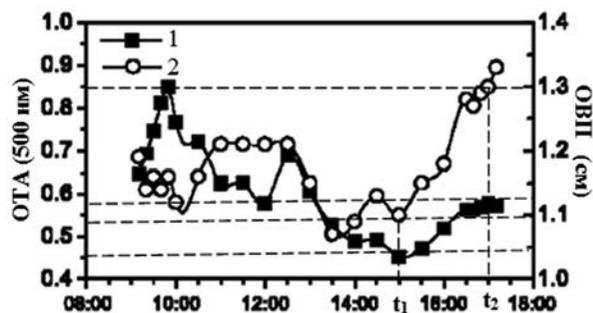


Рис. 3. Временная взаимосвязь изменения ОВП и ОТА:
 1 — временное изменение ОТА;
 2 — временное изменение ОВП

Дадим краткое изложение трехволнового метода солнечно — фотометрических измерений с корректирующими коэффициентами, изложенного в [15]. В этом методе, в частности, при проведении измерений малых газовых составляющих ставится задача устранения влияния аэрозоля на результат измерений. Допустим, что проводятся измерения на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, где λ_2 являясь центральной длиной волны совпадает с длиной волны поглощения исследуемого газа. Результаты измерений обозначим следующим образом:

$$T(\lambda_1) = \exp[-(m_1 \tau_a(\lambda_1) + m_2 \tau_q(\lambda_1))] \quad (9)$$

$$T(\lambda_2) = \exp[-(m_1 \tau_a(\lambda_2) + m_2 \tau_q(\lambda_2))] \quad (10)$$

$$T(\lambda_3) = \exp[-(m_1 \tau_a(\lambda_3) + m_2 \tau_q(\lambda_3))] \quad (11)$$

где $T(\lambda_i), i = \overline{1,3}$ — пропускание атмосферы на длине волны λ_i , m_1, m_2 — оптическая масса аэрозоля и газа;

$\tau_q(\lambda_i)$ — оптическая толщина исследуемого газа на длине волны λ_i ;

$\tau_a(\lambda_i)$ — оптическая толщина аэрозоля на той же длине волны.

Далее вводится на рассмотрение относительный показатель γ , определяемый как

$$\gamma = \frac{T(\lambda_1)^{k_1} \cdot T(\lambda_1)^{k_2}}{T(\lambda_2)} \quad (12)$$

С учетом (9) — (11), и (12) имеем

$$\gamma = \frac{\exp[-(k_1 m_1 \tau_a(\lambda_1) + k_1 m_2 \tau_q(\lambda_1) + k_2 m_1 \tau_a(\lambda_3) + k_2 m_2 \tau_q(\lambda_3))]}{\exp[-(m_1 \tau_a(\lambda_2) + m_2 \tau_q(\lambda_2))]} \quad (13)$$

Условие устранения влияния аэрозоля на величину γ имеет вид

$$k_1 m_1 \tau_a(\lambda_1) + k_1 m_2 \tau_q(\lambda_1) = m_1 \tau_a(\lambda_2) \quad (14)$$

Далее оптическая толщина аэрозоля представляется в виде суммы оптических толщин крупнодисперсного $\tau_c(\lambda)$ и мелкодисперсного $\tau_f(\lambda)$ аэрозоля, т.е.

$$\tau_a(\lambda_i) = \tau_c(\lambda_i) + \tau_f(\lambda_i) \quad (15)$$

При

$$\tau_c(\lambda_i) = \beta_d \lambda_i^{-\alpha_d} \quad (16)$$

$$\tau_f(\lambda_i) = \beta_f \lambda_i^{-\alpha_f} \quad (17)$$

где β_c, β_f — мутность атмосферы соответственного для крупнодисперсного аэрозоля и мелкодисперсного аэрозоля;

α_c, α_f — показатели Ангстрема для крупнодисперсного аэрозоля и мелкодисперсного аэрозоля.

С учетом (15)-(17) нетрудно получить следующую систему уравнений

$$k_1 \lambda_1^{-\alpha_d} + k_2 \lambda_3^{-\alpha_d} = \lambda_2^{-\alpha_d} \quad (18)$$

$$k_1 \lambda_1^{-\alpha_f} + k_2 \lambda_3^{-\alpha_f} = \lambda_2^{-\alpha_f} \quad (19)$$

Решение системы уравнений (18), (19) относительно k_1 и k_2 и учет полученных значений γ в (13) при условии $\tau_q(\lambda_1) = \tau_q(\lambda_3) = 0$ позволяет вычислить искомую величину $\tau_q(\lambda_2)$.

Рассмотрим предлагаемое усовершенствование вышеизложенного трехволнового метода, изложенного в [7].

В предлагаемом варианте трехволнового метода измерений с корректирующими коэффициентами центральной длина волны λ_5 выбирается равной 940 нм.

В этом случае, аналогично (12) напомним

$$\gamma_1 = \frac{T_1(\lambda_4)^{k_3} \cdot T_1(\lambda_6)^{k_4}}{T_1(\lambda_5)} \quad (20)$$

где $T_1(\lambda_4)$ — пропускание атмосферы на длине волны $\lambda_5 - \Delta\lambda$;

$T_1(\lambda_6)$ — пропускание атмосферы на длине волны $\lambda_5 + \Delta\lambda$.

При этом $\lambda_4 = \lambda_5 - \Delta\lambda$; $\lambda_6 = \lambda_5 + \Delta\lambda$.

Величина $\Delta\lambda$ выбирается таким образом, чтобы полоса поглощения водяных паров на центральной длине волны 940 нм не охватывала длины волн λ_4 и λ_6 .

Пропускания атмосферы на длинах волн $\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ определяются следующим образом:

$$T(\lambda_4) = \exp[-(m_1 \tau_a(\lambda_4))] \quad (21)$$

$$T(\lambda_6) = \exp[-(m_1 \tau_a(\lambda_6))] \quad (22)$$

$$T(\lambda_5) = \exp[-(m_1 \tau_a(\lambda_5) + \tau_w(\lambda_5))] \quad (23)$$

где $\tau_w(\lambda_5)$ — оптическая толщина водяных паров на длине волны λ_5 .

Вставив выражения (21)-(23) в формулу (20) получим следующее условие устранения влияния аэрозоля на вычисленную величину γ_1 .

$$k_3 \tau_a(\lambda_4) + k_4 \tau_a(\lambda_6) = \tau_a(\lambda_5) \quad (24)$$

Допустим, что во временные моменты t_1 и t_2 известны значения $\tau_w(\lambda_5, t_1)$ и $\tau_w(\lambda_5, t_2)$, где $\tau_w(\lambda_5, t_2) > \tau_w(\lambda_5, t_1)$. С учетом (3), а также (15)÷(19) условие компенсации влияния аэрозоля на вычисленную величину γ , в момент t_1 имеет вид

$$k_3 \lambda_4^{-\alpha(t_1)} + k_4 \lambda_6^{-\alpha(t_1)} = \lambda_5^{-\alpha(t_1)} \quad (26)$$

Запишем аналогичное условие для момента t_2

$$k_3 \lambda_4^{-\alpha(t_2)} + k_4 \lambda_6^{-\alpha(t_2)} = \lambda_5^{-\alpha(t_2)} \quad (27)$$

При известных значениях $\alpha(t_1)$ и $\alpha(t_2)$, и выбранных длин волн значения корректирующих коэффициентов k_3 и k_4 могут быть вычислены путем решения системы уравнений (26), (27).

Вставляя вычисленные значения k_3 и k_4 в выражение (20) для временных моментов t_1 и t_2 получим:

$$\gamma_1(t_1) = \frac{1}{\exp[-(\tau_w(\lambda_5, t_1))]} \quad (28)$$

$$\gamma_1(t_2) = \frac{1}{\exp[-(\tau_w(\lambda_5, t_2))]} \quad (29)$$

где $\gamma_1(t_1)$, $\gamma_1(t_2)$ — значения параметра γ_1 в моменты t_1 и t_2 соответственно.

Далее с учетом модели оптической толщины водяных паров в атмосфере в виде

$$\tau_w = a(m \cdot W)^b \quad (30)$$

из выражений (28) и (30) получим

$$W_1 = \frac{1}{m} \cdot \sqrt[b]{\frac{\ln \gamma_1(t_1)}{a}} \quad (31)$$

Соответственно (31) для временного момента t_2 получим

$$W_2 = \frac{1}{m} \cdot \sqrt[b]{\frac{\ln \gamma_1(t_2)}{a}} \quad (32)$$

Таким образом, в результате проведения в моменты t_1 и t_2 трехволновых измерений, а также при наличии информации о значениях $\alpha(t_1)$ и $\alpha(t_2)$ появляется возможность определить общее содержание водяных паров в атмосфере W_1 и W_2 путем предварительного вычисления вводимых корректирующих коэффициентов.

С учетом вышеизложенного можно предложить следующую методику определения ОВП:

1. Проводятся солнечно — фотометрические измерения на трех длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, где $\lambda_2 = 940$ нм; λ_1 и λ_3 выбираются такими, чтобы полоса поглощения водяных паров на центральной длине волны 940 нм не охватывала эти длины волн. Указанные измерения проводятся во временные моменты t_1 и t_2 ; $t_2 = t_1 + \Delta t$. При этом в промежутке Δt показатель ОВП должен значительно измениться.

2. Составляется система уравнений, подобно выражениям (26), (27). Вычисляются корректирующие коэффициенты путем решения составленной системы уравнений.

3. Общее количества водяных паров в атмосфере в моменты t_1 и t_2 вычисляются по формулам (31) и (32).

Заключение

В заключение сформулируем основные выводы проведенного исследования:

1. Показан основной недостаток существующих методов солнечно-фотометрических методов измерения общего содержания водяных паров в атмосфере.

2. На основе известного трехволнового метода солнечно-фотометрических измерений водяных паров в атмосфере с корректирующими коэффициентами предложен новый усовершенствованный трехволновый метод измерения водяных паров.

3. Составлена методика реализации предложенного усовершенствованного трехволнового метода скорректированных измерений общего количества водяных паров в атмосфере.

Литература

1. Adler R. F., Huffman G. J., Chang A., Ferraro R., Xie P., Janowiak J., Rudolf B., Schneider U., Curtis S., Bolvin D., Gruber A., Susskind J., Arkin P., Nelkin E. J. The Version 2.1 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present) // J. Hydrometeor. 2003. No. 4(6). Pp. 1147–1167.
2. Bentamy A., Katsaros K. B., Mestas-Nuñez A. M., Drennan W. M., Forde E. B., Roquet H. Satellite estimates of wind speed and latent heat flux over the global oceans // J. Climate. 2003. No.16. Pp. 637–656.
3. Bony S., Sud Y., Lau K. M., Susskind J., Saha S. Comparison and satellite assessment of NASA/ DOA and NCEP–NCAR reanalyses over tropical ocean: Atmospheric hydrology and radiation // J. Climate. 1997. No.10. Pp. 1441–1462.
4. Kustermann B., Kainz M., Hulsbergen K. Modeling carbon cycles and estimation of greenhouse gas emissions from organic and conventional farming systems // Renewable Agriculture and Food Systems. 2007. No. 23(1). Pp. 38–52.
5. Sweetapple C., Fu G., Butler D. Identifying key sources of uncertainty in the modelling of greenhouse gas emis-



sions from wastewater treatment // *Water Res.* 2013. No. 47. Pp. 4652–4665.

6. Goraj W., Kuźniar A., Urban D., Pietrzykowska K., Stępniewska Z. Influence of plant composition on methane emission from Moszne peatland // *J Ecol Eng.* 2013. No. 14. Pp. 53–57.

7. Kursinski E. R., Hajj G. A., Leroy S. S., Herman B. The GPS radio occultation technique // *Terr. Atmos. Oceanic Sci.* 2000. No. 11. Pp. 53–114.

8. Lee L. C., Rocken C., Kursinski R. (Eds.). Applications of Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate. Hong Kong; Berlin Heidelberg: SpringerVerlag, 2001. 384 p.

9. MacDonald A.E., Xie Y.-F., Ware R. H. Diagnosis of three-dimensional water vapor using slant observations from a GPS network // *Monthly Weather Review.* 2002. No. 130. Pp. 386–397.

10. Raptis P. I., Kazadzis S., Gröbner S. K., Kouremeti N., Doppler L., Becker R. Helmis C. Water vapour retrieval using the Precision Solar Spectroradiometer // *Atmospheric Measurement Techniques.* 2018. Vol. 11. No. 1. Pp. 1143–1157. Doi:10.5194/amt-11-1143-2018.

11. Campanelli M., Mascitelli A., Sano P., Diemoz H., Estelles V., Federico S., Iannarelli A.-M., Fratarcangeli F., Mazzoni A., Realini E., Crespi M., Bock O., Martinez-Lozano

A., Dietrich S. Precipitable water vapour content from ESR/SKYNET sun-sky radiometers: validation against GNSS/GPS and AERONET over three different sites in Europe // *Atmospheric Measurement Techniques.* 2018. Vol. 11. No. 1. Pp. 81–94. Doi:10.5194/amt-11-81-2018.

12. Shiobara M., Spinhirne J. D., Uchiyama A., Asano S. Optical Depth measurements of aerosol, cloud, and water vapor using sun photometers during FIRE cirrus IFO II // *Journal of Applied Meteorology.* 1996. Vol. 35. No. 2. Pp. 36–46. Doi:10.1175/1520-0450(1996)035<0036: odmoac>2.0.co

13. Halthore R. N., Eck T. F., Holben B. N., Markham L. Sun photometric measurements of atmospheric water vapor column abundance in the 940 nm band // *Journal of Geophysical research.* 1997. Vol. 102. No. D4. Pp. 4343–4352.

14. China P., Devara S., Maheskumar R. S., Raj P. E., Dani K. K., Sonbawne S. M. Some features of columnar aerosol optical depth, ozone and precipitable water content observed over land during the INDOEX-IFP99 // *Meteorologische Zeitschrift.* 2001. Vol. 10. No. 2. Pp. 123–130. Doi:10.1127/0941-2948/2001/0010-0123

15. Asadov H. H., Mirzabalayev I. M., Aliyev D. Z., Agayev J. A., Azimova S. R., Nabyev N. A., Abdullayeva S. N. Synthesis of corrected multi-wavelength spectrometers for atmospheric trace gases // *Chinese Optics Letters.* 2009. No. 7 (5). Pp. 361–363. doi:10.3788/col20090705.0361

NEW METHOD FOR MEASURING OF TOTAL AMOUNT OF WATER VAPORS IN ATMOSPHERE USING SUN PHOTOMETERS

ASADOV HIKMAT HAMID OGLU

Baku, Azerbaijan Republic, asadzade@rambler.ru

MAMEDOVA ULKER FIZULI GIZI

Baku, Azerbaijan Republic, ulker-qasimova@bk.ru

KEYWORDS: sun photometer; water vapors; measurements; atmosphere; wavelength.

ABSTRACT

It is well-known that one of major factors, causing the climatic changes in the planet is water vapor, carbon dioxide and methane. Due to presence of strong absorption lines of water vapors in near infrared and infrared bands the informativity of satellites remote sensing data is significantly limited. Aforesaid conditions the urgent actuality of accurate estimation of amount of water vapors in atmosphere. Sun photometer is one of major measuring instruments used at present time for measuring of total amount if water vapors in atmosphere. The paper is devoted to suggested new method for measuring of

total amount of water vapors in atmosphere using sun photometers. Measurements are carried out at wavelength 940 nm. The error of similar measurements at present time reaches 5-10 percents. One of major reasons for relatively low accuracy of such measurements is effect of atmospheric aerosol. To remove effect of aerosol the method where measuring of optical depth of aerosol is carried out at such wavelength where water vapors have not absorption lines is widely used. Then obtained result is extrapolated to wavelength 940 nm. As a result the accuracy of held measurements can be improved



in some degree. But hydro physical humidification of aerosol don't allow to remove this problem at all. Difference in temporal scales of humidification of various aerosol components don't allows to remove effect of aerosol using known methods. On the basis of known three wavelength method of sun photometric measurements using correction coefficients the new three wavelength method for measuring of water vapors with practically full compensation of aerosol effect is suggested. The relevant methodic for carrying out of three wavelength corrected measurements of total amount of water vapors is composed.

REFERENCES

1. Adler R.F., Huffman G.J., Chang A., Ferraro R., Xie P., Janowiak J., Rudolf B., Schneider U., Curtis S., Bolvin D., Gruber A., Susskind J., Arkin P., Nelkin E.J. The Version 2.1 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *J. Hydrometeor.* 2003. No. 4(6). Pp. 1147-1167.
2. Bentamy A., Katsaros K.B., Mestas-Nuñez A. M., Drennan W.M., Forde E.B., Roquet H. Satellite estimates of wind speed and latent heat flux over the global oceans. *J. Climate.* 2003. No.16. Pp. 637-656.
3. Bony S., Sud Y., Lau K.M., Susskind J., Saha S. Comparison and satellite assessment of NASA/ DOA and NCEP-NCAR reanalyses over tropical ocean: Atmospheric hydrology and radiation. *J. Climate.* 1997. No.10. Pp. 1441-1462.
4. Kustermann B., Kainz M., Hulsbergen K. Modeling carbon cycles and estimation of greenhouse gas emissions from organic and conventional farming systems. *Renewable Agriculture and Food Systems.* 2007. No. 23(1). Pp. 38-52.
5. Sweetapple C., Fu G., Butler D. Identifying key sources of uncertainty in the modelling of greenhouse gas emissions from wastewater treatment. *Water Res.* 2013. No. 47. Pp. 4652-4665.
6. Goraj W., Kuźniar A., Urban D., Pietrzykowska K., Stępniewska Z. Influence of plant composition on methane emission from Moszne peatland. *J. Ecol Eng.* 2013. No. 14. Pp. 53-57.
7. Kursinski E.R., Hajj G.A., Leroy S.S., Herman B. The GPS radio occultation technique. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.* 2000. No. 11. Pp. 53-114.
8. Lee L.C., Rocken C., Kursinski R. (Eds.). *Applications of Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate.* Hong Kong; Berlin Heidelberg: SpringerVerlag, 2001. 384 p.
9. MacDonald A.E., Xie Y.-F., Ware R.H. Diagnosis of three-dimensional water vapor using slant observations from a GPS network. *Monthly Weather Review.* 2002. No. 130. Pp. 386-397.
10. Raptis P.I., Kazadzis S., Gröbner S.K., Kouremeti N., Doppler L., Becker R. Helmis C. Water vapour retrieval using the Precision Solar Spectroradiometer. *Atmospheric Measurement Techniques.* 2018. Vol. 11. No. 1. Pp. 1143-1157. Doi:10.5194/amt-11-1143-2018.
11. Campanelli M., Mascitelli A., Sano P., Diemoz H., Estelles V., Federico S., Iannarelli A.-M., Fratarcangeli F., Mazzoni A., Realini E., Crespi M., Bock O., Martinez-Lozano A., Dietrich S. Precipitable water vapour content from ESR/SKYNET sun-sky radiometers: validation against GNSS/GPS and AERONET over three different sites in Europe. *Atmospheric Measurement Techniques.* 2018. Vol. 11. No. 1. Pp. 81-94. Doi:10.5194/amt-11-81-2018.
12. Shiobara M., Spinhirne J.D., Uchiyama A., Asano S. Optical Depth measurements of aerosol, cloud, and water vapor using sun photometers during FIRE cirrus IFO II. *Journal of Applied Meteorology.* 1996. Vol. 35. No. 2. Pp. 36-46. Doi:10.1175/1520-0450(1996)035<0036:odmoac>2.0.co
13. Halthore R.N., Eck T.F., Holben B.N., Markham L. Sun photometric measurements of atmospheric water vapor column abundance in the 940 nm band. *Journal of Geophysical research.* 1997. Vol. 102. No. D4. Pp. 4343-4352.
14. China P., Devara S., Maheskumar R.S., Raj P.E., Dani K.K., Sonbawne S.M. Some features of columnar aerosol optical depth, ozone and precipitable water content observed over land during the INDOEX-IPF99. *Meteorologische Zeitschrift.* 2001. Vol. 10. No. 2. Pp.123-130. Doi:10.1127/0941-2948/2001/0010-0123
15. Asadov H.H., Mirzabalayev I.M., Aliyev D.Z., Agayev J.A., Azimova S.R., Nabiyeu N.A., Abdullayeva S.N. Synthesis of corrected multi-wavelength spectrometers for atmospheric trace gases. *Chinese Optics Letters.* 2009. No. 7 (5). Pp. 361-363. Doi:10.3788/col20090705.0361

INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Asadov H.H., PhD, Professor, Research Institute of Aerospace Informatics;
Mamedova U.F., PhD student, Azerbaijan State Oil and Industry University.



doi: 10.24411/2409-5419-2018-10272

УНИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ СБОЕ- И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

ЛОБАНОВ

Анатолий Васильевич¹

АШАРИНА

Ирина Владимировна²

АННОТАЦИЯ

Впервые представлен унифицированный метод построения сбое- и отказоустойчивых информационно безопасных распределенных автоматизированных цифровых систем управления специального назначения, параллельно выполняющих множество взаимодействующих целевых задач, осуществляющих автоматическое парирование проявлений допустимых совокупностей враждебных неисправностей на основе репликации каждой целевой задачи (параллельного выполнения копий этой задачи на избыточных вычислителях с обменом результатами и выбором из них правильного в предположения, что ошибочными может быть только меньшая часть этих результатов) и использования динамической избыточности, обеспечивающей максимально длительные время активного существования системы и траекторию ее самоуправляемой деградации и состоящей в автоматических самообнаружении и самоидентификации по месту возникновения и по типу проявлений случившихся неисправностей, самовосстановлении целевого вычислительного процесса после программных сбоев, самоизоляции отказавших элементов, в замене их запасными элементами (при их наличии) и самовосстановлении целевого вычислительного процесса с прежним уровнем сбое- и отказоустойчивости, либо, при отсутствии запаса, выполнении самоуправляемой деградации системы с переходом в состояние безопасной остановки системы при полном исчерпании ресурсов. Метод применим на самом верхнем, архитектурном уровне проектирования таких систем, осуществляемого по технологии «сверху-вниз». Предложены обобщенные модели верхнего, архитектурного уровня процесса проектирования подсистем диагностики, сбое- и отказоустойчивости таких многозадачных систем и методы их построения. Показано, что проектирование такой подсистемы диагностики, сбое- и отказоустойчивости для многозадачной системы должно начинаться на самом верхнем, архитектурном уровне процесса проектирования этой системы, контролироваться и оцениваться на всех нижележащих уровнях проектирования.

Сведения об авторах:

¹д.т.н., с.н.с., начальник лаборатории - ученый секретарь акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Субмикрон», г. Москва, Зеленоград, Россия, lav@se.zgrad.ru

²к.т.н., доцент, старший научный сотрудник акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Субмикрон», г. Москва, Зеленоград, Россия, asharinairina@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сетевое управление; многопроцессорные системы; репликация задачи; отказоустойчивость; взаимное информационное согласование; динамическая избыточность.

Для цитирования: Лобанов А. В., Ашарина И.В. Унифицированный метод обеспечения сбое- и отказоустойчивости в распределенных автоматизированных цифровых системах управления специального назначения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 89-99. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10272

Введение

Современные автоматизированные цифровые системы управления специального назначения (АСУСН) представляют собой распределенные многомашинные вычислительные системы [1] сетевой структуры, выполняющие совокупность взаимодействующих целевых задач.

Критичность условий применения таких систем, очень высокая стоимость ошибок их проектирования и эксплуатации предъявляют самые высокие требования к их надежности, сбое- и отказоустойчивости и информационной безопасности, которые могут быть обеспечены только комплексным научно обоснованным подходом к построению этих систем и применением технологии их проектирования «сверху-вниз», исключающих или значительно снижающих вероятность возникновения дорогостоящих негативных эффектов эмерджентности, состоящих в возникновении в эксплуатируемой системе трудно или вообще необъяснимых ошибок и нештатных ситуаций, вплоть до полной потери предписанных функций управления, в поведении такой системы.

К настоящему моменту определены и исследованы системные механизмы, обеспечивающие заданные уровни сбое- и отказоустойчивости для параллельно выполняемых в АСУСН целевых задач, а также самоуправляемую деградацию проектируемой АСУСН при возникновении допустимых неисправностей и их последовательностей: базовые механизмы организации вычислений (модели АСУСН, сбое- и отказоустойчивая синхронизация в АСУСН, взаимное информационное согласование с обнаружением и идентификацией проявлений неисправностей). Также исследованы основные механизмы организации сбое- и отказоустойчивых вычислений в одноконтактных многомашинных АСУСН: тестовое и системное диагностирование АСУСН, функциональное диагностирование в распределенном системном диагностировании многомашинных АСУСН, метод построения сбое- и отказоустойчивых одноконтактных распределенных многомашинных информационно-управляющих АСУСН, механизмы их самовосстановления и самоуправляемой деградации [2–3].

Унификация — это управление многообразием и приведение проектируемых объектов к единообразной системе или форме. Принципы технической унификации направлены, в первую очередь, на устранение излишнего многообразия изделий, их составных частей и процессов изготовления [4], что положительно влияет как на сам процесс производства изделий, так и на его экономическую составляющую.

Под архитектурной унификацией методов и алгоритмов обеспечения сбое- и отказоустойчивости распределенных АСУСН сетевой структуры будем понимать достижение единообразия в используемых методах и алгоритмах,

начиная с самого высокого архитектурного уровня процесса их проектирования, проводимого по единственно приемлемой для различных типов АСУСН технологии проектирования «сверху-вниз» [5]. Только такая технология может обеспечить процесс проектирования с приемлемой стоимостью в приемлемые сроки и без возникновения отмеченных выше эффектов негативной эмерджентности.

Под сбое- и отказоустойчивостью системы в данной работе понимается способность такой АСУСН осуществлять в процессе ее целевой работы правильное исполнение предписанных алгоритмов управления с формированием правильной выходной информации и правильных предусмотренных действий АСУСН при возникновении в ней каждой *допустимой совокупности неисправностей и каждой допустимой последовательности таких совокупностей*.

Имеются две принципиальные характеристики, которые определяют область требований к проектированию рассматриваемых сбое- и отказоустойчивых АСУСН [6]: 1) вычислительная целостность, определяющая возможность ошибки в вычислениях или недопустимой их задержки; для рассматриваемых сбое- и отказоустойчивых АСУСН ошибка в вычислениях или их задержка при возникновении допустимых неисправностей и их допустимых совокупностей не допускается; 2) покрытие неисправностей, определяющее меру хорошей работы используемых механизмов отказоустойчивости и означающее условную вероятность правильного восстановления АСУСН при возникновении неисправности. Только использование научно обоснованных и математически доказанных методов построения рассматриваемых сбое- и отказоустойчивых АСУСН, основанных на самой общей модели неисправности, покрывающей все другие известные модели неисправностей, гарантируют их требуемую сбое- и отказоустойчивость.

Вторая характеристика (покрытие неисправностей) непосредственно влияет и на первую характеристику, поскольку, чем меньше покрытие неисправностей, тем ниже вычислительная целостность АСУСН. Однако покрытие неисправности напрямую зависит от сложности принимаемой в методах проектирования сбое- и отказоустойчивости АСУСН модели неисправности. В исследованиях по построению сбое- и отказоустойчивых вычислительных систем используются следующие классы моделей неисправностей, перечисленных ниже в порядке от менее сложных поведенческих моделей неисправного элемента к более сложным [7–8]: 1) неисправности неправильной остановки (fail-stop faults); 2) неисправность аварийного отказа (crash fault); 3) неисправность пропуска (omission fault); 4) временная неисправность (timing fault); 5) неисправность неправильных вычислений (incorrect computation fault).



Необходимо отметить, что в существующих АСУСН используются самые простые модели неисправности, что пагубно влияет на практическую надежность и долговечность как самих АСУСН, так и управляемых ими объектов. Однако высокая степень интеграции элементной базы и сложность используемых аппаратурных и программных средств АСУСН требует применения только следующих двух моделей неисправностей: 6) удостоверительная враждебная неисправность (authenticated Byzantine fault): ЦВМ посылает соседям в широкоэвещательной посылке удостоверенные сообщения, которые неисправные элементы системы не могут исказить незаметно; 7) самая общая модель «враждебной» (byzantine, rigorous, malicious) неисправности, при которой поведение неисправного элемента ЦВМ допускается полностью произвольным, в том числе и подобным «злонамеренному», включая его неодинаковость по отношению к другим элементам системы. Модель враждебной неисправности покрывает все остальные модели, и методы организации сбое- и отказоустойчивых вычислений в условиях возникновения враждебных неисправностей будут обеспечивать защиту и от неисправностей всех других моделей. Модель враждебной неисправности отражает сложность нахождения причинно-следственной связи между видами проявлений неисправностей и имеющимися в действительности неисправностями таких сложных объектов как современная ЦВМ и их взаимодействующие совокупности. Все другие модели неисправности ЦВМ, исключая возможность неодинакового поведения неисправной ЦВМ по отношению к другим ЦВМ системы, называются «дружественными».

Требуемая надежность системы может достигаться за счет повышения качества и надежности входящих в нее элементов, качества конструирования, улучшения технологии изготовления, испытаний и т.п. Эти направления находятся в постоянном развитии. Однако, как показывает практика, их недостаточно при построении рассматриваемых АСУСН из-за высокой сложности и критических условий применения таких систем. Другой путь достижения требуемой надежности рассматриваемых АСУСН — введение избыточности с целью обеспечения их сбое- и отказоустойчивости и информационной безопасности. Наиболее полная классификация понятий в области избыточности, соотношение между избыточностью и резервированием приводятся в [9]. В области вычислительной техники различают временную, информационную, аппаратурную и алгоритмическую избыточность [10].

В рассматриваемых многомашинных АСУСН отказоустойчивость по второму пути может достигаться двумя взаимодополняющими способами: во-первых, обеспечением аппаратурной отказоустойчивости входящих в нее ЦВМ (аппаратурная репликация), и, во-вторых, решением одной и той же задачи на нескольких неизбыточных ЦВМ

с последующим обменом результатами и выбором из них правильного (программная репликация или репликация задачи) [11].

Применение только первого способа сталкивается с ограничением, состоящим в том, что при увеличении числа ЦВМ в системе должен расти уровень избыточности, вводимой в каждую ЦВМ, для сохранения постоянного уровня надежности АСУСН. Поэтому для рассматриваемых БЦВС наиболее приемлемым является второй способ достижения сбое- и отказоустойчивости — репликации задач.

Назовем, как и в [12] *комплексом* совокупность ЦВМ, осуществляющих репликацию задачи и решающих одновременно одну и ту же задачу с целью обеспечения заданной сбое- и отказоустойчивости. АСУСН может содержать один комплекс (однокомплексная АСУСН), либо несколько комплексов (многокомплексная АСУСН), решающих одновременно различные задачи, которые должны обмениваться информацией. Распределение ЦВМ между комплексами может быть как статическим, сохраняющимся постоянно, так и динамическим, изменяющимся в зависимости от периода работы, технического состояния АСУСН, условий применения и др. Динамическое распределение обеспечивает более высокие надежностные характеристики и более длительную траекторию самоуправяемой деградации АСУСН. Здесь рассматриваются многокомплексные АСУСН с динамическим распределением ЦВМ между комплексами.

Под *архитектурой подсистемы диагностики, сбое- и отказоустойчивости, а также информационной безопасности АСУСН* будем понимать совокупность методов и механизмов, их самых общих характеристик и параметров, определяющих функционально-логическую и структурную организацию этой подсистемы. Понятие архитектуры охватывает общие наиболее существенные принципы и методы построения и функционирования подсистемы диагностики, сбое- и отказоустойчивости и информационной безопасности, которыми должны руководствоваться разработчики таких АСУСН с целью наиболее эффективного, быстрого и дешевого достижения поставленных целей для каждого из уровней проектирования, начиная с самого верхнего архитектурного уровня процесса проектирования по технологии «сверху-вниз» — формирования технического задания, и учитывающего весь накопленный опыт и наработанные ранее научно-теоретически и технические достижения. Описание архитектуры подсистемы диагностики, сбое- и отказоустойчивости на каждом уровне процесса проектирования АСУСН должно быть достаточно полным и подробным для реализации со стороны разработчиков всего требуемого функционала АСУСН на следующих ниже лежащих уровнях процесса проектирования этой подсистемы диагностики, сбое- и отказоустойчивости и информационной безопасности. Кроме того,

во избежание глобальных итераций процесса проектирования, когда практическая оценка целевых характеристик проекта АСУСН осуществляется после заключительного этапа этого процесса и при неудовлетворительной оценке осуществляется переход «вверх» на все или несколько уже выполненных уровней, на каждом уровне проектирования, в идеале, должны быть предусмотрены методы прогнозируемой оценки достижения требуемых целевых характеристик проектируемой АСУСН.

Широко распространены определения понятий сбоя и отказа в рассматриваемых системах в следующей трактовке [6]. В цифровой аппаратуре нередко происходят неожиданные изменения физических параметров, выходящие за допустимые пределы. Их принято называть сбоями, если изменения носят временный характер, и отказами, если изменения постоянны. Они вызывают неожиданные неблагоприятные изменения одной или нескольких логических переменных системы, которые называются *физической неисправностью* или просто *неисправностью*.

Для систем рассматриваемого класса, в которых обнаружение и идентификация проявлений неисправности некоторой ЦВМ осуществляется автоматически исправными ЦВМ этой системы, введем следующую новую градацию проявлений неисправности по типу, учитывающую необходимость и сложность их обработки в процессе целевой работы АСУСН и определяющую ее последующие действия: 1) сбой ЦВМ, предполагающий, что искажению подверглась информация, не влияющая на ход и последующие результаты ее вычислительного процесса; 2) программный сбой ЦВМ, внешним признаком которого считается проявление заранее оговоренной совокупности сбоев этой ЦВМ (критерий программного сбоя); в случае программного сбоя необходимы специальные действия по информационному восстановлению сбившейся ЦВМ; 3) отказ ЦВМ, объявляемый при проявлении заранее оговоренной совокупности ее программных сбоев (критерий отказа ЦВМ), либо обнаруживаемый при ее тестовом или системном самодиагностировании; при отказе необходима изоляция неисправной ЦВМ и либо включение вместо нее запасной ЦВМ, если она имеется, информационное восстановление этой включенной запасной ЦВМ и втягивания ее в необходимую целевую работу системы, либо выполнение самоуправляемой деградации системы с переходом ее на более низкий уровень задаваемой сбое- и отказоустойчивости, либо переходом к другим видам самоуправляемой деградации АСУСН.

Для элемента АСУСН, отличного от ЦВМ, вводится понятие сбоя как однократно обнаруживаемое проявление его неисправности, выразившееся в искажении транслируемой этим элементом информации, и понятие отказа — как обнаружение заранее оговоренной совокупности его сбоев (критерий отказа этого элемента).

Необходимо заметить, что возможность предвосторженного изменения этих критериев программного сбоя и отказов со стороны самой АСУСН в процессе ее целевой работы в зависимости от изменения ее технического состояния и изменения условий ее применения является весьма важной особенностью предлагаемого метода обеспечения сбое- и отказоустойчивости АСУСН.

В настоящей работе рассматриваются необслуживаемые АСУСН со значительными сроками активного существования, допускающие возможность гибкого изменения степени вычислительной целостности в различные периоды своей работы. В определенные периоды вычислительная целостность и покрытие неисправностей должны быть максимально высокими, в другие периоды — могут быть снижены для повышения суммарной вычислительной мощности системы. Значительная длительность срока активного существования требует наличия в системе запасных элементов и механизмов автоматического управления ими.

Создание сбое- и отказоустойчивых АСУСН рассматриваемого класса, применение в них научно обоснованных формализованных методов обеспечения задаваемой сбое- и отказоустойчивости, гарантирующих получение требуемых результатов, должно быть основано на использовании строгих научно и практически обоснованных моделей как отдельных аппаратно-программных элементов таких АСУСН, так и всей АСУСН в целом, включая управляемую ими внешнюю среду (внешние управляемые целевые объекты и их совокупности).

Существует следующие два вида избыточности, вводимой и используемой в рассматриваемых БЦВС для реализации в них задаваемой сбое- и отказоустойчивости [6, 12]:

1. *Статическая избыточность*, обеспечивающая только правильность выходной информации проектируемой АСУСН при возникновении допустимых совокупностей неисправностей. При статической избыточности проявления неисправностей «маскируются» и правильный результат получается за счет избыточного числа его копий, например, путем их мажорирования или кворумирования, в предположении, что ошибочными может быть только меньшая часть этих результатов.

2. Требование достижения возможно более длительного срока существования АСУСН и управляемого ею объекта может быть достигнуто только при использовании в проектируемой целевой АСУСН *динамической избыточности* для обеспечения ее задаваемой сбое- и отказоустойчивости, состоящей, во-первых в парировании проявлений неисправностей (ошибок) в выходной информации системы, а значит, в формировании правильных значений этой выходной информации, во-вторых, в одновременном и согласованном обнаружении случившихся проявлений неисправностей, в третьих, в непрерывной и сквозной идентификации об-



наруженных проявлений неисправностей по месту их возникновения и по типу, в-четвертых, в информационном восстановлении элементов АСУСН, идентифицированных в состоянии программного сбоя, со стороны исправных элементов АСУСН, и втягивания восстановленных элементов в совместную целевую работу с другими исправными элементами АСУСН, в-пятых, в реконфигурации АСУСН, состоящей в изоляции элементов, идентифицированных в состоянии отказа, подключения вместо них запасных элементов, если они имеются, информационном восстановлении подключенных запасных элементов и втягивании их в совместную с другими исправными элементами целевую работу АСУСН, в-шестых, при идентификации отказов и отсутствии соответствующих запасных элементов осуществление предусмотренной самоуправляемой деградации АСУСН со снижением надежностных и/или функциональных характеристик АСУСН, в-седьмых, при невозможности выполнения самоуправляемой деградации АСУСН перевод АСУСН или ее части в состояние безопасного останова, в котором выполняются все необходимые действия по обеспечению безопасности управляемого объекта с переходом АСУСН к ожиданию указаний из внешней среды и последующему выполнению поступивших указаний.

Обобщенные модели верхнего, архитектурного уровня процесса проектирования по технологии «сверху-вниз» подсистемы диагностики, сбое- и отказоустойчивости многокомплексной АСУСН

В процессе выполнения АСУСН целевой работы должен обеспечиваться такой уровень согласованного обнаружения и идентификации всех допустимых неисправностей (неисправностей, на которые рассчитаны используемые механизмы применяемой динамической избыточности), который гарантировал бы принятие всеми исправными вычислителями системы своевременных и согласованных распределенных решений по дальнейшему применению имеющихся механизмов динамической избыточности и необходимым последующим действиям каждого вычислителя и всей системы в целом.

При построении многозадачной многокомплексной сбое- и отказоустойчивой на основе динамической избыточности АСУСН необходимо определять требования по достоверности результатов вычислений для каждой задачи, выраженные или сводимые к терминам допустимых совокупностей неисправностей и их допустимых последовательностей. Также эти требования должны быть определены и для всех предусматриваемых траекторий возможной деградации проектируемой АСУСН.

Предположим, что в проектируемой АСУСН для решения каждой из параллельных целевых задач достаточно применение ЦВМ одного и того же типа с одинаковыми характеристиками по вычислительной мощности и объемам

требуемой памяти, а для любого канала связи между задачами (между ЦВМ) — канала связи одного и того же типа.

На основании этих данных и сведений об используемой элементной базе вначале необходимо определить полную исходную функциональную графовую модель структуры АСУСН, вершинами отражающей функциональные целевые подсистемы исправной БЦВС и дугами — связи между функциональными подсистемами. Для этой модели также должны быть разработаны текущие функциональные графовые модели для допустимых траекторий самоуправляемой функциональной деградации АСУСН вплоть до перехода АСУСН в состояние безопасного останова с обеспечением возможности, при необходимости, выполнения последующих действий в АСУСН, находящейся в состоянии безопасного останова, по восприятию указаний из внешней среды о дальнейших действиях АСУСН и возможности последующего выполнения этих указаний.

Полная исходная обобщенная структурная графовая модель АСУСН отображает полностью исправную структуру АСУСН со всеми имеющимися в ней «холодными» и «горячими» запасами, в которой должна быть организована требуемая работающая полностью исправная проектируемая АСУСН в ее исходной функциональной графовой модели.

Текущая исходная обобщенная структурная графовая модель АСУСН — это полная исходная обобщенная структурная графовая модель АСУСН, учитывающая текущее техническое состояние (структурную деградацию) этой АСУСН путем исключения элементов, относящихся к идентифицированным в состоянии отказа. *Текущая структурная конфигурация текущей функциональной графовой модели АСУСН* — это текущая функциональная графовая модель АСУСН, отображенная на текущую исходную обобщенную структурную графовую модель АСУСН. *Текущая реконфигурация АСУСН* — это выбор и реализация одной из возможных текущих структурных конфигураций текущей функциональной графовой модели АСУСН.

Для формирования текущей структурной конфигурации проектируемой АСУСН необходимо иметь, во-первых, текущую исходную обобщенную графовую структурную модель проектируемой сбое- и отказоустойчивой самореконфигурируемой самовосстанавливаемой АСУСН. Эта текущая исходная обобщенная графовая структурная схема должна иметь полносвязный орподграф, представляющий текущую *вычислительную часть АСУСН* с вершинами, отображающими текущие исправные ЦВМ и добавленные вершины всех исправных абонентов, и дугами — возможность непосредственной передачи межмашинной информации между каждой парой ЦВМ (вершин), а также между каждой возможной парой (вершина абонента, вершина ЦВМ). Такая обобщенная графовая модель АСУСН обеспечивает свойство ее полной самореконфигурации — воз-

возможности отображения любой функциональной графовой модели АСУСН текущей деградации и всех требуемых для нее функциональных графовых моделей траекторий возможной последующей деградации на *текущую исходную обобщенную структурную графовую модель АСУСН*, если это возможно.

Пусть проектируемая АСУСН должна решать множество $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_i\}$ взаимодействующих целевых задач, для каждой Z_i из которых должен быть сформирован комплекс K_i , решающий эту задачу на основе ее репликации. Обозначим через $|K_i|$ требуемое для комплекса K_i минимальное количество ЦВМ без учета вводимого горячего и холодного запасов, а через $|S_i|$ — количество запасных ЦВМ горячего и холодного запаса, добавляемых к этому комплексу K_i в соответствии с техническим заданием на проектирование рассматриваемой АСУСН. Тогда общее количество ЦВМ, включая запасные, в комплексе K_i будет составлять сумму $|K_i| + |S_i|$, а общее количество ЦВМ (вершин) в вычислительной части проектируемой АСУСН будет не менее $\sum_i (|K_i| + |S_i|)$.

Полная исходная обобщенная графовая структурная модель проектируемой сбое- и отказоустойчивой самореконфигурируемой самовосстанавливаемой АСУСН со сбое- и отказоустойчивостью на основе репликации задач и использования динамической избыточности строится в виде полносвязного орподграфа, представляющего вычислительную часть АСУСН с не менее чем $\sum_i (|K_i| + |S_i|)$ вершинами, отображающими ЦВМ, и разнонаправленными дугами, отображающими возможность непосредственной передачи межмашинной информации между каждой парой ЦВМ (вершин), а также вершинами всех абонентов, каждая из которых отображает некоторого абонента, а все вершины абонентов отображают всех абонентов, и каждая вершина абонента связана парой разнонаправленных дуг с каждой вершиной ЦВМ вычислительной части проектируемой АСУСН. Текущее техническое состояние АСУСН учитывается в исходной обобщенной графовой структурной схеме АСУСН через исключение из нее вершин, соответствующих ЦВМ и абонентам, идентифицированных в состоянии отказа, и дуг, соответствующих симплексным или псевдосимплексным каналам связи, идентифицированных в состоянии отказа.

Унифицированный метод построения распределенных сбое- и отказоустойчивых АСУСН должен быть основан на унифицированных моделях таких систем. Самые общие подходы, модели, ключевые определения и понятия, необходимые при проектировании АСУСН, представлены в [13]. Модели разбиты на шесть групп: 1) структурно-диагностические модели, 2) диагностические модели, 3) алгоритмически-диагностические модели, 4) модели процессов идентификации, 5) модель процесса деградации, 6) описание системы.

Архитектурный метод парирования проявлений допустимых совокупностей враждебных неисправностей и их идентификации по месту возникновения и типу в сбое- и отказоустойчивых самореконфигурируемых и самовосстанавливаемых многокомплексных АСУСН

Рассмотрим полносвязную систему, управляющую p абонентами A_1, A_2, \dots, A_p внешней среды, с отмеченной выше организацией межмашинных связей посредством передающих широковещательных каналов, содержащую s непересекающихся комплексов K_1, K_2, \dots, K_s , каждый K_t ($t = 1, \dots, s$) из которых состоит не менее чем из четырех ЦВМ в соответствии с заданным уровнем сбое- и отказоустойчивости $\mu_t = 1$ и требуемым количеством ЦВМ, равным $3\mu_t + 1$, в полносвязном комплексе K_t . Каждая ЦВМ имеет собственный межмашинный канал широковещательной передачи сообщений как всем другим ЦВМ, так и всем абонентам внешней среды. Каждый абонент имеет собственный передающий широковещательный канал, обеспечивающий передачу сообщений от этого абонента в каждую ЦВМ системы. То есть, в рассматриваемой структуре передача сообщений из ЦВМ к абоненту осуществляется по тому же широковещательному передающему каналу, по которому передаются сообщения другим ЦВМ системы, а сообщение от каждого абонента всем ЦВМ системы передается по передающему широковещательному каналу связи этого абонента. Полная исходная обобщенная структурная графовая модель рассматриваемой системы, вершинами отображающая ЦВМ и абоненты, а дугами — возможность непосредственной передачи сообщений, содержит полносвязный орподграф из всех вершин, соответствующих ЦВМ (между каждой парой вершин имеется пара разнонаправленных дуг), а также p вершин абонентов, каждая из которых связана парой разнонаправленных дуг с каждой вершиной, соответствующей ЦВМ.

Пусть каждое сообщение, переданное по любому передающему широковещательному каналу связи и поступающее по этому каналу связи в другие элементы системы (ЦВМ или абоненты), содержит все необходимые атрибуты для его идентификации и анализа этими элементами системы, запоминается в этих элементах и становится доступным в них для чтения и анализа непосредственно после его получения. Этим реализуется системный режим всеобщего «подслушивания» передаваемых в системе сообщений, когда общий трафик системы становится доступным для его анализа в каждой ЦВМ системы. Подобное подслушивание может быть реализовано в системе небольшого размера, например, применением протокола *MIL-STD-1553B* (ГОСТ 26765.52–87) за счет имеющегося в нем режима монитора. Реализация сбое- и отказоустойчивости в такой системе может потребовать значительных ресурсов этой системы, возможно, неприемлемых для некоторых систем



реального времени. Однако ее анализ позволяет определить механизмы, требуемые для обеспечения сбое- и отказоустойчивости систем подобной архитектуры, и возможные ограничения, которые могут сделать эти механизмы более практичными.

Предположим, что все время работы рассматриваемой многокомплексной системы разбито на пронумерованные целевые циклы работы. Предлагаемый метод целевой сбое- и отказоустойчивой работы системы состоит в следующем. Предположим, что каждый r -й ($r = 1, 2, \dots$) целевой цикл состоит из трех последовательных периодов: 1) абонентского внутрикомплексного периода, 2) периода межкомплексного взаимодействия, и 3) периода согласования и обработки системной диагностической информации. Пусть каждой исправной ЦВМ системы известна структура этой системы и структура каждого из входящих в систему комплексов.

В абонентском периоде r -го целевого цикла каждая i -я ЦВМ каждого t -го ($t = 1, \dots, s$) комплекса (обозначим ее через M_{it}), если это требуется, получает посредством алгоритма АРМ-1 [14] необходимую для этого комплекса входную информацию данного целевого цикла от заданных абонентов внешней среды, вычисляет достоверное значение требуемой выходной информации данного целевого цикла и передает эту информацию требуемым абонентам внешней среды, а также формирует одинаковую в каждой исправной ЦВМ M_{it} комплекса K_t диагностическую информацию: результат внутрикомплексного функционального диагностирования в виде логического выражения $(F)_i^{r,a}$ подозреваемой области враждебной неисправности, в своих терминах отображающего всевозможные одиночные враждебные неисправности данного комплекса, при каждой из которых возможно имеющее место поведение t -го комплекса в абонентском периоде данного r -го целевого цикла. В случае, когда в абонентском периоде проявлений неисправностей выявлено не было, выражение $(F)_{it}^{r,a} = 1$.

В периоде межкомплексного взаимодействия r -го целевого цикла каждая исправная i -я ЦВМ каждого t -го комплекса-получателя межкомплексного сообщения применяет метод АРМ-2 межкомплексного взаимодействия r -го целевого цикла, в котором каждая ЦВМ каждого комплекса-получателя принимает межкомплексное сообщение от каждой ЦВМ каждого комплекса-отправителя и посредством мажорирования этих сообщений, полученных от всех ЦВМ одного и того же комплекса-отправителя, вычисляет достоверное значение этого межкомплексного сообщения. Затем аналогично этому в алгоритме АРМ-1, в методе АРМ-2 каждая исправная ЦВМ каждого комплекса-получателя строит на основе построенных заранее выражений подозреваемых неисправностей, подобных таковым выражениям подозреваемых неисправностей в алгоритме АРМ-1, но учитывающих также возмож-

ность допустимых неисправностей ЦВМ из комплексов-отправителей, одинаковое во всех исправных ЦВМ данного комплекса-получателя логическое выражение $(F)_i^{r,e}$ всевозможных подозреваемых допустимых совокупностей враждебных неисправностей этого комплекса-получателя и всех его комплексов-отправителей, при каждой из которых могут иметь место имеющиеся фактические результаты каждого межкомплексного обмена данного t -го комплекса-получателя и всех его комплексов-отправителей в периоде межкомплексного взаимодействия r -го целевого цикла. При этом каждая исправная ЦВМ каждого комплекса-получателя строит конъюнкцию выражений $(F)_i^{r,a}$ и $(F)_i^{r,e}$, одинаковую во всех исправных ЦВМ этого t -го комплекса-получателя, которую преобразует к виду дизъюнкции конъюнкций, из которой исключает каждый терм, отображающий недопустимую совокупность неисправностей. В результате формируется логическое выражение подозреваемых неисправностей $(F)_i^{r,a,e}$, каждый терм которого определяет допустимую совокупность одиночных неисправностей одного или нескольких комплексов, а все термы — всевозможные такие допустимые совокупности, при каждой из которых возможно наблюдаемое поведение данного комплекса системы и в абонентском периоде, и в периоде межкомплексного обмена рассматриваемого r -го целевого цикла. Это выражение является диагностической информацией данного t -го комплекса в r -м целевом цикле для его абонентского периода и периода межкомплексного взаимодействия.

В периоде согласования и обработки системной диагностической информации (СДИ) r -го целевого цикла каждая исправная ЦВМ M_{it} каждого комплекса-получателя K_t ($t = 1, \dots, s$) посредством предлагаемого алгоритма АРМ-3 получает от каждого другого q -го комплекса ($q = 1, \dots, s; q \neq t$) системы его достоверную диагностическую информацию. Алгоритм АРМ-3 обеспечивает получение в ЦВМ M_{it} при помощи алгоритма АРМ-2 копии межзадачного сообщения (СДИ) $_{j/q}^{r,c}$ с системной диагностической информацией от каждой j -й ЦВМ M_{jq} каждого другого q -го ($q = 1, \dots, s; t \neq q$) комплекса-отправителя, содержащего логическое выражение $(F)_q^{r,a,e}$ подозреваемых неисправностей, а также логическое выражение $(F)_{j/q}^{r-1,c}$ подозреваемых неисправностей и, во-первых, определяет достоверные значения этих логических выражений в виде логических выражений $(F)_q^{r,a,e}$ и $(F)_q^{r-1,c}$, которые будут соответственно одинаковыми во всех исправных ЦВМ M_j ($i = 1, \dots, n$) системы, а, во-вторых, строит тем же способом, что и выражение $(F)_{it}^{r,e}$ в приведенном выше описании алгоритма АРМ-2, логическое выражение $(F)_q^{r,c}$ подозреваемых неисправностей для периода согласования и обработки системной диагностической информации (СДИ) r -го целевого цикла, одинаковое во всех исправных ЦВМ этого комплекса K_t . Затем каждая исправная ЦВМ M_{jt} каждого комплекса

K_i ($i = 1, \dots, s$) строит логическое выражение совокупностей подозреваемых враждебных неисправностей в виде конъюнкции выражений $(F)_q^{r-1,a,e}$ и выражений $(F)_q^{r-1,c}$ для каждого комплекса K_q ($q = 1, \dots, s$) системы. Это выражение, приведенное к виду дизъюнкции конъюнкций с исключением из нее каждого термина, отображаемая совокупность неисправностей которого не удовлетворяет принятому критерию допустимости таких совокупностей, будет одинаковым во всех исправных ЦВМ системы и каждый терм этого выражения будет определять допустимую совокупность враждебных неисправностей системы, при которой возможно имеющее место поведение системы в $(r-1)$ -м целевом цикле ее работы, а все термины — всевозможные такие совокупности.

После этого в каждой исправной ЦВМ системы в соответствии с принятыми критерием программного сбоя ЦВМ и отказа передающего УС (например, идентификация сбоев некоторой ЦВМ в двух соседних целевых циклах), строится требуемое критерием логическое выражение всевозможных совокупностей подозреваемых программных сбоев ЦВМ и отказов передающих УС, при каждой из которых возможно имеющее место поведение системы в $(r-2)$ -м и $(r-1)$ -м целевых циклах системы.

В результате всех этих действий каждая исправная ЦВМ системы одновременно, в одном и том же цикле, одинаково и правильно идентифицирует все обнаруженные проявления допустимых враждебных неисправностей.

Организация процессов восстановления целевой работы в автоматической распределенной сбое- и отказоустойчивой многомашинной АСУСН сетевой структуры

В данном разделе рассматривается проблема восстановления целевой работы в АСУСН, возникающая после того, как в этой системе в некотором комплексе (или некотором множестве F комплексов) была обнаружена допустимая совокупность (допустимые совокупности) неисправностей. Причем каждая неисправность была также одновременно и согласованно идентифицирована в каждой исправной ЦВМ системы по месту ее возникновения и по типу как программный сбой или отказ определенной ЦВМ этого комплекса. Отметим, что при этом согласованной во всех исправных ЦВМ системы является информация о техническом состоянии ее элементов, однако индивидуальная целевая информация каждого комплекса по состоянию управления внешними абонентами содержится только в соответствующем комплексе. В то же время согласованные действия всей системы при идентификации в ней программных сбоев и отказов и необходимости дальнейших восстанавливающих действий должны выполняться только с учетом также информационного состояния всех решаемых целевых задач. Такой анализ

и учет должны быть выполнены предварительно на стадии проектирования системы и для каждой возможной ситуации в системе и каждого возможного случая обнаружения и идентификации проявлений допустимых совокупностей неисправностей должен быть предусмотрен соответствующий распределенный алгоритм осуществления требований динамической избыточности. Согласование информационного состояния всех решаемых целевых задач может выполняться в каждом целевом цикле в периоде согласования и обработки системной диагностической информации, когда вместе с диагностической информацией согласуется и информационное состояние всех решаемых в системе целевых задач. Тогда каждая исправная ЦВМ системы на основании всей информации, согласованной в периоде согласования и обработки диагностической информации, собственного порядкового номера и принадлежности определенному комплексу, должна выполнить предусмотренные на этапе проектирования АСУСН восстанавливающие действия для данных конкретных значений диагностической информации и информационного состояния решаемых целевых задач. В качестве таких действий (команд восстановления) из состава необходимых для конкретного комплекса можно определить, например, следующие действия:

- приостановить целевую работу комплекса на определенное количество целевых циклов, либо до появления некоторого события, например, определенного межкомплексного сообщения;
- приступить к процессу внутрикомплексного восстановления ЦВМ данного комплекса, идентифицированной в состоянии программного сбоя;
- выполнить изоляцию ЦВМ данного комплекса, идентифицированную в состоянии отказа, подключить вместо нее запасную ЦВМ заданного номера и выполнить ее информационное восстановление и втягивание в совместную целевую работу с другими ЦВМ данного комплекса.

Процесс внутрикомплексного восстановления в восстанавливаемом комплексе состоит в том, что все исправные ЦВМ этого комплекса согласованно образуют восстанавливающий подкомплекс (ВПК) восстанавливаемого комплекса и переходят к процессу восстановления, состоящему в следующем. Во-первых, предусмотренными аппаратно-программными средствами восстанавливающие ЦВМ из ВПК согласованно и безусловно переводят восстанавливаемые ЦВМ этого комплекса в режим восстановления и блокируют их каналы межмашинной связи от возможности вмешиваться в работу любой исправной ЦВМ из ВПК. В режиме восстановления восстанавливаемая ЦВМ ожидает от ВПК поступления команд собственного восстановления, в состав которых входят, во-первых, команда записи в заданную область памяти этой ЦВМ



данных, поступивших в составе этой команды, во вторых, команда чтения данных из заданной области памяти восстанавливаемой ЦВМ и передача этих данных каждой ЦВМ из ВПК, в-третьих, команда синхронного перехода восстанавливаемой ЦВМ к выполнению программы в ее памяти с задаваемого в команде адреса либо к выполнению программы, передаваемой в составе данной команды, в-четвертых, команда пуска восстанавливаемой ЦВМ с указанного адреса синхронно со всеми ЦВМ из ВПК. В составе программ каждой ЦВМ из целевого комплекса должна быть программа восстановления восстанавливаемой ЦВМ из этого комплекса, которая должна завершаться последней из указанных команд, переводящей восстанавливающие и восстанавливаемую ЦВМ восстанавливаемого комплекса к выполнению его целевой задачи. Проявления программных сбоев восстанавливаемой ЦВМ, соответствующие принятому критерию отказа ЦВМ, например, две подряд неудачные попытки восстановления, должны восприниматься со стороны системы как отказ этой ЦВМ с необходимостью ее исключения из восстанавливаемого комплекса и из рабочей конфигурации системы, подключения запасной ЦВМ, если она имеется, и аналогичного восстановления в ней целевой работы восстанавливаемого комплекса. В случае отсутствия запасной ЦВМ данный комплекс должен быть переведен в режим целевой работы с пониженным уровнем сбоев и отказоустойчивости. Здесь также возможно использование предусмотренной на этапе проектирования функциональной деградации АСУСН, при которой целевая задача комплекса с неисправностью, не подлежащей восстановлению, исключается из состава выполняемых целевых задач, исправные ЦВМ расформированного комплекса переводятся в запас, и АСУСН продолжает выполнение сокращенного списка целевых задач. При достижении принятого критического уровня сбоев и отказоустойчивости в АСУСН, определенного на этапе ее проектирования, и возникновении в системе следующей неисправности АСУСН должна перейти в режим безопасного останова, индивидуального для системы и зависящего от условий ее применения. В этом режиме система должна сообщить о своем переходе в режиме безопасного останова внешнему пользователю и перейти в режим ожидания от этого пользователя команд ручного управления системой. Содержание этого режима и состав команд, исполняемых в нем, является темой отдельной перспективной научной работы.

Изложенная технология организации сбоев- и отказоустойчивой работы в однокомплексной сбоев- и отказоустойчивой управляющей системе для модели достоверительной враждебной неисправности была разработана, апробирована и успешно внедрена на ряде космических объектов и практически показала свою эффективность. Теоретические вопросы и обоснования такой технологии организации сбоев- и от-

казоустойчивой целевой работы однокомплексной системы и процессов ее восстановления после программных сбоев и отказов для однокомплексной системы и враждебной модели неисправности изложены в [15].

Заключение

Представлен впервые унифицированный архитектурный метод парирования проявлений допустимых совокупностей враждебных неисправностей, их обнаружения и идентификации в сбое- и отказоустойчивых самореконфигурируемых и самовосстанавливаемых многокомплексных БЦВС показывают, что проектирование таких многокомплексных АСУСН должно начинаться на самом верхнем, архитектурном уровне процесса проектирования этой АСУСН, проводимого по технологии «сверху-вниз», и на следующих ниже лежащих уровнях эти общие представления и предложения должны все более детализироваться и уточняться, чтобы на заключительном уровне процесса проектирования были получены все необходимые обоснованные аппаратно-программные решения. Приведены обобщенные модели архитектурного уровня процесса проектирования по технологии «сверху-вниз» подсистемы диагностики, сбоев- и отказоустойчивости многокомплексной АСУСН. Этот метод и модели обеспечивают в АСУСН возможность согласованных одновременных и неодинаковых действий всех исправных ЦВМ, гарантирующих правильность функционирования АСУСН в условиях возникновения допустимых совокупностей враждебных неисправностей.

Открытой областью научных исследований для рассматриваемых систем являются оценки требуемых для них аппаратных и программных ресурсов и методы их снижения. Ближайшей перспективной научно-исследовательской задачей можно также определить создание и исследование макетного образца такой АСУСН.

Литература

1. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети: пер с англ. 5-е изд. СПб.: Питер. 2012. 960 с.: ил.
2. Гришин В.Ю., Лобанов А.В., Сиренко В.Г. Сетецентрическая война и живучесть системы ее управления // Новый оборонный заказ. Стратегии. 2014. № 2. С. 52–53.
3. Гришин В.Ю., Лобанов А.В., Сиренко В.Г. Сетецентрическая война и живучесть системы ее управления. Стратегии (продолжение) // Новый оборонный заказ. Стратегии. 2014. № 3. С. 46–49.
4. Унификация // Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BD%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F> (дата обращения: 25.04.2019).
5. Барретт С.Ф., Пак Д. Дж. Встраиваемые системы. Проектирование приложений на микроконтроллерах с-

мейства 68HC12/HCS12 с применением языка C Embedded Systems. Design and Applications with the 68HC12 and HCS12: пер с англ. М.: ДМК-пресс, 2007. Гл. 2.5: Структурное проектирование. С. 49–58. URL: http://programming-lang.com/ru/comp_hard/barrett/0/j23.html (дата обращения: 25.04.2019).

6. *Авиженис А.* Отказоустойчивость — свойство, обеспечивающее постоянную работоспособность цифровых систем // ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 10. С. 5–25.

7. *Barborak M., Malek M.* The consensus problem in fault-tolerant computing // ACM Computing Surveys. 1993. Vol. 25. No. 2. Pp. 171–220.

8. *Мамедли Э.М., Самедов Р.Я., Соболев Н.А.* Метод локализации «дружественных» и «враждебных» неисправностей // Автоматика и телемеханика. 1992. № 5. С. 126–138.

9. *Пархоменко П.П.* О классификации понятий в области избыточности // Сборник трудов «Принципы обеспечения отказоустойчивости многопроцессорных вычислительных систем» / Отв. ред. П.П. Пархоменко, В.А. Ведешенков. М.: Изд-во ИПУ., 1987. С. 5–7.

10. *Каган Б.М., Мкртумян И.Б.* Основы эксплуатации ЭВМ. М.: Энергоатомиздат. 1988. 432 с.

11. *Kuhl J.G., Reddy S.M.* Fault-tolerance considerations in large, multiple-processors systems // Computer. 1986. Vol. 19. No. 3. Pp. 56–67.

12. *Мамедли Э.М., Соболев Н.А.* Механизмы операционных систем, обеспечивающие отказоустойчивость в управляющих многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1995. № 8. С. 3–63.

13. *Лобанов А.В.* Модели замкнутых многомашинных вычислительных систем со сбое- и отказоустойчивостью на основе репликации задач в условиях возникновения враждебных неисправностей // Автоматика и телемеханика. 2009. № 2. С. 171–189.

14. *Лобанов А.В.* Обнаружение и идентификация неисправностей в распределенных управляющих вычислительных системах с программно-управляемой сбое- и отказоустойчивостью // Автоматика и телемеханика. 1998. № 1. С. 155–164.

15. *Лобанов А.В.* Организация сбое- и отказоустойчивых вычислений в полносвязных многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 2000. № 12. С. 138–146.

UNIFIED METHOD FOR ENSURING FAILURE- AND FAULT-TOLERANCE TO RESISTANCE IN DISTRIBUTED AUTOMATED DIGITAL CONTROL SYSTEMS FOR SPECIAL PURPOSE

ANATOLY V. LOBANOV,

Moscow, Russia, lav@se.zgrad.ru

IRINA V. ASHARINA,

Moscow, Russia, asharinairina@mail.ru

KEYWORDS: network-centric management; multiprocessor systems; task replication; fault-tolerance; mutual information approval; dynamic redundancy.

ABSTRACT

For the first time, a unified method is presented for constructing fail-safe and fault-tolerant information-safe distributed automated digital control systems for special purposes that simultaneously perform a set of interacting target tasks. The proposed systems automatically parry the manifestations of admissible hostile faults based on replication of each target task (parallel execution of copies of this task on non-redundant computers with the exchange of results and the choice of them correct in the assumption that only a smaller part of these results can be erroneous) and use of dynamic redundancy, providing the longest possible time of active existence of the sys-

tem and the trajectory of its self-managed degradation of. Systems perform automatic self-detection and self-identification based on the place of occurrence and the type of occurrence of faults, self-recovery of the target computational process after software failures, self-isolation of failed elements, replacement with spare elements (if any) and self-recovery of the target computing process with the same level of failure and fault tolerance, or, in the absence of a stock, the implementation of a self-managed degradation of the system with a transition to a safe shutdown state of the system full exhaustion of resources. The method is applicable at the highest, architec-

tural level of design of such systems, carried out according to the "top-down" technology. Generalized models of the upper, architectural level of the process of designing subsystems of diagnostics, failure and fault tolerance of such multitasking systems and methods for their construction are proposed. It is shown that the design of such a subsystem of diagnostics, failure- and fault-tolerance for a multitasking system should begin at the highest, architectural level of the design process of this system, be monitored and evaluated at all underlying design levels.

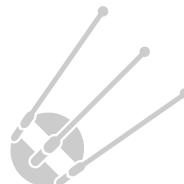
REFERENCES

1. Tanenbaum E.H., Wetherall D. *Computer Networks*. 5th Edition. Prentice Hall, 2011. 960 p.
2. Grishin V. Yu., Lobanov A.V., Sirenko V.G. Setetsentricheskaya vojna i zhivuchest' sistemy ee upravleniya [Network-centric war and survivability of its control system]. *New defence order. Strategy*. 2014. No. 2. Pp. 52-53.
3. Grishin V. Yu., Lobanov A.V., Sirenko V.G. Setetsentricheskaya vojna i zhivuchest' sistemy ee upravleniya. Strategii (prodolzhenie) [Network-centric war and the survivability of its management system. Strategies (continued)]. *New defence order. Strategy*. 2014. No. 3. Pp. 46-49.
4. Unifikatsiya [Unification] // Wikipedia. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BD%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F> (date of access: 25.04.2019) (In Russian)
5. Barrett S.F., Pack D.J. *Embedded Systems Design and Applications with the 68HC12 and HCS12*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson, 2004. 672 p.
6. Avizienis A. Fault-tolerance: The survival attribute of digital systems. *Proceedings of the IEEE*. 1978. Vol. 66. Issue 10. Pp. 1109-1125. DOI: 10.1109 / PROC.1978.11107
7. Barborak M., Malek M. The consensus problem in fault-tolerant computing. *ACM Computing Surveys*. 1993. Vol. 25. No. 2. Pp. 171-220.
8. Mamedli È. M., Samedov R. Ya., Sobolev N.A. A method for localization of byzantine and nonbyzantine faults. *Autom. Remote Control*. 1992. Vol. 53. No. 5. Pp. 734-744.
9. Parkhomenko P. P., Vedeshenkov V.A. (Eds.). *Sbornik trudov "Principy obespecheniya otkazoustojchivosti mnogoprocessornyh vychislitel'nyh sistem"* [Proceedings of the Principles of fault tolerance of multiprocessor computer systems]. Moscow: Institute of Control Sciences Publ., 1987. Pp. 5-7. (In Russian)
10. Kagan B.M., Mkrtumyan I.B. *Osnovy ehkspluatatsii EVM* [Basics of computer operation]. Moscow: Ehnergoatomizdat. 1988. 432 p. (In Russian)
11. Kuhl J.G., Reddy S.M. Fault-tolerance considerations in large, multiple-processors systems. *Computer*. 1986. Vol. 19. No. 3. Pp. 56-67.
12. Mamedli È. M., Sobolev N.A. Mechanisms of operating systems supporting fault-tolerance of multicomputer control systems. *Autom. Remote Control*. 1995. Vol. 56. No. 8. Pp. 1065-1105.
13. Lobanov A.V. Models of closed multimachine computer systems with transient-fault-tolerance and fault-tolerance on the basis of replication under byzantine faults. *Autom. Remote Control*. 2009. Vol. 70. No. 2. Pp. 328-343.
14. Lobanov A. Vtechnical diagnostics: detection and identification of malfunctions in distributed control computer systems with program-controlled fault-and-failure tolerance. *Autom. Remote Control*. 1998. Vol. 59. No. 1. Pt. 2. Pp. 128-135.
15. Lobanov A.V. Organization of fault- and failure-tolerant computations in completely connected multicomputer systems. *Autom. Remote Control*. 2000. Vol. 61. No. 12. Pp. 2059-2067.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Lobanov A.V., PhD, Senior Research Officer, head of laboratory of the Joint-Stock Company "Scientific Research Institute 'Submicron'"; Asharina I.V., PhD, Docent, Senior Research Officer of the Joint-Stock Company "Scientific Research Institute 'Submicron'".

For citation: Lobanov A.V., Asharina I.V. Unified method for ensuring failure- and fault-tolerance to resistance in distributed automated digital control systems for special purpose. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 3. Pp. 89-99. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10272 (In Russian)





doi: 10.24411/2409-5419-2018-10273

TECHNIQUE OF SYNTHESIS OF THE SUITABLE PROGRAM OF DIAGNOSING OF THE ONBOARD EQUIPMENT OF THE SPACECRAFT ON RELIABILITY TAKING INTO ACCOUNT PRECISION CHARACTERISTICS OF MEASURING INSTRUMENTS

EKATERINA A. ZAHAROVA¹

ANATOLIY D. KHOMONENKO²

ANATOLIY M. BARANOVSKY³

ABSTRACT

The modern spacecraft's are difficult subjects to control and diagnosing which at completions and partial modernization allow joint operation of the elements having various volume of statistical information on defects and refusals, and at times and total absence of this information. When diagnosing the onboard equipment of spacecraft the problem of reliability of decision-making is particularly acute very. The poor quality of diagnosing can lead to adoption of wrong solutions of the technical condition and is negative influence processes of maintenance of a subject to diagnosing that leads to decrease in efficiency of the solution of tasks, or to start of spacecraft with faulty onboard equipment of that means failure of the set target task. It demands further intensive development of new approaches to determination of technical condition on the basis of diverse prior and current information as the existing approaches not rather fully reflect the proceeding processes in an object and the system of diagnosing. In this regard the technique of synthesis of the suitable program of diagnosing of the onboard equipment of the spacecraft on reliability on the basis of the hidden Markov models based on Bayesian networks of trust is developed. Application of Bayesian networks of trust in models of diagnosing allows to increase reliability of results of diagnosing at the expense of a possibility of accounting of uncertainty of results of measurements of diagnostic signs, dynamics of prior information on technical condition of a subject to diagnosing, coverage of considerable volume of diagnostic signs and also uses of parameters of the law of distribution of values of diagnostic signs and precision characteristics of measuring instruments. Use of the office of Bayesian networks of trust significantly supplements models and methods of the solution of problems of technical diagnostics. The example of synthesis of the suitable program of diagnosing of a control system of the movement of the spacecraft on reliability is presented. According to authors, results of researches can be of interest to developers of control devices and tests of the onboard equipment of spacecraft's both by preparation of spacecraft for start, and in flight.

Information about authors:

¹postgraduate student of the of Military Space Academy, St-Petersburg, Russia, Mashenkokatay@mail.ru;

²PhD, Full Professor, Head of the Department of Information and Computing systems of Emperor Alexander I St. Petersburg state transport university, Professor of the of Military Space Academy, St-Petersburg, Russia, Khomon@mail.ru

³PhD, Docent, Professor of the of Military Space Academy, St-Petersburg, Russia, Bamvka@mail.ru

KEYWORDS: diagnosing; onboard equipment; technical condition; Bayesian network of trust; precision characteristics, posteriori conclusion.

For citation: Zaharova E. A., Khomonenko A. D., Baranovsky A. M. Technique of synthesis of the suitable program of diagnosing of the onboard equipment of the spacecraft on reliability taking into account precision characteristics of measuring instruments. *H&ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 3. Pp. 100-108. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10273



Introduction

Increase in complexity of the modern missile and space equipment is followed by increase in requirements to efficiency of its regular functioning [1]. Considerably processes of determination of technical condition of systems at ground tests became complicated and in you weed that complicates prevention and parrying of refusals in various modes of functioning. timely detection of malfunctions and refusals. The most important component of the spacecraft (S) is the control system of the movement (CSM) which provides, in particular, management of the angular movement for the purpose of high-quality working off of the program of management during the operation of the special equipment. In this regard it is necessary to carry out reliable diagnosing of CSM of S as on the technical complex (TC) that there was no start of S with disabled CSM, and further during flight that there was no failure of performance of a target task because of refusal of CSM of S [2–3].

Problem definition. The problem of ensuring the required reliability of diagnosing of CSM of S as subject to diagnosing on shopping mall is formulated as follows [4].

The formalized models of a subject to diagnosing M_{od} , process of diagnosing M_{pd} and model of measuring instruments of sensors are set M_d :

$$M_{od} = \langle S, Pr, \Lambda \rangle,$$

$$M_{pd} = \langle Y_d, Y_n, \Pi, \Omega, A_{pr}, B_{pr}, T^+(t_0) \rangle,$$

$$M_d = \langle Sr, A_{Sr}, B_{Sr}, \sigma_{Sr} \rangle,$$

where

– $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ — set of types of technical conditions of BO S;

– $Pr = \{pr_j | j = \overline{1, n}\}$ — the set of the diagnostic signs (DS) consisting of the discrete DP $Pr_d = \{pr_{dj} | j = \overline{1, l}\}$ and continuous DP $Pr_n = \{pr_{nj} | j = \overline{1, h}\}$ described by the normal law of distribution with parameters μ_j and σ_j ;

– $\Lambda = \{\lambda_i | i = \overline{1, m}\}$ — set of intensities of failures of equipment packages of an object;

– $Y_d = \{y_{dj} | j = \overline{1, l}\}$ — set of the received signals from sensors of discrete type and $Y_n = \{y_{nj} | j = \overline{1, h}\}$ — a set of the received signals from sensors of continuous type;

– $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\}$ — a set of checks of DP for which are set $T = \{\tau_j | j = \overline{1, n}\}$ — duration of checks, $A_{pr} = \{\alpha_{prj} | j = \overline{1, n}\}$ and $B_{pr} = \{\beta_{prj} | j = \overline{1, n}\}$ — probabilities of methodical errors (the 1st and 2nd sort) which are caused by errors of purpose of admissions to the measured parameters;

– $\Omega = \{R_\omega | \omega = 0, \dots, (2^{m+1}-1)\}$ — the event algebra W ,

$W_{\max} = 2^{m+1}-1$ set on a set S in which elements $R_{m+1} = \{S_0, S_m\}$ — are the information statuses of process of diagnosing which are formed as the result of the carried-out inspections;

– $T^+(t_0) = [t_0, +\infty)$ — time point, where t_0 — initial time point of operation of a system, and $t_0 + \tau_d$ — corresponds to diagnosing time;

– $Sr = \{Sr_j | j = \overline{1, n}\}$ — a set of the sensors fixing values of diagnostic signs for which metrological characteristics are set. For sensors of discrete type are set $A_{Sr} = \{\alpha_{Srj} | j = \overline{1, l}\}$ and $B_{Sr} = \{\beta_{Srj} | j = \overline{1, l}\}$ — sets of error probabilities of checks (the 1st and 2nd sort), for sensors of continuous type measurement uncertainty distribution functions in the form of the normal law $\sigma_{Sr} = \{\sigma_{Srj} | j = \overline{1, h}\}$, facility instrumentations caused by errors, are set by noises and other negative factors.

It is required: synthesize the diagnostic program

$$Prog^* = \{\pi_{j(1)}, \dots, \pi_{j(c)}, \dots, \pi_{j(n^*)}\},$$

where $\{\pi_{j(1)}, \dots, \pi_{j(c)}, \dots, \pi_{j(n^*)}\}$ — an ordered set (structure and the sequence) of checks, j — a code name of check c — sequence number of check, such that

$$D(Prog^*) = \sum_{i=0, m} \sum_{j=1, n} [P(S_i | y_{dj(1)}, \dots, y_{nj(n^*)_{-j_{k_j}}}) \cdot P(S_i)] \geq D_{zad}$$

provided that $T(Prog^*) \leq T_{dop}, T_{dop}$ — an allowed time of diagnosing.

Assumptions: 1) the value of each diagnostic sign is measured by one sensor; 2) at the same time there can be only one failure; 3) the observability of types of the CU is provided.

Task solution. For synthesis of the diagnostic program hidden Markov models on the basis of the Bayesian networks of trust (BNT) representing the probabilistic and graphic models having the following advantages [5] are used:

1. High performance of a solution of tasks for complex systems in which there are a lot of observed signs of variables $Y_j, \{y_j | j = \overline{1, n}\}, n \leq 1000$ allowing decomposition on continuous and discrete diagnostic signs.

2. Accounting of receipt of new information — certificates (new data on results of checks of diagnostic signs $Y(t)$ or information on degrees of product availability $P(S_i)$).

The data provided in problem definition are necessary for synthesis of the diagnostic program OE S, suitable on reliability, on the basis of Bayesian networks of trust including: failure density, given about diagnostic signs, given about precision characteristics of measuring instruments of DP.

The technique of synthesis represents the following sequence of actions:

Step 1. Construct a diagnosing process model in the form of a hidden Markov model on the basis of the Bayesian network of trust (BNT):

Step 1.1. Give a task topology of a Bayesian network of trust — to define prichinno investigative communications proceeding from structure of a system [10].

Step 1.2. Calculate the prior probabilities of types of the CU $\{P(S_i | i = \overline{0, m})\}$:

$$P(S_0) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^m \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_i t}}} \quad (1)$$

$$P(S_i) = \frac{\frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_i t}}}{1 + \sum_{i=1}^m \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{e^{-\lambda_i t}}}$$

Step 1.3. Specify the prior information for DP $\{\alpha_{pr_j} | j = \overline{1, n}\}$ and $\{\beta_{pr_j} | j = \overline{1, n}\}$.

Step 1.4. Set observation model, i.e. conditional probabilities of DP set in the CU $\{P(pr_j / S_i) | i = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}\}$, using, including, parameters of the distribution law of discrete and continuous diagnostic signs with parameters μ_j and σ_j .

Step 1.5. Specify the prior information for the sensor of discrete type $\{\alpha_{sr_j} | j = \overline{1, l}\}$ and $\{\alpha_{sr_j} | j = \overline{1, l}\}$ — error probabilities of checks (the 1st and 2nd sort), and for the sensor of continuous type to set metrological characteristics in the form of the normal distribution law of page $\{\sigma_{sr_j} | j = \overline{1, h}\}$.

Step 1.6. Set the model of measurements i.e. conditional probabilities connecting metrological characteristics of measuring instruments and the DP [6] model values $\{P(Sr_j / pr_j) | j = \overline{1, n}\}$.

Step 2. Synthesize the diagnostic program, suitable on reliability, on the basis of a posteriori output of Bayesian networks of trust:

Step 2.1. With the initial uncertainty of information state $R_{m+1} = \{S_0, S_1, \dots, S_m\}$ to carry out the distribution of model results of checks in the BNT $\{< y_j >, j = \overline{1, n}\}$. Distribution of model results of checks to BNT is understood as addition of the evidence of the DP model value and recalculation of probabilities of the CU.

Step 2.2. To find possible information (intermediate) states $R_\omega (\omega = 0, 1, \dots, m, (2^{m+1} - 1))$, which are formed as the result of the carried-out inspections on the basis of the DP model values.

Step 2.3. If the measured value DP $\{< y_{nj} >, j = \overline{1, h}\}$ is continuous, then to define reliability for this check. Reliability are the values of conditional probabilities of types of technical states $\{P(S_i), i = \overline{0, m}\}$, average on a priori probabilities of technical condition, from results of checks $\{P(S_i / y_{nj}), i = \overline{0, m}; j = \overline{1, h}\}$. The reliability of check is defined by expression [7-8]:

$$\overline{D}(\{\pi_j\}) = \frac{1}{\sum_i^m P(S_i)} \cdot \frac{\sum_{j=1, h} f(y_{nj} / pr_{nj}) \cdot f(pr_{nj} / S_i) \cdot P(S_i)}{\sum_{i=0, m} \sum_{j=1, h} f(y_{nj} / pr_{nj}) \cdot f(pr_{nj} / S_i) \cdot P(S_i)} \times$$

$$\times P(S_i) = \frac{1}{\sum_i^m P(S_i)} \cdot \sum_{i=0, m} \sum_{j=1, h} P(S_i / y_{nj}) \cdot P(S_i)$$

Step 2.4. If the measured value is discrete $\{< y_{dj} >, j = \overline{1, l}\}$, then to define reliability for this check. The reliability of check is defined by expression:

$$\overline{D}(\{\pi_j\}) = \frac{1}{\sum_i^m P(S_i)} \cdot \frac{\sum_{j=1, l} P(y_{dj} / pr_{dj}) \cdot P(pr_{dj} / S_i) \cdot P(S_i)}{\sum_{i=0, m} \sum_{j=1, l} P(y_{dj} / pr_{dj}) \cdot P(pr_{dj} / S_i) \cdot P(S_i)} \times$$

$$\times P(S_i) = \frac{1}{\sum_i^m P(S_i)} \cdot \sum_{i=0, m} \sum_{j=1, l} P(S_i / y_{dj}) \cdot P(S_i)$$

Step 2.5. To find for again formed information states, checks which provide discernability of the CU and to carry out distribution of possible results of checks to BNT for the purpose of finding of new possible intermediate states.

Step 2.6. The previous step repeats until all information states do not consist of the only degree of product availability — $R_i = \{S_i, i = \overline{0, m}\}$.

Step 2.7. To calculate

$$\overline{D}(\text{Prog}^*) = \sum_{i=0, m} \sum_{j=1, l} [P(S_i / y_{d(1)}, \dots, y_{n(n^*)})_{t_d + \tau_{j(1)} + \dots + \tau_{j(n^*)}} \cdot P(S_i)].$$

Step 2.8. To find $T(\text{Prog}^*) = \sum_{j=1}^n \tau_j$.

Step 2.9. To check a condition $\overline{D}(\text{Prog}^*) \geq D_{\text{zad}}$, to check $T(\text{Prog}^*) \leq T_{\text{dop}}$.

Step 2.10. If the condition of a step 2.9 is not satisfied, then to create the DP set with other characteristics.

Let's give an example of the solution of a problem of synthesis suitable on reliability.



Act as prior information the failure rate of blocks CSM of S — λ_i which are given in table 1.

As types of the CU (tab. 2) we will define one efficient S_0 and 7 disabled $S_i (i = \overline{1,7})$, called by single refusals corresponding blocks presented in table 2.

The values of probabilities of technical states calculated on a formula (1) for time t_d are presented in table 3.

Values of continuous diagnostic signs pr_1 — temperatures, pr_2 — tension of onboard sensors, pr_3 — load current and discrete diagnostic signs — pr_4, pr_5, pr_6, pr_7 , accepting binary

Table 1

Structure and failure rate of blocks CSM of S

The name of the equipment	Intensity of refusal — λ
1. Measuring instrument of an angular position	λ
2. Determinant of coordinates of stars	λ
3. Measuring instrument of angular speed	λ
4. Plotter of a local vertical	λ
5. Power gyroscopic complex	λ
6. System of measurement of increment of speed	λ
7. Coordination device block	λ

Table 2

Types of technical conditions of the onboard equipment CSM of S

S_0 — efficient	S_4 — failure of the plotter of a local vertical
S_1 — failure of the measuring instrument of an angular position	S_5 — refusal of a power gyroscopic complex
S_2 — refusal of determinant of coordinates of stars	S_6 — failure of the system of measurement of increment of speed
S_3 — failure of the measuring instrument of angular speed	S_7 — failure of the block of the device of coordination

Table 3

Probabilities of technical states CSM of S

Probabilities of the CU	Type of the CU	Probabilities of the CU	Type of the CU
$P(S_0) = 0.754$	efficient	$P(S_4) = 0.038$	failure of the plotter of a local vertical
$P(S_1) = 0.096$	failure of the measuring instrument of an angular position of	$P(S_5) = 0.019$	refusal of a power gyroscopic complex
$P(S_2) = 0.012$	refusal of determinant of coordinates of stars	$P(S_6) = 2.484 \cdot 10^{-3}$	failure of the system of measurement of increment of speed
$P(S_3) = 0.076$	failure of the measuring instrument of angular speed of	$P(S_7) = 2.417 \cdot 10^{-3}$	failure of the block of the device of coordination



values $\{0,1\}$, are presented in table 4. The set error probabilities of the first and second sort DP are presented in table 5.

For accounting of precision characteristics of measuring instruments the observation model is set $\{P(Sr_j / pr_j) | j = \overline{1, n}\}$,

Table 4

DP model values CSM of S

S_i	pr_j						
	$pr_1, ^\circ C$	pr_2, V	pr_3, A	binary DP			
				pr_4	pr_5	pr_6	pr_7
S_0	[5; 25]	[18;22]	[1.1;3.05]	0	0	0	0
S_1	[5; 25]	[22;33]	[1.1; 3.05]	0	0	0	1
S_2	[25;45]	[18;22]	[3.05; 5]	0	0	0	0
S_3	[25;45]	[22;33]	[3.05; 5]	0	0	0	0
S_4	[25;45]	[22;33]	[1.1; 3.05]	0	0	0	0
S_5	[5; 25]	[22;33]	[1.1; 3.05]	1	0	0	0
S_6	[5; 25]	[22;33]	[1.1; 3.05]	0	1	0	0
S_7	[5; 25]	[22;33]	[1.1; 3.05]	1	0	1	0

Table 5

Errors 1 and 2 sorts DP

Check	for discrete DP	
	α	β
pr_4, pr_5, pr_6, pr_7	0.01	0.05

in statements of the problem we will accept set the characteristics of measuring instruments presented in table 6.

The Bayesian network of trust [8] operates with unconditional and conditional probabilities. Processing of conditional probabilities of DP for BNT is given in table 7.

Characteristics of measuring instruments for sensors of continuous type are set in the form of family of functions of density of probability of the normal law of distribution by means of parameter σ_{Srj} . The block considering precision characteristics of measuring instruments, being the block of continuous type (continuos) into which the set passport values of tool errors are entered [9] is entered into model of process of diagnosing of OE of S in BNT.

Data for creation of Bayesian network are the probabilities of types of technical states determined by formulas (1) (tab. 3), model values of diagnostic signs (tab. 4, 5, 7), characteristics of the measuring instruments (tab. 6) set by discrete and continuous sizes.

Table 6

Characteristics of measuring instruments of discrete and continuous values

	Duration of the check, min	For sensors of the signal		Duration of the check, min	For sensors of continuous type		
		α_{Srj}	β_{Srj}		μ_{Srj}	σ_{Srj}	
π_4	2	0.06	0.001	π_1	4	0	0.03
π_5	4			π_2	5	0	0.05
π_6	4			π_3	3	0	0.04
π_7	2						

Table 7

Error handling of the first and second sort DP for BNT

$P(pr_{d4} / \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}) = 1 - \pm_4 = 0.99$	$P(pr_{d5} / \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_7\}) = 1 - \pm_5 = 0.99$
$P(pr_{d4} / \{S_5, S_7\}) = \pm_4 = 0.05$	$P(pr_{d5} / \{S_6\}) = \pm_5 = 0.05$
$P(\overline{pr_{d4}} / \{S_5, S_7\}) = 1 - \pm_4 = 0.95$	$P(\overline{pr_{d5}} / \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_7\}) = \pm_5 = 0.01$
$P(\overline{pr_{d4}} / \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}) = \pm_4 = 0.01$	$P(\overline{pr_{d5}} / \{S_6\}) = 1 - \pm_5 = 0.95$



At initial uncertainty of technical states $S = \{S_i | i = \overline{0, m}\}$ it is necessary to calculate reliability of all checks (as all checks are admissible) taking into account precision characteristics of measuring instruments and to define the check having the maximum reliability. On the subsequent steps, some checks will be inadmissible or need for them will be absent, therefore, the set of alternatives of checks will be narrowed, time of checks and volume of calculations is reduced.

In fig. 1 the fragment of process of diagnosing of a system at which on the 1st step there is a check π_2 is represented.

At receipt of the certificate $\langle y_{n2} \rangle$ there is a narrowing of area of uncertainty of types of technical states to $\{S_1, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7\}$, and at receipt $\langle \overline{y_{n2}} \rangle - \{S_0, S_2\}$. Therefore, the average reliability of check π_2 will be equal:

$$\begin{aligned} \overline{D}(\pi_2) = & \frac{1}{\sum_{i=0}^7 P(S_i)} \cdot [P(S_0 / \overline{y_{n2}}) \cdot P(S_0) + \\ & + P(S_1 / y_{n2}) \cdot P(S_1) + P(S_2 / \overline{y_{n2}}) \cdot P(S_2) + \\ & + P(S_3 / y_{n2}) \cdot P(S_3) + P(S_4 / y_{n2}) \cdot P(S_4) + \\ & + (P(S_5 / y_{n2}) \cdot P(S_5) + P(S_6 / y_{n2}) \cdot P(S_6) \\ & + P(S_7 / y_{n2}) \cdot P(S_7)] \end{aligned}$$

In fig. 2 probabilities of types of technical states in the absence of certificates are presented and at receipt of certificates after conducting check π_2 at the time of $t = 60$ min.

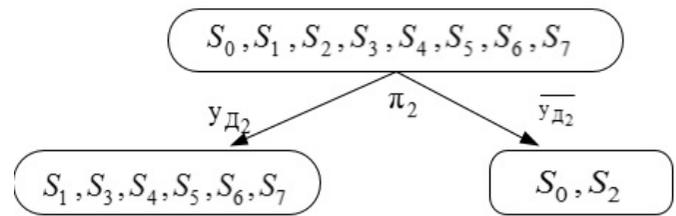


Fig. 1. Fragment of process of diagnosing consisting of check π_2

$$\begin{aligned} \overline{D}(\pi_2) = & \frac{1}{\sum_{i=0}^7 P(S_i)} \cdot [P(S_0 / \overline{y_{n2}}) \cdot P(S_0) + \\ & + P(S_1 / y_{n2}) \cdot P(S_1) + P(S_2 / \overline{y_{n2}}) \cdot P(S_2) + \\ & + P(S_3 / y_{n2}) \cdot P(S_3) + P(S_4 / y_{n2}) \cdot P(S_4) + \\ & + (P(S_5 / y_{n2}) \cdot P(S_5) + P(S_6 / y_{n2}) \cdot P(S_6) + \\ & + P(S_7 / y_{n2}) \cdot P(S_7)] = 0.8654 \cdot 0,754 + \\ & + 0.0998 \cdot 0.096 + 0.0138 \cdot 0.012 + 0.0790 \cdot 0.076 + \\ & + 0.0395 \cdot 0.038 + 0.0197 \cdot 0.019 + 0.003 \cdot 0.0002484 + \\ & + 0.003 \cdot 0.002417 = 0.67; \end{aligned}$$

By analogy the others are found reliability of checks [14–15]. As a result of performance of the sequence of steps of

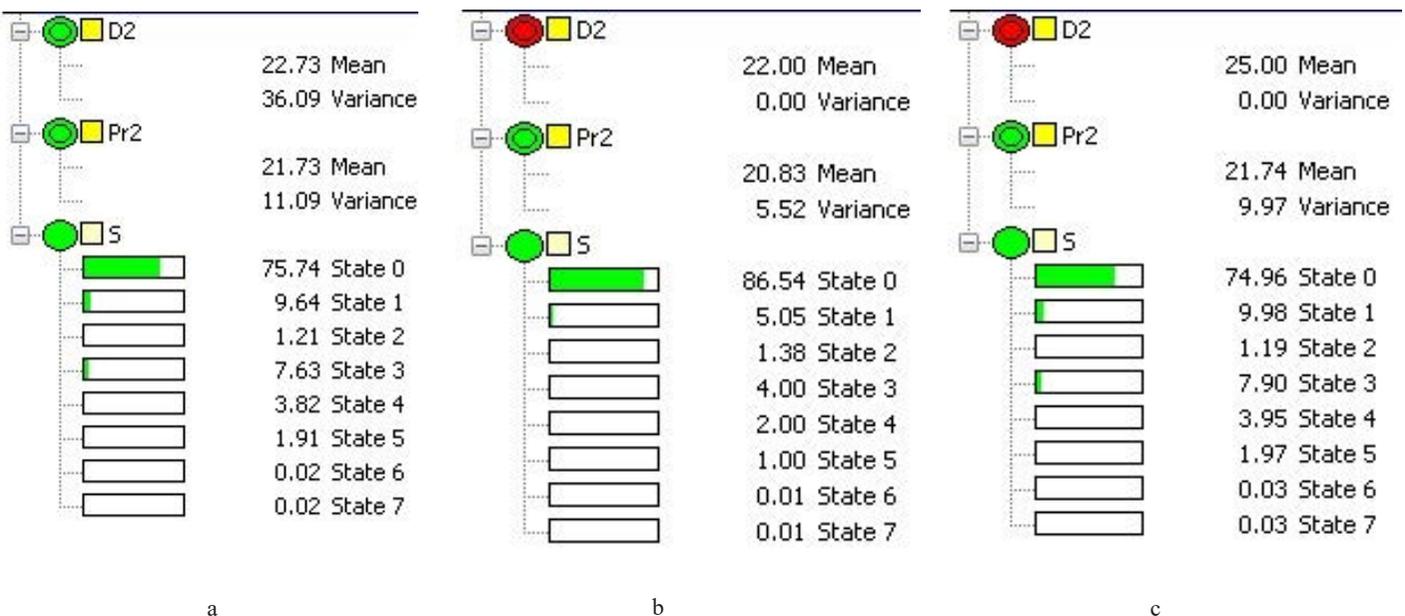


Fig. 2. Probabilities of technical states: a — in the absence of certificates; b — at receipt of the certificate; c — at receipt of the certificate

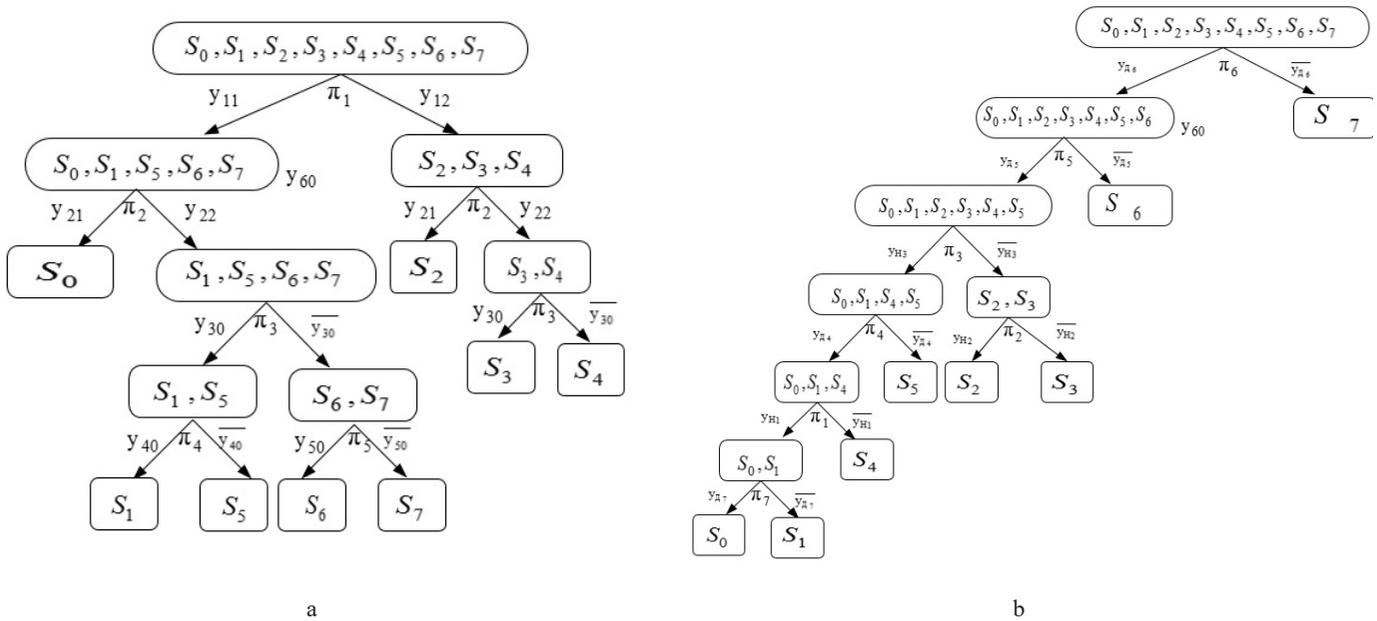


Fig. 3. Programs of diagnosing CSM of S for time point $t_d = 60$ min:
 a — the program of diagnosing CSM of S without dostovernost of checks;
 b — the program of diagnosing CSM of S taking into account dostovernost of checks

a technique, the suitable program of diagnosing on reliability for timepoint of diagnosing of $t_d = 60$ min. presented in fig. 3 is constructed.

For CSM of S average reliability unconditional (\bar{D}_b) and the suitable program ($\bar{D}(\text{Prog}^*)$) are equal respectively [7–8]:

$$\bar{D}_b = 0.843;$$

$$\begin{aligned} \bar{D}(\text{Prog}^*) = & (P(S_0 / y_{d6}, y_{d5}, y_{n3}, y_{d4}, y_{n1}, y_{d7}) \cdot P(S_0) + \\ & + P(S_1 / \overline{y_{d6}}, \overline{y_{d5}}, \overline{y_{d3}}, \overline{y_{d4}}, \overline{y_{n2}}, \overline{y_{d7}}) \cdot P(S_1)) \times \\ & \dots + (P(S_0 S_1 / y_{d6}, y_{d5}, y_{n3}, y_{d4}, y_{n1}) \cdot P(S_0 S_1) + \\ & + P(S_5 / y_{d6}, y_{d5}, y_{d3}, y_{d4}, y_{n2}) \cdot P(S_5)) + \dots \\ & + \dots (P(S_7 / \overline{y_{d6}}) \cdot P(S_7)) = 0.956. \end{aligned}$$

As a result of comparison of dostovernost we promote reliability for 14% at implementation of the program of diagnosing taking into account dostovernost of checks.

Conclusion. Accounting of precision characteristics of measuring instruments increases adequacy of model of process of diagnosing, at the set requirements in TTZ of reliability of results of diagnosing. The unconditional program of diagnosing

CSM of S (without dostovernost of checks) does not meet the established requirements $\bar{D}(\text{Prog}) = 0.843 < 0.95$, and the program of diagnosing CSM of S taking into account dostovernost of checks meets requirements of TZ $\bar{D}(\text{Prog}^*) = 0.956 > 0.95$. The received results give the chance to the automated probing system at ground tests of the onboard equipment of the spacecraft on a technical complex quickly to synthesize programs of diagnosing in case of refusal. Further results of researches can be directed to creation of programs of diagnosing taking into account dynamics of technical condition.

References

1. Baranovsky A.M., Privalov A.E. Onboard Monitoring and Diagnostic System of Small Space Vehicles. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2009. Vol. 52. No. 4. Pp. 51–56. (In Russian)
2. Dorozhko I.V., Zaharova E.A., Kopejka A.L. Model of diagnosing of the difficult technical complex taking into account coverage of indicators of reliability on the basis of bayesovsky networks of trust. *Izvestiya Tula State University*. 2018. No. 12. Pp. 335–342. (In Russian)
3. Dorozhko I.V., Osipov N.A. Model' diagnostirovaniya avtomatizirovannyh sistem upravleniya podgotovkoj i puskom raket-nositelej s ispol'zovaniem bayesovskih setej doveriya [Model of diagnostics of the automated control systems of preparation and start-up of launch vehicles with use

of Bayesian networks of trust] *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhajskogo* [Proceedings of The military space Academy named after A. F. Mozhaysky]. 2011. No. 633. Pt. 3. Pp. 163–174. (In Russian)

4. Dmitriev A.K., Kopkin E.V. Sintez gibkoj optimal'noj po dostovernosti programmy diagnostirovaniya tekhnicheskogo ob"ekta [Synthesis of flexible optimal program of diagnostics of technical object] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2000. No. 7. Pp. 16–27. (In Russian)

5. Dorozhko I.V., Osipov N.A. Technique of synthesis of optimal strategies for diagnostics of the automated control systems of complex technical objects with the use of aprioristic information. *SPIIRAS Proceedings*. 2012. No. 1 (20). Pp.165–185. (In Russian)

6. Yuan X., Cai B., Ma Y., Zhang J., Mulenga K., Yonghong Y., Chen G. (2018). Reliability evaluation methodology of complex systems based on dynamic object-oriented Bayesian networks // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. Pp. 11289–11300. Doi: 10.1109/ACCESS.2018.2810386

7. Dorozhko I.V., Tarasov A.G., Baranovsky A.M. Estimation to Reliability of Structural Complex Technical Systems by Using Bayesian Networks Belief Models in the Environment of GeNIe. *Intellektual'nye tekhnologii na transporte* [Intelligent technologies in transport]. 2015. No.3. Pp. 36–45. (In Russian)

8. Zaharova E.A. Mathematical Model of Diagnostics of Onboard Equipment, Taking into Account the Accuracy Characteristics of Measuring Instruments. *Intellektual'nye tekhnologii na transporte* [Intelligent technologies in transport]. 2019. No. 1. Pp. 15–25. (In Russian)

9. Alexander C. Managing operational risks with Bayesian networks. *Operational Risk: Regulation, Analysis and Management*. 2003. Pp. 285–294.

10. Yongli Z., Limin H., Jinling L. Bayesian network-based approach for power system fault diagnosis. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2006. Vol. 21. Pp. 634–639.

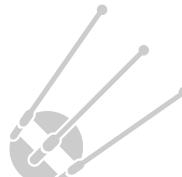
11. Wasserkrug S., Gal A., Etzion O. A Model for Reasoning with Uncertain Rules in Event Composition Systems. *Proceedings of the 21st Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, UAI 2005 (Edinburgh, Scotland, July 26–29, 2005)*. AUA Press 2005. Vol. 5. Pp. 599–608.

12. Kersting K., De Raedt L. *Basic Principles of Learning Bayesian Logic Programs*. In: De Raedt L., Frasconi P., Kersting K., Muggleton S. (eds) *Probabilistic Inductive Logic Programming*. Lecture Notes in Computer Science, vol 4911. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. Vol. 4911. Pp 189–221. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-78652-8_7-221.

13. Richardson M., Domingos P. Markov logic networks. *Machine Learning*. 2006. Vol. 62. Pp. 107–136.

14. Dorozhko I. V. Razrabotka i primeneniye dinamicheskix bajesovskix setej doveriya dlya resheniya zadach diagnostirovaniya avtomatizirovanny'x sistem upravleniya slozhny'x tekhnicheskix ob"ektov [Development and application of dynamic Bayesian networks of trust for the solution of problems of diagnosing of automated control systems of difficult technical objects]. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Voenno-transportnogo instituta zheleznodorozhnykh voysk i voennykh soobshcheniy (filial) Voennoy akademii tyla i transporta imeni generala armii A. V. Khruleva* [Scientific and technical collection of the Military transport Institute of railway troops and military communications (branch) of the Military Academy of rear and transport named after army General A. V. Khrulev]. 2011. No. 22. Pp. 24–32. (In Russian)

15. Dorozhko I. V., Osipov N. A. Povy'sheniye dostovernosti rezul'tatov diagnostirovaniya avtomatizirovanny'x sistem upravleniya podgotovkoj i puskom raket-nositelej s ispol'zovaniem bajesovskogo podxoda [Increase in reliability of results of diagnosing of automated control systems for preparation and start-up of carrier rockets with use of Bayesian approach]. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhajskogo* [Proceedings of The military space Academy named after A. F. Mozhaysky]. 2010. No. 627. Pp. 113–120. (In Russian)





МЕТОДИКА СИНТЕЗА ПРИГОДНОЙ ПО ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГРАММЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

ЗАХАРОВА Екатерина Алексеевна,

г. Санкт-Петербург, Россия, Mashenkokatay@mail.ru

ХОМОНЕНКО Анатолий Дмитриевич,

г. Санкт-Петербург, Россия, Khomon@mail.ru

БАРАНОВСКИЙ Анатолий Михайлович,

г. Санкт-Петербург, Россия, Bamvka@mail.ru

KEYWORDS: диагностирование; бортовое оборудование; техническое состояние; байесовская сеть доверия; точностные характеристики, апостериорный вывод.

АННОТАЦИЯ

Современные космические аппараты представляют собой сложные объекты контроля и диагностирования, которые при доработках и частичной модернизации допускают совместную эксплуатацию элементов, имеющих различный объем статистической информации о дефектах и отказах, а порой и полное отсутствие данной информации. При диагностировании бортового оборудования космических аппаратов проблема достоверности принятия решения стоит весьма остро. Низкое качество диагностирования может привести к принятию ошибочных решений технического состояния и негативно повлиять на процессы восстановления работоспособности объекта диагностирования, что приводит к снижению оперативности решения задач, либо к запуску космических аппаратов с неисправным бортовым оборудованием, что означает срыв поставленной целевой задачи. Это требует дальнейшего интенсивного развития новых подходов к определению технического состояния на основе разнородной априорной и текущей информации, так как существующие подходы не достаточно полно отражают протекающие процессы в объекте и системе диагностирования. В связи с этим разработана методика синтеза пригодной по достоверности программы диагностирования бортового оборудования космического аппарата на основе скрытых марковских моделей, основанная на байесовских сетях доверия. Применение байесовских сетей доверия в моделях диагностирования позволяет повысить достоверность результатов диагностирова-

ния за счет возможности учета неопределенности результатов измерений диагностических признаков, динамики априорной информации о техническом состоянии объекта диагностирования, охвата значительного объема диагностических признаков, а также использования параметров закона распределения значений диагностических признаков и точностных характеристик средств измерений. Применение аппарата байесовских сетей доверия существенно дополняет модели и методы решения задач технической диагностики. Представлен пример синтеза пригодной по достоверности программы диагностирования системы управления движением космического аппарата. По мнению авторов, результаты исследований могут представлять интерес для разработчиков средств контроля и испытаний бортового оборудования космических аппаратов как при подготовке космических аппаратов к запуску, так и в полете.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Захарова Е.А., адъюнкт Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского;

Хомоненко А.Д., д.т.н, заведующий кафедрой информационных и вычислительные системы Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, профессор Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского; Барановский А.М., к.т.н, профессор Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.

Для цитирования: Захарова Е.А., Хомоненко А.Д., Барановский А. М. Методика синтеза пригодной по достоверности программы диагностирования бортового оборудования космического аппарата с учетом точностных характеристик средств измерений // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 100-108. doi: 10.24411/2409-5419-2018-10273