

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

Научно-технический журнал
2018. Том 10. № 1

ISSN 2409-5419 (Print)

H&ES
RESEARCH

HIGH TECHNOLOGIES
IN EARTH SPACE RESEARCH

Scientific and Technical Journal
2018. Vol.10. No.1

ISSN 2412-1363 (Online)

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: • 01.01.00 Математика • 05.11.00 Авиационная и ракетно-космическая техника • 05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы • 05.12.00 Радиотехника и связь • 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление.

Учредитель: ООО «ИД Медиа Паблишер». **Издатель:** СВЕТЛАНА ДЫМКОВА. **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.

Язык публикаций: русский, английский.

Периодичность выхода – 6 номеров в год.

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 Арктической академии наук, член-корреспондент Международной академии информатизации, академик Международной академии обороны, безопасности и правопорядка, Действительный член Российской академии естественных наук; **МАНУИЛОВ Ю.С.**, д.т.н., профессор; **МОРОЗОВ А.В.**, д.т.н., профессор, Действительный член Академии военных наук РФ; **МОШАК Н.Н.**, д.т.н., доцент; **ПРОРОК В.Я.**, д.т.н., профессор; **СЕМЕНОВ С.С.**, д.т.н., доцент; **СИНИЦЫН Е.А.**, д.т.н., профессор; **ШАТРАКОВ Ю.Г.**, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ.

Адрес редакции: 111024, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514; 194044, Россия, СПб, Лесной Проспект, 34-36, к. 1, Тел.: +7(911) 194-12-42.

Отдел развития и рекламы: Ольга Дорошкевич, ovd@media-publisher.ru, тел.: 8(916) 951-55-36.

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 Паблишер». 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.

© ООО «ИД Медиа Паблишер» 2018

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: • 01.01.00 Mathematics • 05.07.00 Aviation, space-rocket hardware • 05.11.00 Instrument engineering, metrology and information-measuring devices and systems • 05.12.00 RF technology and communication • 05.13.00 Informatics, computer engineering and control.

Founder: "Media Publisher", LLC. **Publisher:** SVETLANA DYMKOVA.

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.

Language of publications: Russian, English.

Periodicity – 6 issues per year.

Editor in chief: KONSTANTIN LEGKOV

Editorial board: **BOBROWSKY V.I.**, Ph.D., associate professor; **BOBROV V.V.**, Ph.D., professor; **БУДКО П.А.**, Ph.D., professor; **БУДНИКОВ С.А.**, Ph.D., associate professor, Actual Member of the Academy of Education Informatization; **ВЕРХОВА Г.В.**, Ph.D., professor; **ГОНЧАРОВСКИЙ В.С.**, Ph.D., professor, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation; **КОМАШИНСКИЙ В.И.**, Ph.D., professor; **КИРПАНЕВ А.В.**, Ph.D., associate professor; **КУРНОСОВ В.И.**, Ph.D., professor, Academician of Academy of Sciences of the Arctic, corresponding member of the International Academy of Sciences of the Arctic, corresponding member of the International Academy of Informatization, International Academy of defense, security, law and order, Member of the Academy of Natural Sciences; **МАНУИЛОВ Ю.С.**, Ph.D., professor; **МОРОЗОВ А.В.**, Ph.D., professor, Actual Member of the Academy of Military Sciences; **МОШАК Н.Н.**, Ph.D., associate professor; **ПРОРОК В.Я.**, Ph.D., professor; **СЕМЕНОВ С.С.**, Ph.D., associate professor; **СИНИЦЫН Е.А.**, Ph.D., professor; **ШАТРАКОВ Ю.Г.**, Ph.D., professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation.

Address of edition: 111024, Russia, Moscow, st. Aviamotornaya, 8, office 512-514; 194044, Russia, St. Petersburg, Lesnoy av., 34-36, h.1, Phone: +7 (911) 194-12-42.

Development and advertizing department: Olga Doroshkevich, ovd@media-publisher.ru, tel.: 8(916) 951-55-36.

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.

© "Media Publisher", LLC 2018

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Кузнецов В.И., Данилова Т.В., Архипова М.А.

Основные результаты применения автоматизированной системы научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов 4

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ

И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Анютин Н.В., Курбатов К.И., Малай И.М.

Оценка методических погрешностей в алгоритмах антенных измерительных комплексов ближней зоны с планарным типом сканирования 14

Гусев А.А., Волошин А.Э., Яковенко Н.А.

Прогнозирование часовой динамики солнечного ветра с помощью модели нечеткого индуктивного рассуждения 22

Кравцов А.Н, Величко А.Ю., Усиков В.Д.

Подход к оперативному контролю качества компонентов жидкого ракетного топлива при долгосрочном хранении в резервуарах на заправочных станциях 29

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Плаксенко О.А., Щирий А.О.

Отечественная система автоматизированного проектирования радиолокационных систем, комплексов и станций с учетом средств воздушно-космического нападения 40

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Лобанов А.В., Ашарина И.В, Гришин В.Ю., Сиренко В.Г.

Макетный образец высокоадаптивной распределенной сетевцентрической многокомплексной сбое- и отказоустойчивой управляющей системы - актуальная проблема 48

Минаков Е.П., Тарасов А.Г., Кравцов В.В.

Задача определения маршрутов движения однотипных робототехнических систем ликвидации экстремальных ситуаций при групповом способе их применения 59

Смирнов В.А., Смирнов Д.В.

Подход к прогнозированию дрейфа критических параметров бортовой системы управления на основе модифицированного иммунного алгоритма 69

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Василевский А.В., Великоиваненко В.И., Жиганов В.Н., Тюрина Д. Д.

Методика оценки рисков и прогнозирования их последствий при изменении состава мероприятий Федеральной космической программы России на 2016–2025 годы в части космических систем и комплексов двойного и социально-экономического назначения 82

Пророк В.Я., Халиков Э.М., Охотников Ю.Ю., Шаймухаметов Ш.И.

Алгоритм формирования строга сопровождения по маневрирующим летательным аппаратам на основе нечеткого логического вывода 100

CONTENTS

AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

Kuznetsov V.I., Danilova T.V., Arkhipova M.A.

The main results of application of the automated system of scientific researches and development in her environment of methods and algorithms of autonomous navigation and orientation of spacecrafts 4

INSTRUMENT, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

Anyutin N.V., Kurbatov K.I., Malay I.M.

Estimation of methodological errors in the algorithms of antenna measurement complexes with planar scanning 14

Gusev A.A., Voloshin A.E., Yakovenko N.A.

Forecasting of a solar wind hour dynamics with the fuzzy inductive reasoning model 22

Kravtsov A.N., Velichko A.J., Usikov V.D.

The approach to operational quality control of components of liquid rocket fuel during long term storage in tanks at petrol stations 29

RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

Konovalchik A.P., Konopelkyn M. Y., Plaksenko O. A., Schiriy A. O.

Russian computer-aided design of radar systems, systems and stations within the means of aerospace attack 40

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Lobanov A.V., Asharina I.V., Grishin V.Yu., Sirenko V.G.

A prototype of a highly adaptive, distributed, net-centric, multicomplex malfunction-and fault-tolerant control system – a topical problem 48

Minakov E.P., Tarasov A.G., Kravtsov V.V.

The problem of determining routes of similar robotic systems eliminate emergency situations in case of group method of application 59

Smirnov V.A., Smirnov D.V.

Approach to predicting the drift of critical parameters of an onboard control system on the basis of the modified immune algorithm 69

PUBLICATIONS IN ENGLISH

AVIATION, SPACE-ROCKET HARDWARE

Vasilevsky A.V., Velikoivanenko V.I., Bandits V.N., Turina D.D.

Methods of risk assessment and forecasting of their consequences changes in the composition of activities of the Federal space program of Russia for 2016 and 2025, part of the space systems and complexes of double and socio-economic purposes 82

Prorok V.Y., Khalikov E.M., Okhotnikov Y.Y., Shaymukhametov S.I.

The tracking strobe formation algorithm on the maneuvering aircrafts on the basis of an fuzzy logical conclusion 100

doi 10.24411/2409-5419-2018-10014

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

КУЗНЕЦОВ

Владислав Иванович¹

ДАНИЛОВА

Тамара Валентиновна²

АРХИПОВА

Марина Александровна³

АННОТАЦИЯ

Представлено краткое описание автоматизированной системы научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов. Автоматизированная система научных исследований – сложная система, объединяющая с одной стороны подсистему разработки и применения инструментальной среды, ответственной за корректный учет специфики предметной области, с другой – подсистему управления, создающую равные возможности исследования многих разновидностей моделей предметной области. Автоматизированная система научных исследований построена аналогично системам управления технологическими процессами с различными контурами обратной связи, с широкой степенью визуализации процесса решения задачи. Созданные в инструментальной среде имитационные модели различных методов и алгоритмов частично известны из общей практики, либо модифицированы, либо разработаны. Всего рассмотрены четырнадцать методов автономной навигации и четыре метода автономной навигации и ориентации. Построенные по единой методике, они представляют общность возможностей анализа и синтеза системы автономной навигации и ориентации, способствующих выбору алгоритмов при удовлетворении целей и задач полета космических аппаратов. Представлены основные научные результаты, полученные при моделировании и исследованиях в данной предметной области. Наиболее современны разработки астрономических систем автономной навигации и ориентации на основе использования оптико-электронных приборов с зарядовой связью. В этом ряду перспективен разработанный метод по виртуальным измерениям зенитных расстояний звезд. Метод защищен двумя патентами. В этом методе удалось решать задачи навигации и ориентации, используя одинаковую информацию: измерения яркости и приборных координат предварительно распознанных звезд. Более того, на основе этой же информации оказалось возможным построение многофункциональной системы автономной навигации и ориентации космических аппаратов, позволяющей сделать определенные логические выводы из ситуационной обстановки на орбите.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автономная навигация; автономная ориентация; самоопределение; автоматизированная система научных исследований; оптимальная стратегия измерений.

Сведения об авторах:

¹д.т.н., с.н.с, старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, vladislav.kuzn@yandex.ru,

²к.т.н., старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, danitoma58@yandex.ru,

³старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, marina_arhipova@mail.ru

Для цитирования: Кузнецов В. И., Данилова Т. В., Архипова М. А. Основные результаты применения автоматизированной системы научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 1. С. 4-14. doi 10.24411/2409-5419-2018-10014

Термин «автономная навигация и ориентация космических аппаратов (КА)» несет на себе смысл, который больше проясняется словом «самоопределение», т. е. подразумевается такое определение собственной орбиты и ориентации в пространстве, для которого достаточно средств самого КА. Сложность такой задачи и состояние бортовых вычислительных и измерительных средств сравнительно долго не позволяли ее реально решать. Но уже в первом десятилетии после запуска первого искусственного спутника Земли появляются научные исследования и защищаются диссертации по данной тематике. Как нам представляется, в настоящее время, благодаря успехам отечественной и мировой науки и техники, исчезли технические причины, сдерживавшие разработку систем автономной навигации и ориентации (САНиО).

Представляется, что теперь нужна лишь человеческая воля.

Тем не менее, в системе ГЛОНАСС до сих пор орбиты КА определяются в наземном комплексе управления, а КА системы лишь транслируют эту информацию, размножая эфемериды между закладками. Правда, алгоритм, функционирующий на КА ГЛОНАСС, на определенный промежуток времени может прогнозировать свою орбиту, но качество этого прогноза с течением времени неизбежно ухудшается, т. е. ГЛОНАСС не является системой автономной навигации и, тем более, ориентации. Хотя в последнее время можно услышать и обратное ошибочное мнение.

Конечно, определение орбиты любым КА с помощью сигналов КА ГЛОНАСС создает впечатление автономности навигации для самого определяющегося КА, но оно поверхностно, ибо в основе этого факта лежит определение наземным комплексом орбит КА ГЛОНАСС и использование определенной части информационного поля ГЛОНАСС.

САНиО создают робототехническое качество КА, ибо владение собственной орбитой и ориентацией закладывает основу возможности самостоятельного решения и других задач, связанных с ситуационной обстановкой на орбите, как минимум, упрощается управление аппаратом с Земли.

Подчеркнем, что это качество любой КА может приобрести с помощью САНиО без какого-либо влияния других информационных полей и систем.

Само по себе определение орбиты центра масс КА при различных возмущающих воздействиях космических факторов достаточно сложно, поэтому определение орбиты иногда рассматривается отдельно от определения углового движения корпуса относительно центра масс. Однако часто необходимо иметь данные оценки одновременно. При решении этих задач совместно на борту КА уровень сложности решаемой проблемы еще более повышается из-за необходимости подбора измерительных средств для решения обеих задач.

Единственный метод всестороннего исследования проблем автономной навигации и ориентации — имитационное моделирование на ЭВМ.

Несмотря на то, что история решения различными исследователями задач автономной навигации и ориентации насчитывает уже много лет, до недавних пор не были разработаны общие методологические основы моделирования решений таких задач, не разрабатывалась инструментальная среда, в которой это моделирование осуществлялось бы удобно, быстро и всесторонне, а исследования процессов, протекающих при решении этих задач, были бы, как минимум, рациональными или, по возможности, оптимальными, глубокими и наглядными.

С целью ускорения развития теории и практики моделирования задач САНиО за период 1990–2006 годов в ВКА имени А. Ф. Можайского была разработана автоматизированная система научных исследований (АСНИ) методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации. Была написана монография об основах построения АСНИ и решении с помощью ее проблем автономной навигации и ориентации любых КА [1], а также по мере достижения успехов в исследованиях — вторая монография, где определена роль автономной астрономической навигации и ориентации в теории и практике навигационного обеспечения, применяемого в ВС РФ [2].

Общий объем этих материалов содержит около тысяч страниц. Результаты разработки АСНИ докладывались на I, II и III конференциях Космических Войск [3], проводившихся в академии; на VI и VII Всероссийских конференциях по фундаментальному и прикладному координатно-временному и навигационному обеспечению в Институте прикладной астрономии [4].

Поэтому, чтобы не повторяться в деталях описания АСНИ и теории автономной навигации и ориентации, отметим лишь некоторые особенности системы. Были разработаны две версии АСНИ — версия 1.0 и версия 1.1 [5]. Обе версии написаны с использованием языка Pascal, инструментальная среда моделирования версии 1.0 разработана с помощью комплекса Turbo Pascal Professional, а версия 1.1 — с помощью среды программирования C++ Builder 6.0 и HTML-редактора.

В версии 1.0, в основном, было выяснено «что» и «как», и «в каком объеме» можно моделировать интересующие нас проблемы на языке Pascal, т. е. определены структура и архитектура инструментальной среды. Сейчас эта версия стала неактуальной.

В версии 1.1 более мощные средства программирования позволили создать рабочую версию системы, которая описана в упомянутых основных источниках [1–2], а также [6–12].

В АСНИ, версия 1.1, используя разработанную инструментальную среду, соединены необходимые средства

для всестороннего изучения, исследования и разработки САНиО на любых орбитах, практически при всех составах бортовых измерений.

Все программы обладают дружественным интерфейсом. По своим функциям их можно условно разделить на исследовательские, сервисные и управленческие. Исследовательские программы реализуют либо алгоритмы определенного метода решения задачи, либо посвящены отдельным частным или вспомогательным вопросам, решения которых либо входят в общий алгоритм метода, либо формируют исходные данные для запуска метода.

Управленческие программы организуют общее направление выбранного исследования. Сервисные программы демонстрируют функционирование программы в целом в космическом пространстве, а также отдельно решение своих задач определенными частями программ. Все программы написаны по типу «сверху в низ». Общие узлы программ, свойственные всем или большинству методов, оформлены в виде модулей. Т.е. программа каждого метода содержит файл исходных данных, список используемых модулей, алгоритм, соответствующий измеряемым параметрам, их частным производным и результаты расчетов, которые могут быть записаны в базу решений соответствующего метода.

В обобщенном виде структура АСНИ, версия 1.1, включает основные разделы:

- баллистический анализ, используемый с точки зрения полезности для автономной навигации;
- автономная навигация;
- автономная навигация и ориентация;
- космические навигационные системы (КНС);
- межпланетный перелет;
- электронный учебник по основам теории автономной навигации и ориентации.

Структуру поддерживают две бортовые базы звезд, разработанные на основе фундаментальных каталогов FK-5 и Hipparcos.

Баллистический анализ включает возможные предварительные расчеты согласно представляемым темам по методам числового интегрирования уравнений движения КА, функционированию отдельных приборов, видимостью навигационных ориентиров, представлению области неопределенности, в условиях которых будут решаться задачи навигации и ориентации. В конце анализа могут быть переданы соответствующие данные в исследовательские программы.

Всего в системе свыше сорока исследовательских программ, они посвящены четырнадцати методам автономной навигации и четырем методом автономной навигации и ориентации, их краткие характеристики представлены в [2, стр. 188–190].

Блок программ КНС характеризуется ниже.

Межпланетный перелет содержит программу расчета на заданную дату баллистики движения Земля–Венера, Марс и обратно, визуализации фаз перелетов в зависимости от преобладания гравитационного влияния на КА соответствующей планеты или Солнца (1-я фаза — движение у планеты отлета, 2-я фаза — гелиоцентрическое движение, 3-ья фаза — движение относительно планеты перелета), а также определения точности автономной навигации КА при различных измеряемых параметрах в течение первой фазы перелета Земля–Марс (Венера).

Электронный учебник содержит 24 основных тем, относящихся к предметной области, а также описание схемы расчетов математического программирования и теории решения задач синхронизации шкал КА на основе приема сигналов пульсаров.

Предусматривались два основных режима исследований: однократное, называемое иногда в текстах программ одноразовым, или статистическое. Однократное исследование чаще используется как прикидочное и в базу решений метода, как правило, не записывается. Статистическое исследование может быть различной направленности:

- набор решений в темпе орбитальных движений, когда последующее решение начинается с окончания предыдущего (например, по виткам);
- когда решения повторяются с одинаковыми исходными данными, но изменяются некоторые параметры задания;
- по представленному плану, включающему различные сочетания процессов «решение задач» или «прогнозный расчет орбиты»;
- набор статистики может быть автоматическим или ручным.

Каждый временной ряд заканчивается расчетом математических ожиданий и среднего квадратического отклонения всех параметров уточненной опорной орбиты от фактической.

Результаты статистических исследований являются предпочтительными, и различные решения задач, в том числе и оценки свойств методов, сравниваются на этом уровне.

Базы решений методов содержат, как правило, сотни записей, временной ряд каждой записи содержит до 35 однократных решений.

В комментарии к записи отражается оценка исследователем данной статистики.

Совокупная протяженность непрерывных статистических решений может достигать до года и более.

Исследования в среде АСНИ, версия 1.1, привели к решению ряда проблем автономной навигации и ориентации. Основные научные результаты, полученные к настоящему времени можно охарактеризовать следующими положениями.

1. Наиболее прогрессивен метод навигации и ориентации по виртуальным измерениям зенитных расстояний звезд (ВИЗРЗ) [8–9, 13–14], основанный на измерениях приборных координат и яркости звезд в оптико-электронных приборах (ОЭП). В этом методе реализован принцип оптимального расположения навигационных ориентиров, требующий при их минимизации, чтобы один ориентир находился в плоскости орбиты, другой — в ее полюсе; применен минимальный по погрешности расчет виртуального зенитного угла предварительно выбранной на основании параметров опорной орбиты субоптимальной яркой звезды. Виртуальным методом назван потому, что местная вертикаль фактически не строится, а требуемый угол рассчитывается относительно координат орта радиус-вектора орбиты в текущей орбитальной системе координат (ТОСК) и преобразованных в эту же систему измеренных приборных координат предварительно распознанных звезд. Оригинальность расчета заключается в том, что он проводится не в той системе координат, в которой потом проводится решение навигационной задачи. В результате получен простой и точный алгоритм, который к тому же решает обе задачи — навигации и ориентации — по одинаковой исходной информации и по схожему алгоритму, но с использованием различных частных производных.

При средней квадратической погрешности измерений в ОЭП приборных координат звезд, равной $0,1''$, статистическая точность навигации на любых орбитах достигает порядка единиц метров по положению и по модулю вектора скорости около $0,1$ мм/с, практически при любой погрешности знания опорной орбиты.

Статистическая точность ориентации при колебании осей ТОСК относительно связанной с корпусом КА системы координат до 5° по каждой из осей и погрешности ОЭП в $0,1''$ не превосходит единиц и долей секунд. Моделировались погрешности силовой гироскопической или магнито-гравитационной стабилизаций.

Для реализации метода по ВИЗРЗ необходимы два ОЭП в кардановых подвесах и один — жестко закрепленный на корпусе КА, т. е. метод не требует от КА значительных весогабаритных нагрузок, обладая высокой помехоустойчивостью и скрытностью.

2. Был усовершенствован известный метод так называемый взаимной навигации КА путем исключения активного способа измерения дальности между аппаратами. Этого достигли увеличением при визировании аппарата числа видимых звезд, используемых в измерениях, и расчете частных производных до пяти (в классическом методе предполагалось использовать одну–две звезды).

Отметим, что, используя метод взаимной навигации в классическом варианте, был разработан ряд программ для космических навигационных систем Цикада и ГЛО-НАСС с целью их объединения для повышения качества

навигационного поля. При этом разработан оригинальный алгоритм, позволяющий получать оценки обоих КА при отсутствии оптической видимости наблюдаемого КА [15].

Усовершенствованный взаимный метод был назван взаимным угловым. В нем по-прежнему сохранена возможность оценивать как параметры обоих аппаратов (двенадцатимерная задача), так и одного (шестимерная задача). Причем во втором случае точность определяемых оценок, конечно, зависит от знания орбиты второго аппарата. Чтобы исключить последнее, взаимный угловой метод был, в свою очередь, доработан. Модифицированный метод, названный методом слежения [10–11], определяет только орбиту визируемого аппарата. При этом полагается, что орбита визирующего КА известна и определяется на основе метода по ВИЗРЗ. Высокие оценки орбиты визируемого аппарата достигаются на основе измерений в двух ОЭП. Один по-прежнему жестко закреплен на корпусе визирующего аппарата и используется для оценки его геоцентрической ориентации и расчета начальных углов поворота для визирования согласно опорным знаниям орбиты визируемого аппарата, а затем и для контроля визирования. Второй ОЭП, находящийся в кардановом подвесе визирующего аппарата, наводится на визируемый КА и измеряет приборные координаты и яркость попавших в поле зрения звезд. По этой информации распознаются звезды, и уточняется орбита визируемого аппарата. При постоянном слежении (минимум часть или один виток) по специальному алгоритму [10] оценивается факт изменения орбиты. При резком изменении орбиты, например, при импульсе порядка 50 – 100 м/с, оценивание может произойти практически мгновенно или в течение порядка $0,1$ витка; импульс порядка 1 – 3 м/с может быть зафиксирован в течение одного или на следующем витке. Факт изменения орбиты определяется на основе анализа сумм поправок в координатах и составляющих скорости визируемого КА и сумм невязок измерений за определенный промежуток времени.

3. Из описания рассмотренных методов следует, что они близки по составам измерителей, по виду измеряемых параметров и в совокупности могут решать различные задачи, связанные с оценками орбитального движения на основе алгоритма [12].

Текущее точное определение собственной орбиты и орбиты наблюдаемого КА (наблюдаемых, если на борту больше двух ОЭП в кардановых подвесах) позволяет программно из результатов расчета сделать некоторые интеллектуальные выводы:

– по предварительному анализу опорных орбит оценить возможность решения навигационной задачи при слежении на следующем витке, т. е. сделать вывод о замене режима определения орбиты прогнозом движения, предвосхищая тем самым аварийное решение задачи слежения;

– по анализу получаемых витков за витком оценок орбиты наблюдаемого КА и отсутствию изменения оценок собственной орбиты сделать оперативный вывод об изменении орбиты наблюдаемого КА;

– оценивая расстояние между аппаратами, сделать вывод об опасном сближении и необходимости оперативной коррекции своей орбиты.

Вообще, САНиО по своему основному назначению, как средство самоопределения, может быть удачно использовано при различных движениях: в лунной программе на траектории Земля–Луна–Земля и в орбитальном движении при создании лунных поселений и обслуживании их. Они могут также использоваться при обеспечении межпланетных полетов, по крайней мере, в Солнечной системе. САНиО также будут, пожалуй, являться единственным контрольным средством при планетоцентрическом движении, использоваться при принятии решений об изменении орбиты КА по результатам наблюдения поверхности планеты, а также о посадке КА на планету. Не лишним будет использование САНиО и при посещении астероидов и подобных им объектов, а также при посещении спутников различных планет. Для лунного координирования и обеспечения связи, очевидно, придется создавать космические навигационные системы на базе КА, снабженных САНиО.

В процессе проведения экспериментов в АСНИ, версии 1.1, получен первый опыт моделирования баллистики движения при межпланетных полетах. Разработанные программы по заданной дате рассчитывают целесообразную дату отлета, которая приводит к движению, близкому к оптимальному по энергетике полуэллипсу Хомана. Определяется приблизительное время перелета, по полученным данным рассчитывается приближенное гелиоцентрическое движение, которое уточняется в зависимости от задаваемых параметров эллиптических и гиперболических орбит вокруг планет отлета и прилета. Интерактивно строится таблица данных движения по фазам перелета. Результаты моделирования показали, что, например, при использовании метода по ВИЗРЗ (три ОЭП: один — жестко на корпусе, два — в кардановых подвесах) со среднеквадратической погрешностью в $0,1''$ искомую границу первой фазы перелета Земля–планета КА может пересечь с точностью знания своего вектора геоцентрического состояния в первые сотни метров по положению и единицы сантиметров в секунду по модулю вектора скорости. Возможно, такую точность можно сохранить и при гелиоцентрическом движении и далее до планетоцентрической орбиты.

4. Описанные САНиО были созданы при разработке ряда частных алгоритмов, из них наиболее значимы, прежде всего, три алгоритма.

Первый — алгоритм распознавания звезд на основе знания только опорной орбиты КА или знания ее фактиче-

ской орбиты [2, 7]. Ценность алгоритма заключается в его направленности на поиск рациональных значений коэффициентов фильтров, участвующих в расчетах матриц измеренных взаимных угловых расстояний звезд; в сравнении этих матриц с матрицами фактических угловых расстояний, выбираемых из бортового каталога звезд [2, стр. 64–69]. Для контроля процесса распознавания важен разработанный алгоритм визуализации. Новым шагом является и распознавание звезд на основе использования только опорной орбиты [7].

Второй — алгоритм оптимальной стратегии навигационных измерений на основе решения неклассической вариационной задачи, сведенной к задаче управления [6]. Взяв за основу эту работу, рассчитанную для кеплерова движения и для формирования решения на основе минимизации дисперсии одного параметра, модифицировав ее для возмущенных движений и использования широкого спектра минимизируемых функционалов, был получен многофункциональный оптимальный алгоритм для реальных условий решения навигационной задачи при массовых измерениях по нескольким критериям оптимальности в линейном и циклическом режиме расчетов [2, стр. 77–113], [16].

Третий — устойчивый и высокоточный алгоритм оценки ориентации корпуса КА, работоспособный при всех значениях погрешностей системы стабилизации от 0° до 15° по каждой из осей. Оригинальность алгоритма заключается в том, что он внешне повторяет алгоритм решения навигационной задачи и использует те же измерения — приборные координаты и яркость звезд, — но частные производные строятся относительно погрешностей углов ориентации. При этом данный алгоритм получился менее требовательным к погрешностям оценок упомянутых координат, чем в алгоритме навигации [1, т. 1, стр. 149–155].

Все три алгоритма поддерживают большинство методов автономной навигации и все методы автономной навигации и ориентации КА.

5. В процессе разработки АСНИ, версии 1.1, были получены и новые результаты, которые использовались, в основном, в методах автономной навигации. Был разработан и исследован алгоритм модификации метода наименьших квадратов, не требующий обращения матрицы [1, т. 1, стр. 158–162]. Очевидно, при использовании плохо обусловленных матриц этот алгоритм будет весьма полезен. Точность навигации при классическом и модернизированном алгоритмах наблюдалась одинаковой, но время решения задачи после модификации алгоритма уменьшилось.

Была также разработана и исследована модель построения оптической вертикали на борту КА [17], основанная на проектировании видимой фазы Земли на картинную плоскость, т. е. плоскость, проходящую через центр

геоида и перпендикулярную лучу зрения, направленному с КА к геоиду. Математическая модель основывается на фиксации с определенной точностью пяти точек, приблизительно равномерно расположенных по дуге видимой части «серпа» и использовании общего уравнения конических сечений, не проходящих через начало координат. Программа имеет два режима: с ограничением угла Солнце–КА и без ограничения. Точность решения навигационной задачи по измерениям фактических зенитных расстояний двух звезд при оптической вертикали представлена в [1], наивысшая точность достигает порядка 150 м по положению и единиц сантиметров в секунду по модулю вектора скорости для низкоорбитных КА.

Таким образом, разработанная впервые в отечественной науке и практике АСНИ методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации КА, оценивающая широкий спектр движения в космосе, позволила получить новые научные результаты, которые изменяют облик КА, приближая их к робототехническим устройствам.

Следует отметить, что исследования в среде АСНИ, версия 1.1, способствуют решению ряда теоретических проблем практики, ибо эта система позволяет:

- получить гарантированную статистическую оценку точности различных методов автономной навигации и ориентации КА,
- определить, с одной стороны, алгоритм и условия, повышающие точность навигационных оценок и точность определения ориентации КА, с другой — минимизировать число измерителей и измерений, доставляющих заданную точность знания орбиты и ориентации КА,

получить гарантированную статистическую оценку чувствительности навигации и ориентации к любым факторам космического полета, шумам модели движения, погрешностям измерений и альтернативам алгоритма.

В результате создаются объективные возможности выбора рациональных методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации в соответствии с условиями и целями полета КА на любой отрезок времени.

Предлагаемая многофункциональная САНиО [12], решающая ряд задач навигации и ориентации, благодаря таким ее положительным качествам:

- универсальность, т.е. применимость для любых околоземных орбит и орбит достижения других планет Солнечной системы,
- малые весогабаритные характеристики измерителей,
- пассивность измерений,
- устойчивость к возмущениям орбит,
- высокая точность решения задач,

может являться своего рода стандартом для автономных систем навигации и ориентации различных классов КА.

В процессе разработки АСНИ были защищены две кандидатские диссертации.

Ряд разработанных и исследованных в среде АСНИ новых тем опубликованы в изданиях, поддерживаемых ВАК (всего 12 статей за 2002–2017 годы), часть из них защищены патентами.

Идея предварительной разработки АСНИ для построения программ различных алгоритмов и методов проблемы автономной навигации и ориентации КА оказалась продуктивной.

Литература

1. Кузнецов В. И. Автоматизированная система научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов: Монография: в 2 т. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2010. Т. 1. 289 с. Т. 2. 164 с.
2. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Теория и практика навигационного обеспечения применения ВС РФ: Монография. Часть 2. Автономная астрономическая навигация и ориентация космических аппаратов. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2015. 233 с.
3. Кузнецов В. И., Смолицкий Х. Л., Силов В. Н., Данилова Т. В. Новая система автономной навигации и ориентации, пригодная для любых орбит КА // Сборник трудов I Военно-научной конференции Космических войск (Санкт-Петербург, 29–30 октября 2002). МО РФ, 2003. Т. 2. С. 315–319.
4. Кузнецов В. И., Данилова Т. В., Архипова М. А. Автономный метод определения оценок параметров орбиты и ориентации космического аппарата при отсутствии априорной информации // Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение: сб. трудов VI Всероссийской конференции (Санкт-Петербург, 20–24 апреля 2015). СПб.: Труды Института прикладной астрономии РАН, 2016. Вып. 38. С. 38–43.
5. Свидетельство РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ 2013617182. Программный комплекс расчетно-информационного обеспечения автоматизированной системы научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов (АСНИ 1.1) / Кузнецов В. И., Данилова Т. В., Архипова М. А. Заявл. 19.06.2013. Оpubл. 20.09.2013.
6. Козлов Н. Н. Об оптимизации процесса траекторных измерений // Космические исследования, 1971. Т. 9. Вып. 1. С. 3–15.
7. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Алгоритмы распознавания «рабочих» звезд по звездному полю // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 16–23.
8. Патент РФ 2454631. Способ автономной навигации и ориентации космических аппаратов на основе виртуальных измерений зенитных расстояний звезд / Кузнецов В. И., Данилова Т. В., Косулин Д. М. Заявл. 28.10.2010. Оpubл. 27.06.2012. Бюл. № 18. 12 с.

9. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Система автономной навигации и ориентации ИСЗ, основанная на виртуальных измерениях зенитных расстояний звезд // Космические исследования. 2011. Т. 49. № 6. С. 555–562.

10. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Автономная астрономическая система навигации и слежения // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 8. С. 167–172.

11. Патент РФ 2624408. Способ автономного оценивания изменений орбиты визируемого космического аппарата / Кузнецов В. И., Данилова Т. В., Архипова М. А. Заявл. 01.12.15. Оpubл. 03.07.2017. Бюл. № 19. 22 с.

12. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Многофункциональная астрономическая самоорганизующаяся система автономной навигации и ориентации искусственных спутников Земли // Космические исследования. 2017. Т. 55. № 2. С. 150–166.

13. Кузнецов В. И., Смолицкий Х. Л., Данилова Т. В. Метод автономной астрономической навигации и ориен-

тации ИСЗ // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 5–16.

14. Патент РФ 2318188. Способ автономной навигации и ориентации космических аппаратов / Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Заявл. 17.07.2006. Оpubл. 27.02.2008. Бюл. № 6. 10 с.

15. Кузнецов В. И. Система автономного определения орбит космических аппаратов спутниковых радионавигационных систем // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 5. С. 3–9.

16. Кузнецов В. И., Силов В. Н., Данилова Т. В. Алгоритмы и программы оптимальной стратегии измерений в задачах автономной навигации космических аппаратов // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 43–50.

17. Смолицкий Х. Л., Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Модель оптического построителя местной вертикали ИСЗ // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2005. Т. 48. № 5. С. 45–52.

THE MAIN RESULTS OF APPLICATION OF THE AUTOMATED SYSTEM OF SCIENTIFIC RESEARCH OF METHODS AND ALGORITHMS OF AUTONOMOUS NAVIGATION AND ORIENTATION OF SPACECRAFTS

VLADISLAV I. KUZNETSOV,

St. Petersburg, Russia, vladislav.kuzn@yandex.ru

TAMARA V. DANILOVA,

St. Petersburg, Russia, danitoma58@yandex.ru

MARINA A. ARKHIPOVA,

St. Petersburg, Russia, marina_arhipova@mail.ru

KEYWORDS: autonomous navigation; autonomous orientation; self-determination; automated system of scientific researches; optimum measurements strategy.

ABSTRACT

It is presented the short description of the automated system of scientific research (ASSR) of methods and algorithms of autonomous navigation and orientation of the spacecrafts (SC). ASSR is a complex system uniting, on the one hand, a subsystem of development and application of an instrumental environment responsible for correct accounting of specifics of subject domain, and on the other hand - the subsystem of management creating equal opportunities of a research of many varieties of models of subject domain. ASSR is constructed similar to process control systems with various contours of feedback, with wide extent of visualization of process of the solution of a task. The imitating models

of various methods and algorithms created in the instrumental environment are partially known from the general practice, or are modified by us, or developed by us. The fourteen methods of autonomous navigation and four methods of autonomous navigation and orientation are considered. Constructed by a uniform technique, they represent community of opportunities of the analysis and the synthesis of system of autonomous navigation and orientation promoting the choice of algorithms at satisfaction of the purposes and problems of flight of SC. The main scientific results received during the modeling and researches in this subject domain are presented. Developments of astronomical systems of au-

onomous navigation and orientation on the basis of use of optical-electronic devices with charge coupling instrumental are most modern. The method developed by us on virtual measurements of zenith distances of stars is perspective. The method is protected by two patents. In this method it was succeeded to solve problems of navigation and orientation using the same information: measurements of brightness and instrument coordinates of previously recognizable stars. Based on the same information, it was possible to build a multifunctional system of autonomous navigation and SC orientation, which allows making certain logical conclusions from the situation in orbit.

REFERENCES

1. Kuznetsov V.I. *Avtomatizirovannaya sistema nauchnykh issledovaniy metodov i algoritmov avtonomnoy navigatsii i orientatsii kosmicheskikh apparatov* [Automated system scientific research of methods and algorithms autonomous navigation and orientation of spacecrafts: Monograph. In 2 vol.]. St. Petersburg: Military Space Academy of A. F. Mozhaysky, 2010. Vol. 1. 289 p. Vol. 2. 164 p. (In Russian)
2. Kuznetsov V.I., Danilova T.V. *Teoriya i praktika navigatsionnogo obespecheniya primeneniya VS RF: Monografiya. Chast' 2. Avtonomnaya astronomicheskaya navigatsiya i orientatsiya kosmicheskikh apparatov* [Theory and practice of navigation ensuring application of Armed Forces RF: Monograph. Part 2. Autonomous astronomical navigation and orientation of spacecrafts]. Monograph. St. Petersburg: Military Space Academy of A. F. Mozhaysky, 2015. 233 p. (In Russian)
3. Kuznetsov V.I., Smolitskiy Kh.L., Silov V.N., Danilova T.V. *Novaya sistema avtonomnoy navigatsii i orientatsii, prigodnaya dlya lyubykh orbit kosmicheskikh apparatov* [New system of autonomous navigation and orientation, suitable for any orbital of spacecrafts]. *Sbornik trudov I Voенno-nauchnoy konferentsii Kosmicheskikh voysk* [The collection of works of 1th Military-scientific conference of Space troops, St.-Petersburg, October 29-30, 2002]. The Ministry of Defence of the Russian Federation, 2003. Vol. 2. Pp. 315-319. (In Russian)
4. Kuznetsov V.I., Danilova T.V., Arkhipova M.A. *Avtonomnyy metod opredeleniya otsenok parametrov orbity i orientatsii kosmicheskogo apparata pri otsutstvii apriornoy informatsii* [Autonomous method of definition of estimates of parameters of an orbit and orientation of the spacecraft in the absence of aprioristic information]. *Fundamental'noe i prikladnoe koordinatno-vremennoe i navigatsionnoe obespechenie: sbornik trudov VI Vserossiyskoy konferentsii* [The collection of works of 6th All-Russian conference «Fundamental and applied coordinate-time and navigation providing», St.-Petersburg, April 20-24, 2015]. St.-Petersburg: Transactions of Institute of Applied Astronomy RAS, 2016. Vol. 38. Pp. 38-43. (In Russian)
5. Certificate RF on the state registration of the computer programs 2013617182. *Programmnyy kompleks raschetno-informatsionnogo obespecheniya avtomatizirovannoy sistemy nauchnykh issledovaniy metodov i algoritmov avtonomnoy navigatsii i orientatsii kosmicheskikh apparatov (ASNI 1.1)* [Software complex of calculation-information support of the automated system of scientific research of methods and algorithms of autonomous navigation and orientation of spacecrafts (ASSR1.1)]. Kuznetsov V.I., Danilova T.V., Arkhipova M.A. Declared 19.06.2013. Published 20.09.2013. (In Russian)
6. Kozlov N.N. *Ob optimizatsii protsessa traektornykh izmereniy* [About optimization of process of trajectory measurements]. *Cosmic Research*. 1971. Vol. 9. No 1. Pp. 3-15. (In Russian)
7. Kuznetsov V.I., Danilova T.V. *Algoritmy raspoznavaniya «rabochikh» zvezd po zvezdnomu polyu* [Identification algorithms of «workers» stars on a sidereal field]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2003. Vol. 46. No. 4. Pp. 16-23. (In Russian)
8. Patent RF 2454631. *Sposob avtonomnoy navigatsii i orientatsii kosmicheskikh apparatov na osnove virtual'nykh izmereniy zenitnykh rasstoyaniy zvezd* [Method for autonomous navigation and orientation of spacecraft based on virtual measurements of zenith distances of stars]. Kuznetsov V.I., Danilova T.V., Kosulin D.M. Declared 28.10.2010. Published 27.06.2012. Bulletin No. 18. 12 p. (In Russian)
9. Kuznetsov V.I., Danilova T.V. *A system of autonomous navigation and orientation for satellites based on virtual measurements of zenith distances of stars*. *Cosmic Research*. 2011. Vol. 49. No. 6. Pp. 538-545. (In Russian)
10. Kuznetsov V.I., Danilova T.V. *Avtonomnaya astronomicheskaya sistema navigatsii i slezheniya* [Autonomous astronomical system for navigation and tracking]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2015. Vol. 58. No. 8. Pp. 625-638. (In Russian)
11. Patent RF 2624408. *Sposob avtonomnogo otsenivaniya izmeneniy orbity viziruemogo kosmicheskogo apparata* [Method of autonomous estimation of orbit changes of sighted spacecraft]. Kuznetsov V.I., Danilova T.V., Arkhipova M.A. Declared 01.12.2015. Published 03.07.2017. Bulletin No 19. 22 p. (In Russian)
12. Kuznetsov V.I., Danilova T.V. *Multifunctional astronomical self-organizing system of autonomous navigation and orientation for artificial Earth satellites*. *Cosmic Research*. 2017. Vol. 55. No. 2. Pp. 142-158. (In Russian)
13. Kuznetsov V.I., Smolitskiy Kh.L., Danilova T.V. *Metod avtonomnoy astronomicheskoy navigatsii i orientatsii ISZ* [Method of autonomous astronomical navigation and orientation for artificial Earth satellites]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2003. Vol. 46. No. 4. Pp. 5-16. (In Russian)
14. Patent RF 2318188. *Sposob avtonomnoy navigatsii i orientatsii kosmicheskikh apparatov* [The method of autonomous

navigation and orientation of spacecrafts]. Kuznetsov V.I., Danilova T.V. Declared 17.07.2006. Published 27.02.2008. Bulletin No. 6. 10 p. (In Russian)

15. Kuznetsov V.I. Sistema avtonomnogo opredeleniya orbit kosmicheskikh apparatov sputnikovykh radionavigatsionnykh system [System of autonomous definition of orbits of spacecrafts of satellite radio navigational systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2008. Vol. 51. No. 5. Pp. 3-9. (In Russian)

16. Kuznetsov V.I., Silov V.N., Danilova T.V. Algoritmy i programmy optimal'noy strategii izmereniy v zadachakh avtonomnoy navigatsii kosmicheskikh apparatov [Algorithms and programs of optimum strategy of measurements in problems of autonomous navigation of spacecrafts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instru-

ment Engineering]. 2003. Vol. 46. No. 4. Pp. 43-50. (In Russian)

17. Smolitskiy Kh.L., Kuznetsov V.I., Danilova T.V. Model' opticheskogo postroitelya mestnoy vertikali ISZ [Model of the optical plotter of a local vertical of the artificial Earth satellite]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2005. Vol. 48. No. 5. Pp. 45-52. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Kuznetsov V.I., PhD, Senior Research Officer; Senior Research Officer of the Military Research Institute of Military Space Academy;

Danilova T.V., PhD, Senior Research Officer of the Military Research Institute of Military Space Academy;

Arkhipova M.A., Senior Research Officer of the Military Research Institute of Military Space Academy.

FOR CITATION: Kuznetsov V.I., Danilova T.V., Arkhipova M.A. The main results of application of the automated system of scientific research of methods and algorithms of autonomous navigation and orientation of spacecrafts. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 1. Pp. 4-12. doi 10.24411/2409-5419-2018-10014 (In Russian)

Transport Networks Russia 2018

Развитие телекоммуникационных
транспортных сетей в России и СНГ

Докладчики:



Роман Венедиктов,
генеральный директор,
ООО «Пиринг»
(DATAIX)



Михаил Медриш,
независимый эксперт



Александр Власов,
директор
по взаимодействию
с международными
операторами
и роумингу,
ПАО «МегаФон»



Константин Новиков,
руководитель продаж
национальным
операторам связи
и контент провайдерам,
ПАО «МегаФон»



Шамиль Габитов,
директор по работе
с операторами,
China Unicom (Europe)



Алексей Соколов,
директор по развитию
сетевой инфраструктуры,
ООО «Яндекс»



Андрей Колесников,
директор,
Ассоциация участников
рынка интернета вещей



Александр Трохин,
директор по технике
и информационным
технологиям,
ПАО «Московская
городская телефонная
сеть» (МГТС)



Ольга Макарова,
директор Департамента
Интернет и канальных
ресурсов Блока
по развитию операторского
бизнеса Корпоративного
центра, Группа МТС



Сергей Яковлев,
руководитель
Департамента
по работе с
операторами связи,
ЗАО «Компания
ТрансТелеКом» (ТТК)

Организатор:



OTT-партнер:



При участии:



Бронзовые спонсоры:



Партнер сессии:



Зона встреч и переговоров:



Спонсор круглого стола:



- Более 400 участников
- Более 60 докладчиков – операторов, регуляторов и поставщиков оборудования и сервисов
- Более 20 экспонентов
- Более 40 инфопартнеров
- Поддержка ведущих отраслевых ассоциаций и объединений деятелей рынка

Основные темы конференции:

- Глобальный рынок магистральных транспортных сетей. Перспективы развития
- Новые возможности трансграничных переходов и стыков магистральных сетей
- Оптимизация инфраструктуры, используемой магистральными операторами и совместное строительство и эксплуатация сетей связи в России и СНГ
- Использование инфраструктуры ведомств и корпораций для прокладки новых ВОЛС
- Новые технологии в строительстве магистральных линий
- Возможна ли конкуренция между контент-провайдерами и операторами связи на российском рынке?
- Роль точек обмена трафиком на магистральном рынке
- Рынок «темного волокна» в России. Опыт строительства волоконно-оптических систем с последующей продажей волокон операторам сотовой и фиксированной связи

Для регистрации:
+7 495 933 5483,

www.comnews-conferences.ru/tn2018

doi 10.24411/2409-5419-2018-10015

ОЦЕНКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ В АЛГОРИТМАХ АНТЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ С ПЛАНАРНЫМ ТИПОМ СКАНИРОВАНИЯ

АНЮТИН

Николай Викторович¹

КУРБАТОВ

Кирилл Игоревич²

МАЛАЙ

Иван Михайлович³

Сведения об авторах:

¹инженер Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, г.п. Менделеево, Солнечногорский р-н, Московская обл., Россия, anyutin@vniiftri.ru

²инженер Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, г.п. Менделеево, Солнечногорский р-н, Московская обл., Россия, kurbatov@vniiftri.ru

³д.т.н., заместитель генерального директора по радиотехническим и электромагнитным измерениям Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, г.п. Менделеево, Солнечногорский р-н, Московская обл., Россия, malay@vniiftri.ru

АННОТАЦИЯ

В работе анализируются источники методических погрешностей в алгоритмах преобразования поля из ближней зоны в дальнюю зону, применяемых в антенных измерительных комплексах ближней зоны с планарным типом сканирования. Показано, что исходные данные в виде амплитудно-фазовых распределений электрического поля на двух ортогональных поляризациях позволяют восстанавливать диаграмму направленности исследуемой антенны без уменьшения точности из-за отсутствия информации о тангенциальном к поверхности сканирования магнитном поле при следующих допущениях: сканирование осуществляется в радиационной ближней зоне; в области сканирования сосредоточена подавляющая часть потока мощности излучения исследуемой антенны.

В работе также анализируются представленные в литературе варианты расчетных выражений для алгоритмов преобразования поля из ближней зоны в дальнюю зону для антенных измерительных комплексов ближней зоны с планарным типом сканирования. Обсуждаются теоретические и практические результаты их применения на примере данных электродинамического моделирования излучения рупорной антенны и экспериментального измерения плоского амплитудно-фазового распределения поля ее излучения. Показано, что при коррекции восстановленной диаграммы направленности исследуемой антенны на диаграмму направленности зонда требуется учет векторной природы электромагнитного поля. В главных сечениях диаграммы направленности для этого достаточно умножить полярную компоненту электрического поля на косинус полярного угла. Векторное представление Фурье-образа амплитудно-фазового распределения поля также позволяет установить соответствие между теоретическими и практическими результатами применения известных расчетных выражений для алгоритмов преобразования поля из ближней зоны в дальнюю зону. Для произвольных значений азимутального угла предлагается использовать приближенную поправку, введенную для коррекции измеренного амплитудно-фазового распределения на диаграмму направленности зонда.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: антенные измерения; ближняя зона; амплитудно-фазовое распределение; коррекция на зонд; планарное сканирование.

Для цитирования: Анютин Н. В., Курбатов К. И., Малай И. М. Оценка методических погрешностей в алгоритмах антенных измерительных комплексов ближней зоны с планарным типом сканирования // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 1 С. 14–20. doi 10.24411/2409-5419-2018-10015

Прямые измерения характеристик антенн в СВЧ диапазоне сопряжены с большими трудностями на высоких частотах. Возрастающая граница дальней зоны излучения антенн требует увеличения размеров полигона, а, следовательно, и материальных затрат. Антенные измерительные комплексы (АИК) ближней зоны реализуют косвенное измерение характеристик антенн через алгоритмы преобразования поля из ближней зоны в дальнюю зону (БЗ-ДЗ алгоритмы). В отличие от антенных полигонов требование к их размерам формируется только габаритами исследуемых антенн. Среди АИК ближней зоны наибольшее распространение в России получили комплексы с планарным типом сканирования за счет своей простоты и дешевизны. Погрешностям их измерений посвящены работы [1–2], однако методическая составляющая в них не рассматривается.

БЗ-ДЗ алгоритмы планарного сканирования естественным образом сводятся к быстрому преобразованию Фурье. Поле в дальней зоне вычисляется через выражения, содержащие соответствующие Фурье-образы поля, тангенциального к поверхности сканирования. В литературе можно найти ряд схожих расчетных выражений [3–5] для БЗ-ДЗ алгоритмов. Использование отличающихся выражений в АИК ближней зоны с планарным типом сканирования приводит к получению различающихся характеристик антенн и нарушению принципа единства измерений. К этому также добавляется необходимость коррекции восстановленных диаграмм направленности (ДН) на ДН зонда. Ошибки в этой части БЗ-ДЗ алгоритма ведут к получению ошибочных результатов даже по строгим в теоретическом отношении расчетным выражениям.

Обозначенные выше проблемы обсуждались в литературе во время разработки классических БЗ-ДЗ алгоритмов планарного сканирования. Так в [6] затрагивается вопрос о несовпадении коэффициентов в расчетных выражениях [3] и [4]. Автор приходит к простому выводу, что за счет угловой зависимости расхождение оказывается существенным только при больших углах, для которых сами выражения оказываются не применимыми. На момент написания известного обзора по классическим БЗ-ДЗ алгоритмам [7] согласно публикациям в иностранных источниках окончательно утвердились выражения [3]. В нашей стране основным источником по БЗ-ДЗ алгоритмам является [5]. В нем к математически строгому преобразованию векторной формы интеграла Кирхгофа только от электрического поля добавлен косинус полярного угла в полярной компоненте поля в дальней зоне. Этот шаг приводит к значительно лучшему практическому результату применения БЗ-ДЗ алгоритма вместе с поправкой на ДН зонда [8]. Использование же этих выражений для тангенциальной компоненты поля, полученной из электродинамического моделирования, приводит напротив к худшим результатам в сравнении с выражениями [3]. Существующее против-

речие между теоретическими и практическими результатами нуждается в объяснении для определения наиболее корректных расчетных выражений для БЗ-ДЗ алгоритмов планарного сканирования.

Цель работы — анализ расчетных выражений для алгоритмов преобразования поля из ближней зоны в дальнюю зону при планарном сканировании с точки зрения правдоподобности результатов и практической значимости.

Для достижения цели работы проводится теоретический анализ имеющихся в литературе расчетных выражений для классического БЗ-ДЗ алгоритма планарного сканирования. На примере электродинамического моделирования излучения рупорной антенны показываются ограничения расчетных выражений, связанные со сделанными теоретическими допущениями при их выводе. На примере измеренных амплитудно-фазовых распределений (АФР) рупорной антенны показывается роль коррекции восстановленных ДН на ДН зонда в БЗ-ДЗ алгоритме планарного сканирования. Демонстрируется роль векторной природы электромагнитного поля, игнорирование которой в известных работах [7] и [9] приводит к ошибкам коррекции в направлениях по азимутальному углу, не перпендикулярных вектору поляризации зонда. Показано, что в направлениях поляризации зонда учет векторной природы поля приводит к согласию между выражениями [3] и [5]. Предлагаются уточненные расчетные выражения для классического БЗ-ДЗ алгоритма планарного сканирования с учетом поправки на ДН зонда для произвольных полярного и азимутального углов.

Преобразование поля из ближней зоны в дальнюю зону в БЗ-ДЗ алгоритмах планарного сканирования основываются на интеграле Кирхгофа, который является выражением для электромагнитного поля в свободном пространстве через его известные значения на произвольной замкнутой поверхности S , охватывающей все источники. Существует множество форм представления интеграла Кирхгофа в скалярной и векторной формах, однако для дальнейшего анализа наибольшей наглядностью обладают формулы Стрэттона и Чу в Гауссовой симметричной системе единиц [10]:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}) = & \frac{1}{4\pi_s} \oint \left(ik [\vec{n}(\vec{r}'), \vec{H}(\vec{r}')] G(\vec{r}, \vec{r}') - \right. \\ & \left. - [[\vec{n}(\vec{r}'), \vec{E}(\vec{r}')] , \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}')] + \right. \\ & \left. + (\vec{n}(\vec{r}'), \vec{E}(\vec{r}')) \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') \right) dS'; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}(\vec{r}) = & \frac{1}{4\pi_s} \oint \left(ik [\vec{n}(\vec{r}'), \vec{E}(\vec{r}')] G(\vec{r}, \vec{r}') - \right. \\ & \left. - [[\vec{n}(\vec{r}'), \vec{H}(\vec{r}')] , \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}')] - \right. \\ & \left. - (\vec{n}(\vec{r}'), \vec{H}(\vec{r}')) \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') \right) dS'; \end{aligned} \quad (2)$$

где $\vec{E}(\vec{r})$ и $\vec{H}(\vec{r})$ — векторы напряженности электрического и магнитного поля,

k — волновое число,

$G(\vec{r}, \vec{r}') = e^{-ik|\vec{r}-\vec{r}'|}/|\vec{r}-\vec{r}'|$ — функция Грина однородного скалярного уравнения Гельмгольца,

$\vec{n}(\vec{r})$ — вектор единичной внешней нормали к поверхности S .

Слагаемые с

$$(\vec{n}(\vec{r}'), \vec{E}(\vec{r}')) \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') \text{ и } (\vec{n}(\vec{r}'), \vec{H}(\vec{r}')) \vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}')$$

можно рассматривать как произведение поверхностной плотности зарядов на градиент функции Грина. Поскольку (1, 2) подразумевают интегрирование по замкнутой поверхности, то в дальней зоне для СВЧ поля они должны обратиться в ноль. В дальней зоне достаточно знать только один вектор поля, поэтому рассмотрим подробнее (1). Будем считать, что плоская поверхность S замыкается через бесконечность. Градиент функции Грина в дальней зоне асимптотически стремится к

$$\vec{\nabla} G(\vec{r}, \vec{r}') \xrightarrow{k|\vec{r}-\vec{r}'| \rightarrow \infty} -\frac{ike^{-ik|\vec{r}-\vec{r}'|}}{r} \vec{m}(\vec{r}),$$

где $\vec{m}(\vec{r}) = \vec{k}/k$ — единичный вектор направления распространения излучения.

Для плоскости вектор нормали всюду один и тот же $\vec{n}(\vec{r}') = \text{const}$, поэтому его можно вынести за знак интеграла:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}) = & \left[\vec{n}(\vec{r}'), \frac{ik}{4\pi r} \left(\int_S \vec{E}(\vec{r}') e^{-ik|\vec{r}-\vec{r}'|} dS', \vec{m}(\vec{r}) \right) + \right. \\ & \left. + \int_S \vec{H}(\vec{r}') e^{-ik|\vec{r}-\vec{r}'|} dS' \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Заметим, что интегралы по поверхности S с электрическим и магнитным полем есть ни что иное как соответствующие Фурье-образы или плоские волны, распространяющиеся в направлении $\vec{m}(\vec{r})$. В общем случае для расчета поля в дальней зоне по (3) потребуются измерения и электрического, и магнитного полей, однако в радиационной ближней зоне справедливо равенство энергий полей, откуда следует:

$$\begin{aligned} \left[\int_S \vec{E}(\vec{r}') e^{-ik|\vec{r}-\vec{r}'|} dS', \vec{m}(\vec{r}) \right] &= \int_S \vec{H}(\vec{r}') e^{-ik|\vec{r}-\vec{r}'|} dS', \\ \vec{E}(\vec{r}) = & \left[\vec{n}(\vec{r}'), \left[\frac{ik}{2\pi r} \int_S \vec{E}(\vec{r}') e^{-ik|\vec{r}-\vec{r}'|} dS', \vec{m}(\vec{r}) \right] \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, для плоского сканирования при измерении только электрического поля в радиационной ближней зоне получаются строгие в теоретическом отношении расчетные выражения для поля в дальней зоне при следующих условиях:

1. На поверхности сканирования должна быть сосредоточена подавляющая часть потока мощности излучения исследуемой антенны. Это означает, что поле к краям поверхности должно значительно уменьшаться, что справедливо для остронаправленных антенн.

2. Поле излучения исследуемой антенны на поверхности сканирования должно удовлетворять условиям радиационной ближней зоны.

Отметим, что для других типов поверхностей сканирования теоретически строгие выражения не могут быть получены только для электрического или магнитного поля, поскольку вектор нормали $\vec{n}(\vec{r})$ останется под знаком интеграла.

Выражения (3) и (4) неудобны для практического применения. Обратимся к готовым выражениям для поля излучения с плоской апертуры в дальнюю зону [11]. Введем Декартову систему координат с осями Ox и Oy в плоскости S и осью Oz , направленной вдоль $\vec{n}(\vec{r})$. Теперь сферическая часть поля в дальней зоне из (1, 2) может быть записана через компоненты поля на поверхности S :

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E_\theta \\ E_\phi \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} H_\phi \\ -H_\theta \end{pmatrix} = \\ &= \frac{ike^{-ikr}}{4\pi r} \begin{pmatrix} -(S_x^e \cos \phi + S_y^e \sin \phi) + \cos \theta (S_x^m \sin \phi - S_y^m \cos \phi) \\ \cos \theta (S_x^e \sin \phi - S_y^e \cos \phi) + (S_x^m \cos \phi + S_y^m \sin \phi) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$S_{x,y}^e = \int_S E_{x,y} e^{-i(k_x x' + k_y y')} dx' dy', \quad (6)$$

$$S_{x,y}^m = \int_S H_{x,y} e^{-i(k_x x' + k_y y')} dx' dy', \quad (7)$$

где θ и ϕ — полярный и азимутальный углы сферической системы координат.

Принимая во внимание (4), из (5) можно получить расчетные выражения [3]:

$$\begin{pmatrix} E_\theta \\ E_\phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_\phi \\ -H_\theta \end{pmatrix} = -\frac{ike^{-ikr}}{2\pi r} \begin{pmatrix} S_x^e \cos \phi + S_y^e \sin \phi \\ \cos \theta (-S_x^e \sin \phi + S_y^e \cos \phi) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

В работе [4] приводятся выражения, которые можно получить из (5–7) для поля нормально падающей на поверхность сканирования плоской волны:

$$\begin{pmatrix} E_\theta \\ E_\phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_\phi \\ -H_\theta \end{pmatrix} = -\frac{ike^{-ikr}}{2\pi r} (1 + \cos \theta) \begin{pmatrix} S_x^e \cos \phi + S_y^e \sin \phi \\ -S_x^e \sin \phi + S_y^e \cos \phi \end{pmatrix} \quad (9)$$

Наконец, в [5] приведены похожие на предыдущие выражения, явно не выводимые из (5–7):

$$\begin{pmatrix} E_\theta \\ E_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_\varphi \\ -H_\theta \end{pmatrix} = -\frac{ike^{-ikr}}{2\pi r} \cos\theta \begin{pmatrix} S_x^e \cos\varphi + S_y^e \sin\varphi \\ -S_x^e \sin\varphi + S_y^e \cos\varphi \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Анализ вариантов расчетных выражений (8–10) для БЗ-ДЗ алгоритмов планарного сканирования при наложенных ранее условиях проведем на примере рупорной антенны П6–38(А7) на частоте 10 ГГц. Для начала с помощью электродинамического моделирования излучения антенны методом обобщенных моментов [13] и [14] рассчитаем поле на поверхности S в 81×81 эквидистантных точках с шагом 1 см на расстоянии 10 см от раскрыва рупора. Вектор поляризации излучения направлен вдоль оси Oy . Полученные распределения тангенциальной компоненты E_t и всего поля E приведены на рис. 1 и 2. Видно, что вблизи раскрыва рупора его излучение аналогично

плоской волне, как это предполагает (9), однако при удалении от него вектор $\vec{m}(\vec{r}')$ начинает отличаться от $\vec{n}(\vec{r}')$, что должно привести к ошибкам при вычислении (9) на больших углах. Результаты расчета ДН по (8–10) приведены на рис. 3 и 4.

Сразу обратим внимание, что расхождение между расчетом по (8–10) оказывается существенным только при больших значениях угла θ , поскольку это связано исключительно с фактором $\cos\theta$. Как и следовало из анализа компонент тангенциального электрического поля выше, расчет по (9) приводит к максимальному расхождению между восстановленной ДН и рассчитанной напрямую для дальней зоны. Расчет по (8) и (10) в H -плоскости совпадает согласно самим выражениям и позволяет восстановить ДН с отклонением до 3 дБ при угле $\theta < 80^\circ$. В E -плоскости расчет по (8) приводит к аналогичному результату, а по (10) к более худ-

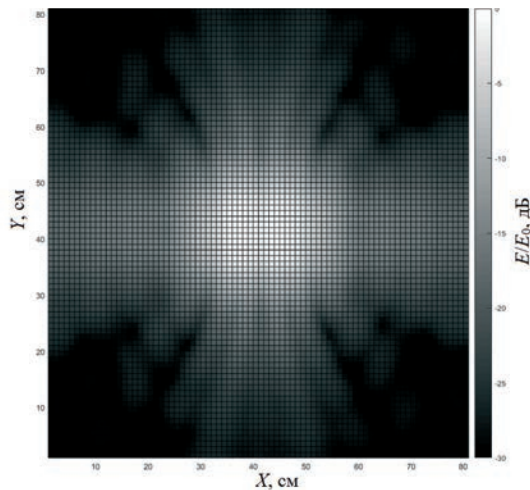


Рис. 1. Тангенциальная компонента электрического поля на поверхности сканирования

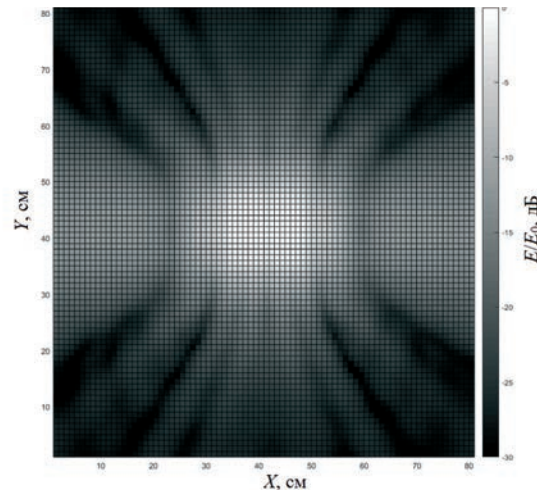


Рис. 2. Электрическое поле на поверхности сканирования

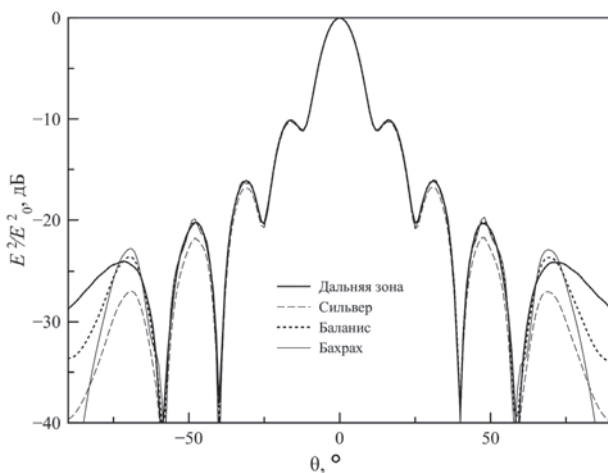


Рис. 3. ДН антенны П6–38(А7) в E -плоскости по результатам моделирования

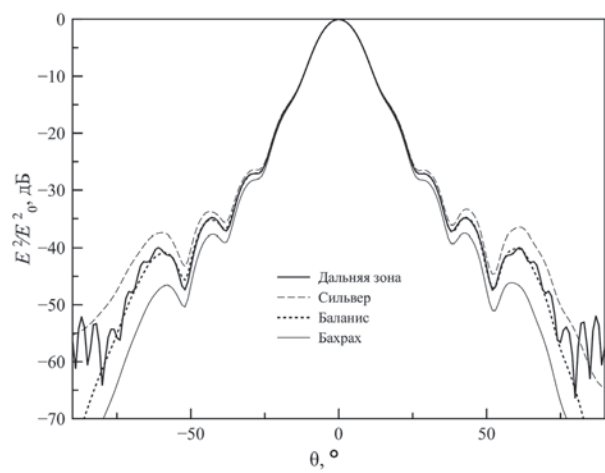


Рис. 4. ДН антенны П6–38(А7) в H -плоскости по результатам моделирования

шему. Таким образом, для тангенциального электрического поля в полном соответствии с теорией лучший результат по восстановлению ДН дают выражения (8).

Для антенны П6-38(A7) практическая проверка (8-10) проводилась при тех же исходных данных. Для измерения АФР использовался зонд — открытый конец прямоугольного волновода сечением 2,1×1,0 см. Его ДН в главных сечениях приведена на рис. 5. Результаты расчета ДН по (8-10) с использованием реальных АФР с классической коррекцией на ДН зонда [8] приведены на рис. 6 и 7. Как и в случае полученного из моделирования тангенциального поля расчет по (9) не обладает преимуществами ни в *E*-плоскости, ни в *H*-плоскости. Для *E*-плоскости (8) и (10) совпадают, что также отображено рис. 6. В *H*-плоскости вопреки теоретическим результатам расчет по (10) приводит к лучшему соответствию между восстановленной ДН и измеренной в дальней зоне. Рассмотрим возможную причину столь неожиданного результата.

Теоретически строгие в рамках сделанных допущений выражения (8) получены для тангенциального элек-

трического поля (рис. 1). Измеряемое на практике АФР таким не является. Получить из него тангенциальное электрическое поле можно после коррекции на ДН зонда. При анализе классической работы [8] можно заметить, что автор при переходе от измерений антенны-зонда к *S* параметрам исследуемой антенны никаким образом не учитывает векторный характер поля. По определению нормированная ДН $\bar{F}(\theta, \varphi)$ это отношение измеренного сигнала $F(\theta, \varphi)$ от излучения исследуемой антенны в направлении с углами θ и φ к модулю сигнала в направлении $\theta = 0^\circ$:

$$\bar{F}(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) / |F(0, 0)|.$$

При этом антенна-зонд должна быть направлена на исследуемую антенну, а значит сигналу соответствует модуль вектора поля (см. рис. 2). При измерении АФР на плоскости антенна-зонд всегда направлена вдоль вектора нормали к ней. Коррекция восстановленной ДН на ДН зонда согласно [8] осуществляется через переход к модулю вектора плоской волны (Фурье-компоненты), соответствующей направлению с углами θ и φ в каждой точке измерения АФР. Расчет же по теоретически строгим выражениям (8) требует подстановки тангенциальных компонент. В *E*-плоскости модуль поля плоской волны совпадает с тангенциальной компонентой, поэтому в ней проведенная коррекция восстановленной ДН на ДН зонда не привела к ошибкам. В *H*-плоскости тангенциальная компонента поля плоской волны связана с ее модулем через $\cos\theta$. Классическая коррекция восстановленной ДН на ДН зонда в этом случае является неполной для расчета по (8) и приводит к существенным ошибкам. Выражения (10) уже содержат в себе необходимый множитель $\cos\theta$, и поэтому расчет по ним приводит к лучшим результатам. Таким образом, лишний множитель $\cos\theta$ в (10) относится к коррекции восстановленной ДН на ДН зонда и отображает векторный характер поля.

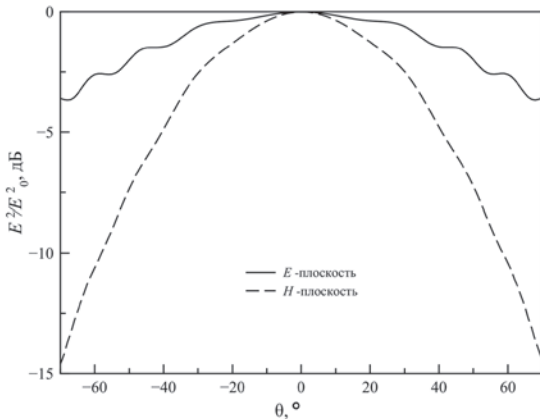


Рис. 5. ДН зонда

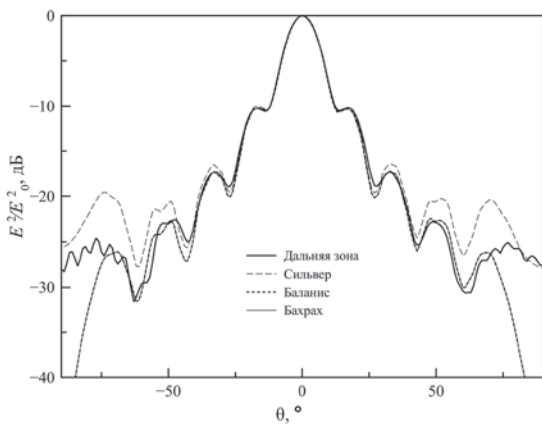


Рис. 6. ДН антенны П6-38(A7) АФР в *E*-плоскости по измеренному АФР

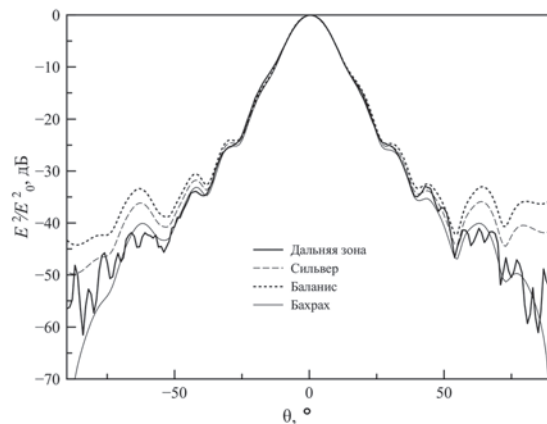


Рис. 7. ДН антенны П6-38(A7) в *H*-плоскости по измеренному АФР

Изложенное выше относится только к главным сечениям ДН. В общем случае учет векторной природы поля при коррекции восстановленной ДН на ДН зонда требует более детального рассмотрения и не сводится к простой поправке в виде множителя $\cos\theta$. В работе [15] вместе с методикой коррекции АФР по ДН зонда также приводится оценка влияния векторной природы поля. Запишем расчетные выражения (8) с ее учетом:

$$\begin{pmatrix} E_\theta \\ E_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_\varphi \\ -H_\theta \end{pmatrix} = -\frac{ike^{ikr}}{2\pi r} \left(1 - (1 - \cos\theta) \frac{S_x^e \cos\varphi + S_y^e \sin\varphi}{\sqrt{(S_x^e)^2 + (S_y^e)^2}} \right) \times \begin{pmatrix} S_x^e \cos\varphi + S_y^e \sin\varphi \\ \cos\theta (-S_x^e \sin\varphi + S_y^e \cos\varphi) \end{pmatrix}.$$

Заметим, что в главных сечениях (11) совпадают с (10). Сравнение результатов расчета ДН по (10) и (11) для $\theta < 70^\circ$ и всех значений полярного угла φ приведено на рис. 8.

Видно, что использование в теоретическом отношении более строгих расчетных выражений (11) не дает существенных преимуществ в сравнении с (10). Таким образом, методические погрешности в существующих АИК ближней зоны с планарным типом сканирования, в которых используются выражения (10) вместе с коррекцией восстановленной ДН на ДН зонда, можно считать несущественными.

Проведенный анализ вывода расчетных выражений для БЗ-ДЗ алгоритмов в АИК ближней зоны с планарным типом сканирования показал, что с учетом всех сделанных допущений наибольшей точностью обладают выражения (8)

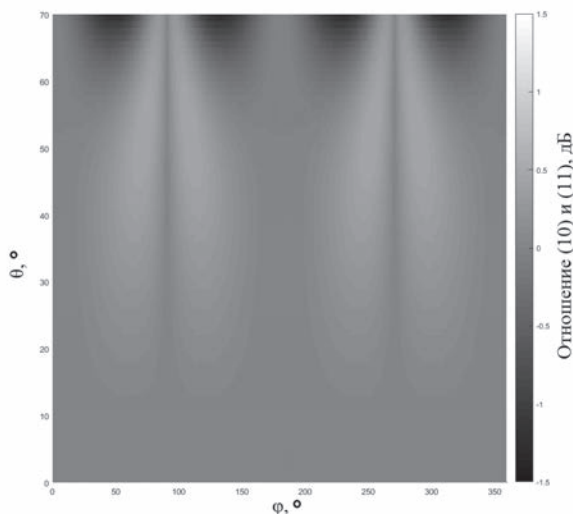


Рис. 8. Отношение нормированных ДН, рассчитанных по (10) и (11)

вместе с коррекцией восстановленной ДН на ДН зонда [8]. При этом необходимо учитывать векторную природу поля, выражающуюся в дополнительной поправке [15], отсутствующей в [8]. Предложенные расчетные выражения (11) вместе с классическим методом коррекции восстановленной ДН на ДН зонда имеют обоснование для всех значений полярных углов в отличие от известных выражений (10). При этом, в главных сечениях они совпадают, а вне их отличия оказываются несущественными.

Литература

1. *Shkurkin M.S.* A method of reducing the error of measurements of the directivity characteristics of antennas based on filtering the amplitude-phase distribution // *Measurement Techniques*. 2012. Vol. 55. No. 2. С. 189–192.
2. *Малай И.М., Шкуркин М.С.* Применение метода статистических испытаний для оценки метрологических характеристик антенных автоматизированных измерительных комплексов ближней зоны // *Антенны*. 2014. № 12. С. 50–55.
3. *Balanis C.A.* *Antenna theory: analysis and design*. 3th edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 1136 p.
4. *Silver S.* (Ed.) *Microwave antenna theory and design*. New York: McGraw-Hill, 1949. 623 p.
5. *Бахрах Л.Д.* Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. Л.: Наука, 1985. С.
6. *Brown J.* A theoretical analysis of some errors in aerial measurements // *Proceedings of the IEE-Part C: Monographs*. 1958. Vol. 105. No. 8. С. 343–351.
7. *Yaghjian A.* An overview of near-field antenna measurements // *IEEE Transactions on antennas and propagation*. 1986. Vol. 34. No. 1. С. 30–45.
8. *Kerns D.M.* Correction of near-field antenna measurements made with an arbitrary but known measuring antenna // *Electronics Letters*. 1970. Vol. 6. No. 11. С. 346–347.
9. *Newell A.C.* Error analysis techniques for planar near-field measurements // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1988. Vol. 36. No. 6. С. 754–768.
10. *Потехин А.И.* Некоторые задачи дифракции электромагнитных волн. М.: Сов. радио, 1948. 135 с.
11. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. Радио и связь, 1988. 440 с.
12. *Никольский В.В., Никольская Т.И.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989. 544 с.
13. *Никольский В.В.* Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. М.: Наука, 1967. 460 с.
14. *Gibson W.C.* *The method of moments in electromagnetics*. 2nd ed. Chapman and Hall/CRC, 2014. 450 с.
15. *Анютин Н.В., Малай И.М., Озеров М.А., Титаренко А.В., Шкуркин М.С.* Коррекция измерений амплитудно-фазового распределения поля в ближней зоне на диаграмму направленности зонда // *Измерительная техника*. 2018. № 1. С. 50–53.

ESTIMATION OF METHODOLOGICAL ERRORS IN THE ALGORITHMS OF ANTENNA MEASUREMENT COMPLEXES WITH PLANAR SCANNING

NIKOLAY V. ANYUTIN,

Mendeleevo, Russia, anyutin@vniiftri.ru

KIRILL I. KURBATOV,

Mendeleevo, Russia, kurbatov@vniiftri.ru

IVAN M. MALAY,

Mendeleevo, Russia, malay@vniiftri.ru

KEYWORDS: antenna measurements; near field; amplitude-phase distribution; probe correction; planar scanning.

ABSTRACT

In this work, the sources of methodic errors in the algorithms for near field to far field transformation, used in the near field antenna measuring complexes with the planar type of scanning, are analyzed. It is shown that the initial data in the form of amplitude-phase distributions of the electric field on two orthogonal polarizations make it possible to reconstruct the directivity pattern of the antenna under test without reducing the accuracy due to the lack of information on the tangential magnetic field to the scanning surface under the following assumptions: scanning is carried out in the radiation near field; the overwhelming part of the radiation power flux of the investigated antennas is concentrated on scanning surface.

The paper also analyzes the variants of calculation expressions presented in the literature for the algorithms for near field to far field transformation in near field antenna measuring complexes with a planar type of scanning. Theoretical and practical results of their application are discussed using the example of electrodynamic modeling of the horn antenna radiation and experimental measurement of the plane amplitude-phase distribution of its radiation field. It is shown that probe correction of the reconstructed radiation pattern of the antenna under test needs take into account vector nature of electromagnetic field. In the main cross-sections of the directivity diagram, it is sufficient to multiply the polar component of the electric field by the cosine of the polar angle. The vector representation of the Fourier image of the amplitude-phase distribution of the field also makes it possible to establish a correspondence between the theoretical and practical results of applying known computational expressions for the near-field-to-far-field transformation algorithms. For arbitrary values of the azimuth angle, it is proposed to use the approximate correction introduced to correct the measured amplitude-phase distribution by the probe directivity pattern.

REFERENCES

1. Shkurkin M.S. A method of reducing the error of measurements of the directivity characteristics of antennas based on filtering the amplitude-phase distribution. *Measurement Techniques*. 2012. No. 55(2). Pp. 189-192.
2. Shkurkin M.S., Malay I.M. Estimation of the near-field antenna measurement systems errors by the Monte Carlo method. *Antennas*. 2014. No. 12. Pp. 50-55. (In Russian)
3. Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design. 3th edition*. New Jersey: John Wiley & sons, 2005. 1136 p.
4. Silver S. (Ed.) *Microwave antenna theory and design*. New York: McGraw-Hill, 1949. 623 p.

5. Bahrah L.D. *Metody izmerenij parametrov izluchajushhih sistem v blizhnej zone* [Methods for measuring the parameters of radiating systems in the near field zone]. Leningrad: Nauka, 1985 (In Russian)
6. Brown J. A theoretical analysis of some errors in aerial measurements. *Proceedings of the IEE-Part C: Monographs*. 1958. Vol. 105. No. 8. Pp. 343-351.
7. Yaghjian A. An overview of near-field antenna measurements. *IEEE Transactions on antennas and propagation*. 1986. Vol. 34. No. 1. Pp. 30-45.
8. Kerns D.M. Correction of near-field antenna measurements made with an arbitrary but known measuring antenna. *Electronics Letters*. 1970. Vol. 6. No. 11. Pp. 346-347.
9. Newell A.C. Error analysis techniques for planar near-field measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1988. Vol. 36. No. 6. Pp. 754-768.
10. Potehin A.I. *Nekotorye zadachi difrakcii jelektromagnitnyh voln* [Some problems of diffraction of electromagnetic waves]. Moscow: Sovetskoe radio, 1948. 135 c. (In Russian)
11. Vajnshtejn L.A. *Jelektromagnitnye volny* [Electromagnetic Waves]. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 440 c. (In Russian)
12. Nikol'skij V.V., Nikol'skaja T.I. *Jelektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* [Electrodynamics and propagation of radio waves]. Moscow: Nauka, 1989. 544 p. (In Russian)
13. Nikol'skij V.V. *Variacionnye metody dlja vnutrennih zadach jelektrodinamiki* [Variational methods for internal problems of electrodynamics]. Moscow: Nauka, 1967. 460 p. (In Russian)
14. Gibson W.C. *The method of moments in electromagnetics*. 2nd ed. Chapman and Hall/CRC, 2014. 450 c.
15. Anyutin N.V., Malay I.M., Ozerov M.A., Titarenko A.V., Shkurkin M.S. Probe correction of measurements of the amplitude-phase distribution in the near field. *Measurements Technics*. 2018. Pp. 50-53. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Anyutin N. V., Engineer, Postgraduate Student of the All-Russian Scientific Research Institute of physico-technical and radio-technical measurements; Kurbatov K. I., Engineer, Postgraduate Student of the All-Russian Scientific Research Institute of physico-technical and radio-technical measurements; Malay I. M., PhD, Deputy Director for Radio-Technical and Electromagnetic Measurements of the All-Russian Scientific Research Institute of physico-technical and radio-technical measurements.

For citation: Anyutin N. V., Kurbatov K. I., Malay I. M. Estimation of methodological errors in the algorithms of antenna measurement complexes with planar scanning. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 1. Pp. 14-20. doi 10.24411/2409-5419-2018-10015 (In Russian)

Московский Технический Университет Связи и Информатики (МТУСИ),
Институт Инженеров Электротехники и Электроники (IEEE),
Издательский дом "Медиа Паблишер"

проводят международную научно-техническую конференцию

"2018 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications"

IEEE Conference #43917

**14-15 марта 2018 года, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8А,
Конгресс-центр МТУСИ**

С 2018 года конференция внесена в официальный перечень конференций IEEE

Доклады участников конференции будут включены в Программу Публикаций Конференций IEEE (IEEE Conference Publication Program (CPP)) и размещены на сайте IEEE.

Доклады также войдут в сборник трудов конференции,
который размещается на платформе SCOPUS.

About the Event

media-publisher.ru/en/about-bc-2018

The international scientific and engineering conference "Information Society Technologies" has been held since 1975. For 44 years of work the conference has become a widely known forum for specialists of the field.

As part of the conference the reports on the direction «Systems of signals generating and processing in the field of on board communications» were placed according to the sections. Due to the significantly increasing of the interest and the level of the participants' presented papers in this field, by the program committee was made a decision to allocate this chapter as a new original international scientific conference starting with the 2018.

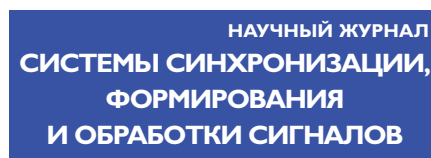
The main areas of the conference «Systems of signals generating and processing in the field of on board communications» include modern digital transportation systems design and technical operation, radio waves propagation, transmitting, receiving and processing signals in television and radio broadcasting devices, information technologies in transport.

**Всем участникам, выступившим с докладами, будут вручены сертификаты.
Заочное участие в конференциях IEEE не предусмотрено!**

Оргкомитет:

111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8, корп. 1, офис 512
Тел.: +7 (495) 957-77-43; +7(916) 591-55-36; ovd@media-publisher.ru

Информационные партнеры конференции



doi 10.24411/2409-5419-2018-10016

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧАСОВОЙ ДИНАМИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ НЕЧЕТКОГО ИНДУКТИВНОГО РАССУЖДЕНИЯ

ГУСЕВ

Александр Алексеевич¹

ВОЛОШИН

Андрей Эдуардович²

ЯКОВЕНКО

Николай Андреевич³

Сведения об авторах:

¹аспирант кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета, г. Краснодар, Россия, gusevftf@ya.ru

²доцент кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета, генеральный директор АО «Конструкторское бюро «Селена», г. Краснодар, Россия, mail@kbselena.ru

³д.т.н., профессор, заведующий кафедрой оптоэлектроники, декан физико-технического факультета Кубанского государственного университета, г. Краснодар, Россия, dean@phys.kubsu.ru

АННОТАЦИЯ

В работе демонстрируется применение разработанного авторами инструментального средства синтеза моделей нечеткого индуктивного рассуждения «AimDSS» к автоматизированной обработке измерительной информации на примере краткосрочного прогнозирования динамики солнечного ветра в часовом масштабе времени по данным спутниковой регистрации потока высокоэнергетичных электронов, испускаемых короной Солнца. Инструментальное средство «AimDSS», показанное в работе, является кросс-платформенным приложением, способным работать под управлением отечественных операционных систем «Мобильная Система Вооруженных Сил» и AstraLinux последних версий. Предметом исследования, является динамика потока высокоэнергетичных электронов, являющихся одним из компонентов солнечного ветра. Целью исследования является создание и оценка модели часовой динамики солнечного ветра по суточной предыстории. Методом исследования является нечеткое индуктивное рассуждение. Проведен анализ подходов к моделированию солнечной активности, описаны ее основные проявления и наиболее широко используемые методы обработки измерительной информации в этой области. Представлена краткая история исследований солнечного ветра. Описана методика создания моделей нечеткого индуктивного рассуждения, способы качественного кодирования исходных данных, критерии выбора оптимальной маски для порождения данных, генерации качественной базы правил и составления прогноза динамики исследуемой величины на основе взвешенного алгоритма «ближайших соседей». Создана часовая модель динамики потока высокоэнергетичных электронов. Прогноз, полученный с помощью модели, проверен на контрольной выборке. Среднеквадратичная ошибка прогноза составила 0,07. Указана возможность применения методики нечеткого индуктивного рассуждения и представленного в статье инструментального средства «AimDSS» к созданию моделей динамики природных и техногенных процессов в реальном времени для применения в составе отечественных пакетов специализированного программного обеспечения и автоматизированных систем управления за счет детальной настройки границ категорий нечеткого индуктивного рассуждения на этапе качественного кодирования исходных данных и конфигурации маски, используемой для порождения данных, на основе экспертных знаний в конкретной предметной области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поддержка принятия решений; краткосрочное прогнозирование; интеллектуальный анализ измерительной информации; нечеткое индуктивное рассуждение; солнечная активность; солнечный ветер.

Для цитирования: Гусев А. А., Волошин А. Э., Яковенко Н. А. Прогнозирование часовой динамики солнечного ветра с помощью модели нечеткого индуктивного рассуждения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 1 С. 22-28. doi 10.24411/2409-5419-2018-10016

Введение

Новые методики анализа измерительной информации призваны облегчить принятие решений на основе автоматизированного синтеза компьютерных моделей динамики значимых природных, техногенных и социально-экономических процессов.

Одной из развиваемых нами методик компьютерного анализа информации является нечеткое индуктивное рассуждение — методика, основанная на выделении в массиве исходных данных повторяющихся последовательностей данных и составлении прогноза динамики исследуемой величины с использованием функции схожести найденных последовательностей с крайними значениями массива данных.

Мы разработали программу «AimDSS» [1] для автоматизации создания компьютерных моделей на основе методики нечеткого индуктивного рассуждения. «AimDSS» ранее была использована в долгосрочном прогнозировании динамики солнечной активности по данным оптических наблюдений солнечных пятен и по данным о значениях среднего магнитного поля Солнца [2].

В данной публикации мы демонстрируем возможность применения методики нечеткого индуктивного рассуждения и ее реализации в программе «AimDSS» к задаче краткосрочного прогнозирования солнечной активности в часовом масштабе времени.

Явления солнечной активности представляют из себя нелинейную динамическую систему, данные о которой обладают цикличностью с периодом в 11 лет, 22 года, 100 лет и т. д.

Одними из первых были начаты инструментальные наблюдения солнечных пятен Р. Вольфом. Р. Вольф также предложил формулу для определения относительных чисел пятен или чисел Вольфа.

Впервые о существовании потоков заряженных частиц, испускаемых Солнцем, предположил Р. Кэллингтон в конце 19 в. Совместно с Р. Ходжсоном они обнаружили взаимосвязь геомагнитной бури с предшествовавшей за сутки до этого солнечной вспышкой. В 1916 г. Биркеланд отмечал: «согласно законам физики справедливо считать, что лучи света суммарно не обладают никаким зарядом» — по предположению Биркеланда солнечный ветер состоял, как из электронов, так и из положительно заряженных ионов. Людвиг Бирманн отмечал влияние солнечного ветра на кометы, хвост которых всегда имеет направление «от звезды». Юджин Паркер объяснил истечение солнечной материи в окружающее пространство уменьшением силы притяжения Солнца в верхних слоях короны. Высокие скорости (300–1200 км/с) потоков солнечного ветра были исследованы Константином Грингаузом при помощи советского аппарата Луна-1. Исследования в области изучения состава и скорости движения солнечного ветра,

взаимосвязи этих параметров с многолетними циклами солнечной активности активно продолжаются в настоящее время [3–5].

Заинтересованность исследователей в прогнозировании характеристик циклов солнечной активности привела к использованию различных методов анализов данных и создания математических моделей в этой сфере. Условно данные методы можно разделить на два класса: индуктивные и дедуктивные методы.

В основе дедуктивных методов предсказания активности Солнца лежат математические модели динамики магнитного поля звезды, под действием которого изменяется характер процессов конвекции и на поверхности светила формируются области пониженной температуры — солнечные пятна и другие явления солнечной активности [6]. Все методы данного класса так или иначе построены на некоторой физической теории активности Солнца, необходимой для дедуктивного вывода математических моделей: от общих закономерностей к частным проявлениям.

Индуктивные методы моделирования активности Солнца построены на обратном принципе — от частных записей массива наблюдений явлений солнечной активности, предъявляемых как обучающая выборка, моделирующая программа приходит к формированию общей компьютерной модели явления. В литературе встречается описание индуктивных моделей, построенных на массивах снимков фотосферы Солнца, записях хромосферных вспышек, потоков заряженных частиц и др. Среди методов построения моделей отмечаются нейро-нечеткие модели [7], искусственные нейронные сети [8] и генетические алгоритмы, методы анализа изображений и гибридные методы [9].

Обилие методов и подходов к созданию моделей активности Солнца говорит о сложности явления и малой вероятности появления универсальных моделей, способных заменить все остальные. Речь сегодня идет об исследовании условий и границ применимости существующих моделей [10].

Актуальность совершенствования методик краткосрочного прогнозирования солнечной активности связана с влиянием солнечного ветра на безопасность космических полетов и телекоммуникационного оборудования расположенного на орбите Земли [11]. В данном исследовании под солнечным ветром мы понимаем потоки электронов, протонов, ядер гелия (альфа-частиц) и других ионизированных частиц, испускаемых внешними слоями атмосферы Солнца. При создании модели мы ограничимся анализом данных потока электронов в диапазоне энергий 1–5 Мэ В.

Целью данной публикации является создание и демонстрация модели нечеткого индуктивного рассуждения для краткосрочного прогнозирования активности Солнца

в часовом масштабе времени по данным о потоке высокоэнергетичных электронов.

Чтобы достигнуть цель исследования необходимо решить нижеследующие задачи:

1) подбор массива наблюдений потока высокоэнергетичных электронов, предварительная обработка массива наблюдений, формирование контрольной и обучающей выборок;

2) подбор параметров создания модели, соответствующих минимуму ошибки прогнозирования;

3) прогнозирование краткосрочной динамики солнечной активности с помощью построенной модели и анализ результатов моделирования.

Методика

Методика нечеткого индуктивного рассуждения (НИР) относится к числу технологий качественного индуктивного моделирования. В основе методики лежит концепция Универсального решателя системных задач (УРСЗ) — модели компьютерной экспертной системы, разработанной Джорджем Клиром [12].

На вход программы, реализующей методику НИР, подается набор данных в виде массива значений входных переменных v_1, \dots, v_n . При работе с одномерными временными рядами, на вход может подаваться предыстория ряда в виде одной входной переменной v .

Первым шагом методики НИР является разбиение множеств значений входных переменных на конечное сравнительно небольшое число (10–200) качественных категорий (кластеров) по выбору исследователя. Численные границы качественных категорий определяются автоматически с помощью одного из методов кластеризации, либо задаются исследователем. Последний случай позволяет использовать экспертные знания при создании моделей в конкретных предметных областях. Результатом первого шага методики является качественный массив данных D , содержащий номера кластеров c_{ij} , к которым относится каждая запись d_j исходных данных, а также массив Vf значений f_j функций принадлежности к кластеру для каждой записи d_j исходных данных. Значения функции принадлежности f_j фиксируются с учетом того, справа $side_j = r$ или слева $side_j = l$ от максимума функции принадлежности находится та или иная запись исходных данных. Подобный подход позволяет в дальнейшем восстановить исходные количественные значения данных.

На втором шаге методики НИР создается модель нечеткого индуктивного рассуждения в виде «маски» — подмножества двумерной таблицы D , содержащей геометрическую конфигурацию значений входных переменных (параметры выбора предыстории в случае одномерных рядов), обеспечивающей наивысшую потенциальную точ-

ность прогнозирования. Приведем пример маски (модели) (табл. 1).

Таблица

Пример маски

v^x	v_1	v_2	v_3	y
$t-2 \delta t$	- 1	- 1	0	0
$t-\delta t$	0	0	- 1	- 1
t	- 1	0	0	+ 1

Данная маска соответствует уравнению:

$$y(t) = f(v_1(t-2\delta t), v_2(t-2\delta t), v_3(t-\delta t), y_1(t-\delta t), v_1(t)),$$

где v_1, v_2, v_3 — входные переменные,

y — выходная переменная,

f обозначает качественное отношение, найденное программой.

Каждый отрицательный элемент маски называется m -входом, а положительный — m -выходом. Каждый m -вход отражает причинную связь с выходом, влияя на него до некоторой степени. Количество ненулевых элементов называется сложностью маски. Маска используется вместе с нечеткими данными, полученными на этапе качественного кодирования, для создания качественной базы правил. Рассмотрим процесс поиска оптимальной маски.

Функция поиска оптимальной маски рассматривает все возможные маски сложности 2 (один m -вход и один m -выход) и находит лучшую маску, вычисляя качество маски. Далее функция рассматривает все возможные маски сложности 3 (два m -входа и m -выход) и находит лучшую; действие повторяется, пока не будет достигнута максимальная сложность. Маска абсолютно лучшего качества затем используется в качестве оптимальной. Поиск обладает экспоненциальной сложностью, оценивая $2^{n-1}-1$ масок, перед принятием решения, где n — максимальная возможная сложность.

Для оценки качества маски вычисляется информационная энтропия I по Шеннону для каждой из рассматриваемых масок $M_1..M_n$. Оптимальной считается маска M_{opt} , информационная энтропия которой минимальна.

Третий шаг методики НИР связан с итеративным прогнозированием последнего+1 значения выходной переменной y (конца ряда для одномерных рядов). Для составления прогноза («индуктивного рассуждения») на основе массива качественных данных D , полученных на шаге 1 и оптимальной маски M_{opt} , полученной на шаге 2 составляется база правил Rb , содержащая наиболее вероятные завершения концевой последовательности данных, полученные

методом «голосования» n ближайших соседей концевой последовательности. Составляется прогноз последнего+1 значения выходной переменной, после чего маска сдвигается на 1 позицию к концу массива и отыскивается наиболее вероятное продолжение получившейся последовательности для прогнозирования последнего+2 значения выходной переменной. Процедура повторяется заданное число раз.

На четвертом шаге методики качественные значения D преобразуются вновь в количественные с использованием значений функций принадлежности из массива Bf и данных $side_j$ о положении записи j относительно максимума функции принадлежности, осуществляется визуализация полученного прогноза и оценка его ошибки против контрольной выборки.

Более подробно поиск оптимальной маски на основе расчета информационной энтропии и прогнозирования на основе взвешенного «голосования» ближайших соседей описано нами в [13].

Программа «AimDSS»

«AimDSS» создана аспирантом Кубанского государственного университета Гусевым А. А. для автоматизации применения методики НИР. Программа разработана на языке Java, что позволяет использовать ее не только в операционных средах на базе Microsoft Windows и macOS, но и в отечественных специализированных операционных системах на ядре Linux. Последнее является одной из существенных особенностей «AimDSS» в сравнении с другими пакетами, реализующими методику НИР, такими как надстройки FIR и Visual-FIR, разрабатываемые в Барселонском политехническом университете и Цюрихском университете вычислительных наук [14] для математического пакета Matlab.

Модель

Для составления нечеткой индуктивной модели мы взяли 5-минутные данные о потоке электронов с энергией 1–5 МэВ за 10 августа 2017 г., размещенные на ftp-сервере Национальной метеорологической службы США. Измерения, представленные на этом сервере, осуществляются с помощью спутника Advanced Composition Explorer (ACE), запущенного NASA в 1997. Выбор этого источника данных обусловлен наличием детализированных массивов измерительной информации в открытом доступе.

Выборка содержала 163 записи за 10 августа 2017 с 3:00 до 16:30 по Московскому времени (МСК). Периодичность измерений составляла 5 минут.

Нами было осуществлено 15-минутное сглаживание исходных данных и нормирование величины потока электронов в диапазоне [0;1]. Получившийся массив сглаженных нормированных данных содержал 161 запись.

Для составления модели (обучающая выборка) были выбраны первые 107 записей массива (3:10–12:00 МСК).

На этапе качественного кодирования были заданы 40 категорий нечеткого индуктивного рассуждения, образованные программой «AimDSS» центроидным методом кластеризации.

На этапе поиска оптимальной маски (модели) объекта «AimDSS» определила маску 4x5, соответствующую уравнению $y = f(y(t-\delta t), y(t-2\delta t), y(t-4\delta t))$, где y — моделируемое значение потока высокоэнергетичных электронов, f — создаваемое программой на основе базы правил качественное отношение, t — временной параметр, δt — 5 минут для данного набора измерений.

Составление прогноза и контроль модели осуществлялся на 54 последних записях выборки (12:05–16:30 МСК).

Среднеквадратичная ошибка прогноза составила 0,07. Приведем результаты проверки прогноза против контрольной выборки (рис. 1).

Обсуждение

Нечеткое индуктивное рассуждение относится к качественным методикам анализа данных. Точность получаемого прогноза сильно зависит от параметров качественного кодирования исходных данных на первом шаге методики [15]. Несмотря на возможность обратного количественного преобразования выходного массива данных, прогноз часто оказывается более точным в предсказании характера изменения выходной величины, а не ее конкретных количественных значений.

Достоинствами методики является ее опора на данные о наблюдаемом поведении моделируемого объекта без необходимости знания его внутренней структуры [16], а также возможность составления моделей на сравнительно небольшом массиве исходных данных, содержащем пропуски в измерениях [17], что является проблемным при использовании искусственных нейронных сетей и нейро-нечетких систем.

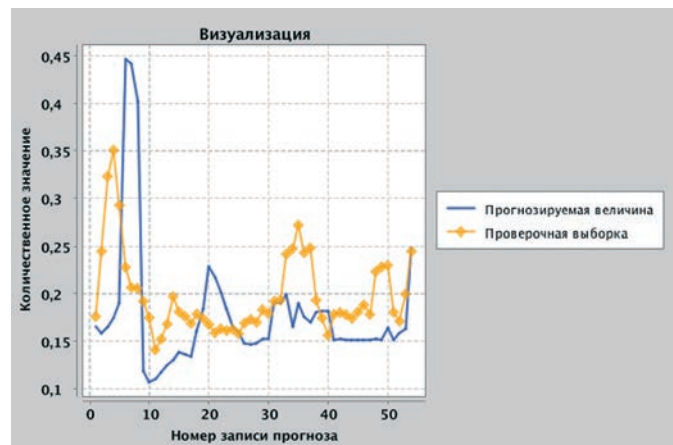


Рис. 1. Результаты моделирования динамики потока электронов 1-5 МэВ за 10 августа 2017 12:05 – 16:30 МСК

Немаловажной является и прозрачность, а также сравнительная простота реализации алгоритма методики на языках высокого уровня, что, на наш взгляд, позволяет разрабатывать и использовать программные модули нечеткого индуктивного рассуждения в составе отечественных комплексов специализированного программного обеспечения, наряду с традиционными компонентами статистического анализа.

При наличии экспертных знаний методика позволяет задавать оптимальные наборы параметров качественного кодирования и выбора маски для конкретных задач в заданной предметной области, что позволит повысить эффективность прогнозирования и сделать составление моделей максимально оперативным, использовать модули нечеткого индуктивного рассуждения в составе отечественных АСУ в реальном времени.

Заключение

С помощью разработанной нами программы «AimDSS» создана модель нечеткого индуктивного рассуждения для краткосрочного прогнозирования динамики солнечного ветра в часовом масштабе времени по данным о значениях потока высокоэнергетичных электронов. Модель проверена на контрольной выборке измерительной информации.

Дальнейшее изучение предполагает исследование вопросов повышения качества прогнозирования с использованием методики НИР на основе добавления в модель новых входных переменных, характеризующих солнечную активность.

Необходимо отметить, что, несмотря на растущее применение методов компьютерного анализа данных, развитие физических теорий, объясняющих различные явления солнечной активности является необходимым условием улучшения отбора входных данных и разработки эвристических алгоритмов определения оптимальных параметров создания индуктивных моделей. Методы компьютерного моделирования в свою очередь могут быть полезны для проверки гипотез в теоретических исследованиях.

Метод нечеткого индуктивного рассуждения и его реализация в программе «AimDSS» также позволяют определять наборы параметров создания моделей с учетом экспертных знаний, что, на наш взгляд, позволяет использовать данный метод и разработанное нами программное обеспечение в составе отечественных комплексов специализированного программного обеспечения для анализа данных и поддержки принятия решений в реальном времени в специальных предметных областях.

Литература

1. Свид.2016610899 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа принятия управленческих решений «AimDSS» / А. А. Гусев, Н. А. Швецова; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО КубГУ (RU). No2015661290; заявл. 23.11.15; опублик. 20.02.16, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.
2. Гусев А.А., Волошин А.Э., Яковенко Н.А. Долгосрочное прогнозирование динамики среднего магнитного поля Солнца с помощью модели нечеткого индуктивного рассуждения // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2017. № 2. С. 28–31.
3. Sarkar T., Khondekar M., Banerjee S. Dynamics of solar wind speed: Cycle 23 // Advances in Space Research. 2017. Vol. 59. Issue 8. Pp. 2196–2205.
4. Sorriso-Valvo L., Carbone F., Leonardis E., Chen C., Safrankova J., Nemecek Z. Multifractal analysis of high resolution solar wind proton density measurements // Advances in Space Research. 2017. Vol. 59. Issue 6. Pp. 1642–1651.
5. Bacha M., Gougam L., Tribeche M. Ion-acoustic rogue waves in magnetized solar wind plasma with nonextensive electrons // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2017. Vol. 446. Pp. 199–210.
6. Стрижак Ю.В., Понявин Д.И. Источники магнитного поля Солнца как звезды // Physics of Auroral Phenomena. 2016. Т. 39. № 1(40). С. 84–86.
7. Attia A.F., Ismail Hamed A., Bassurah H.M. A Neuro-Fuzzy modeling for prediction of solar cycles 24 and 25 // Astrophys Space Sci. 2012. Vol. 344. Issue 1. Pp. 5–11.
8. Zavvari A., Islam M.T., Anwar R., Abidin Z.Z. Solar Flare M-Class Prediction Using Artificial Intelligence Techniques // Journal Of Theoretical and Applied Information Technology. 2015. Vol. 74. No.1. Pp.63–67.
9. Hussain A.N., Ajmal H.S., Raed A. ANFIS Based Intelligent Solar Flare Prediction System // Proceedings of the International Conference on Electrical, Electronics, Computer Engineering and their Applications. 2014. Kuala Lumpur, Malaysia. Pp. 49–55.
10. Thomas J.H., Weiss N.O. (Eds.). Sunspots: Theory and Observations. Springer Netherlands. 1992. 428 p.
11. Томаси У. Электронные системы связи. М.: Техносфера, 2007. 1360 с.
12. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. М.: Радио и связь, 1990. 544 с.
13. Гусев А.А. Автоматизация задач планирования тылового обеспечения войск на основе методов системологии и геоинформационных технологий // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 7. С. 65–70.

14. Escobet A., Nebot A., Cellier F. Visual-FIR: A tool for model identification and prediction of dynamical complex systems // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008. Vol. 16. Issue 1. Pp. 76–92.

15. Nebot A., Mugica F. Fuzzy inductive reasoning: a consolidated approach to data-driven construction of complex dynamical systems // *International Journal of General Systems*. 2012. Vol. 41. No.7. Pp. 645–665.

16. Jurado S., Nebot A., Mugica F., Avellana N. Hybrid methodologies for electricity load forecasting: Entropy-based feature selection with machine learning and soft computing techniques // *Energy*. 2015. Vol. 86. Pp. 276–291.

17. Jurado S., Nebot A., Mugica F., Mihaylov M. Fuzzy inductive reasoning forecasting strategies able to cope with missing data: A smart grid application // *Applied Soft Computing*. 2017. Vol. 51. Pp. 225–238.

FORECASTING OF A SOLAR WIND HOUR DYNAMICS WITH THE FUZZY INDUCTIVE REASONING MODEL

ALEXANDER A. GUSEV,

Krasnodar, Russia, gusevftf@ya.ru

ANDREY E. VOLOSHIN,

Krasnodar, Russia, mail@kbselena.ru

NIKOLAY A. YAKOVENKO,

Krasnodar, Russia, dean@phys.kubsu.ru

KEYWORDS: decision support systems; short-term forecasting; intellectual analysis of measuring information; fuzzy inductive reasoning; solar activity; solar wind.

ABSTRACT

The work demonstrates the application of the tool "AimDSS" developed by the authors to synthesize models of fuzzy inductive reasoning for automated processing of measurement information on the example of short-term forecasting of solar wind dynamics in the hourly time scale based on the satellite recording of the flux of high-energy electrons emitted by the Sun's corona. The tool "AimDSS", shown in the work, is a cross-platform application capable of running under the Russian domestic operating systems "Mobile Armed Forces System" and AstraLinux of the latest versions. The subject of the research carried out in the article is the dynamics of the flow of high-energy electrons, which are one of the components of the solar wind. The aim of the study is

to create and evaluate the model of the hourly dynamics of the solar wind on a daily prehistory. The method of investigation is fuzzy inductive reasoning. The work analyzes the approaches to modeling solar activity, describes its main manifestations and the most widely used methods of processing measurement information in this field. A brief history of solar wind research is presented. The technique for creating models of fuzzy inductive reasoning, ways of qualitative recording of initial data, criteria for choosing the optimal mask for generating data, generating a qualitative rule base and compiling a forecast of the dynamics of the investigated value based on a weighted algorithm of "nearest neighbors" are described. An hour-long model of the dynamics of the flow

of high-energy electrons is created. The forecast obtained with the help of the model is checked on the control sample. The root-mean-square error of the forecast was 0.07. The authors have also shown the possibility of applying the fuzzy inductive reasoning method and the tool "AimDSS" presented in the work to creating models of the dynamics of natural and technogenic processes in real time for application in the Russian domestic packets of specialized software and automated control systems by means of the detailed adjustment of the categories of fuzzy inductive reasoning and the configuration of the mask used for the data generation on the basis of expertise in a particular subject area.

REFERENCES

1. Svid. 2016610899 RF. *Programma prinyatiya upravlencheskikh resheniy "AimDSS"* [Program for Making Management Decisions "«AimDSS»"]. Shvetsova N.A., Gusev A.A. Declared 23.11.15. Published 20.02.16. 1 p. (In Russian)
2. Gusev A.A., Voloshin A.E., Yakovenko N.A. Dolgosrochnoye prognozirovaniye dinamiki srednego magnitnogo polya Solntsa s pomoshch'yu modeli nechetkogo induktivnogo rassuzhdeniya [Long-term forecasting of the dynamics of mean solar magnetic field with the fuzzy inductive reasoning model]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov CHES* [Ecological bulletin of research centers of the Black Sea Economic Cooperation]. 2017. No. 2. Pp. 28-31. (In Russian).
3. Sarkar T., Khondekar M., Banerjee S. Dynamics of solar wind speed: Cycle 23. *Advances in Space Research*. 2017. Vol. 59. Issue 8. Pp. 2196-2205.
4. Sorriso-Valvo L., Carbone F., Leonardis E., Chen C., Safrankova J., Nemecek Z. Multifractal analysis of high resolution solar wind proton density measurements. *Advances in Space Research*. 2017. Vol.59. Issue 6. Pp. 1642-1651.
5. Bacha M., Gougam L., Tribeche M. Ion-acoustic rogue waves in magnetized solar wind plasma with nonextensive electrons. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2017. Vol. 446. Pp. 199-210.
6. Strizhak Yu.V., Ponyavin D.I. Istochniki magnitnogo polya Solntsa kak zvezdy [Sources of magnetic field of the Sun as a star]. *Physics of Auroral Phenomena*. 2016. Vol. 39. No 1(40). Pp. 84-86. (In Russian)
7. Attia A.F., Ismail Hamed A., Bassurah H.M. A Neuro-Fuzzy modeling for prediction of solar cycles 24 and 25. *Astrophys Space Sci*. 2012. Vol. 344. Issue 1. Pp. 5-11.
8. Zavvari A., Islam M.T., Anwar R., Abidin Z.Z. Solar Flare M-Class Prediction Using Artificial Intelligence Techniques. *Journal Of Theoretical and Applied Information Technology*. 2015. Vol. 74. No.1. Pp.63-67.
9. Hussain A.N., Ajmal H.S., Raed A. ANFIS Based Intelligent Solar Flare Prediction System. *Proceedings of the International Conference on Electrical, Electronics, Computer Engineering and their Applications*. 2014. Kuala Lumpur, Malaysia. Pp. 49-55.
10. Thomas J.H., Weiss N.O. (Eds.). *Sunspots: Theory and Observations*. Springer Netherlands. 1992. 428 p.
11. Tomasi. *Electronic Communications System: Fundamentals Through Advanced*. 5/e. Pearson Education, 2011. 947 p.
12. Klir G. J., Elias D. *Architecture of systems problem solving*. 2nd ed. New York: Plenum Publishers, 2003, 349 p.
13. Gusev A.A. Avtomatizatsiya zadach planirovaniya tylovogo obespecheniya voysk na osnove metodov sistemologii i geoinformatsionnykh tekhnologiy [Automation of military logistics planning on the basis of general systems theory and GIS technologies]. *T-Comm*. 2016. Vol. 10. No. 7. Pp. 65-70. (In Russian)
14. Escobet A., Nebot A., Cellier F. Visual-FIR: A tool for model identification and prediction of dynamical complex systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008. Vol. 16. Issue 1. Pp. 76-92.
15. Nebot A., Mugica F. Fuzzy inductive reasoning: a consolidated approach to data-driven construction of complex dynamical systems. *International Journal of General Systems*. 2012. Vol. 41. No.7. Pp. 645-665.
16. Jurado S., Nebot A., Mugica F., Avellana N. Hybrid methodologies for electricity load forecasting: Entropy-based feature selection with machine learning and soft computing techniques. *Energy*. 2015. Vol. 86. Pp. 276-291.
17. Jurado S., Nebot A., Mugica F., Mihaylov M. Fuzzy inductive reasoning forecasting strategies able to cope with missing data: A smart grid application. *Applied Soft Computing*. 2017. Vol. 51. Pp. 225-238.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Gusev A.A., Postgraduate Student at the Department of Optoelectronics of Kuban State University;
 Voloshin A.E., Associate Professor at the Department of Optoelectronics of Kuban State University;
 Yakovenko N.A., PhD, Full Professor, Head of Department of Optoelectronics, Head of Faculty of Physics and Technology of Kuban State University.

For citation: Gusev A.A., Voloshin A.E., Yakovenko N.A. Forecasting of a solar wind hour dynamics with the fuzzy inductive reasoning model. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 1. Pp. 22-28. doi 10.24411/2409-5419-2018-10016 (In Russian)

doi 10.24411/2409-5419-2018-10017

ПОДХОД К ОПЕРАТИВНОМУ КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА КОМПОНЕНТОВ ЖИДКОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА ПРИ ДОЛГОСРОЧНОМ ХРАНЕНИИ В РЕЗЕРВУАРАХ НА ЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЯХ

КРАВЦОВ**Александр Николаевич¹****ВЕЛИЧКО****Аркадий Юрьевич²****УСИКОВ****Валентин Дмитриевич³****Сведения об авторах:**

¹к.т.н., доцент, начальник кафедры метрологического обеспечения вооружения, военной и специальной техники Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, kan1970@bk.ru

²начальник метрологической службы 1 Главного испытательного космодрома МО РФ, Архангельская обл., г. Плесецк, Россия, R1-B4@mail.ru

³курсовой офицер – преподаватель факультета автоматизированных систем управления войсками Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, usikov_1989@list.ru

АННОТАЦИЯ

В работе проанализирован подход к контролю качества горючего жидкого ракетного топлива при долгосрочном хранении его в резервуарах на заправочных станциях, на примере несимметричного диметилгидразина и с учетом существующих недостатков рассмотрен подход к контролю качества горючего при воздействии на него электромагнитного поля при различных частотах синусоидальных колебаний и температурах. Предлагаемый подход основан на свойстве жидкостей, в котором при некоторой характеристической частоте, приобретенной в частотно-изменяющемся электромагнитном поле в диапазоне от 0,9 кГц до 10 МГц, активная электропроводность остается неизменной при различных температурах, что позволяет охарактеризовать как саму жидкость, так и изменение её состояния. Это свойство жидкостей помогло с новых позиций представить теоретические основы, позволяющие разработать научно-методологический аппарат оперативного контроля качества горючего на основе результатов измерения удельных электромагнитных характеристик. Представлены результаты экспериментальных исследований горючего несимметричного диметилгидразина. Сами удельные параметры существенно различаются, так как непосредственно связаны с различающимися формами вещества, одновременно содержащимися в данной жидкости. Эти различия носят структурный характер и очень существенны. Предложенный подход позволяет непрерывно контролировать качественные изменения горючего, которые происходят при долгосрочном хранении, транспортировке, нарушении технологии хранения, и сигнализировать о невозможности применения данного горючего для заправки ракет космического назначения. Предложены пути реализации данного подхода на заправочных станциях ракет космического назначения. Обусловлена роль взаимодействия метрологических воинских подразделений и физико-химических лабораторий по калибровке датчиков контроля качества горючего. Проанализирована актуальность применения данного подхода и перспектива применения его в военно-космической отрасли для контроля качества различных горючих жидких ракетных топлив.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: несимметричный диметилгидразин; ракетное горючее; оперативный контроль качества ракетного горючего; электромагнитное поле; активная электропроводность.

Для цитирования: Кравцов А.Н., Величко А.Ю., Усиков В.Д. Подход к оперативному контролю качества компонентов жидкого ракетного топлива при долгосрочном хранении в резервуарах на заправочных станциях // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 1. С. 29-38. doi 10.24411/2409-5419-2018-10017

Процесс химического превращения веществ, составляющих топливо, в продукты горения — это, по сути, процесс соответствующей перегруппировки атомов, из которых состоят молекулы компонентов топлива, с образованием новых молекул.

Обычно топливо состоит из двух веществ — горючего и окислителя, которые называются компонентами ракетного топлива (КРТ).

Горючее — это вещество, атомы которого при переходе в продукты горения имеют существенно положительный прирост суммарной степени окисления, а окислитель — это вещество, атомы которого при переходе в продукты горения имеют существенно отрицательный прирост суммарной степени окисления.

Данная работа была проведена в рамках совершенствования автоматизированной системы управления предстартовой подготовки и пуска ракет космического назначения. Предлагаемый подход к контролю качества горючего ракет космического назначения при долгосрочном хранении его на заправочных станциях, позволяет существенно повысить оперативность проверки и контроля его качества.

В соответствии с ГОСТ 15467–79 качество продукции — это совокупность свойств продукции, обуславливающих её пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с её назначением. А контроль качества — это процесс получения и обработки информации об объекте с целью определения нахождения параметров объекта в заданных пределах.

Процесс контроля заключается в установлении соответствия действительных значений физических величин установленным предельным значениям. Контроль должен ответить на вопрос, находится ли контролируемая физическая величина в поле допуска или выходит за его пределы. Контроль параметров и характеристик объекта, связанный с нахождением действительных значений физических величин, называется измерительным контролем.

В тех случаях, когда нет необходимости определять числовые значения физических величин, а требуется установить только факт нахождения параметра в поле допуска или выхода из него, производится качественная

оценка параметров объекта, то есть осуществляется качественный контроль.

Рассмотрим существующий подход к контролю качества горючего ракет космического назначения при долгосрочном хранении его в резервуарах на заправочных станциях на примере горючего несимметричного диметилгидразина (НДМГ).

Несимметричный диметилгидразин является одним из наиболее широко применяемых в настоящее время ракетных горючих. По внешним признакам это бесцветная или слегка желтоватая весьма летучая жидкость с запахом, подобным запаху аммиака.

Основным компонентом горючего, которое имеет также условное наименование «гептил», является собственно НДМГ, химическая формула которого $(\text{CH}_3)_2\text{N}_2\text{H}_2$, продукт несимметричного замещения двух атомов водорода в молекуле гидразина радикала CH_3 . Основные физические характеристики НДМГ представлены в табл. 1.

НДМГ с азотнокислотными окислителями взаимодействует очень активно и самовоспламеняется. К конструкционным материалам не агрессивен. Для хранения и транспортировки НДМГ применяются емкости из углеродистой стали Ст-3, для баков ракет — алюминиевые сплавы АМг-3 или АМг-6. Постоянный контакт с воздухом недопустим, так как НДМГ активно поглощает кислород и окисляется, поэтому его хранят в герметично закрытых емкостях при максимальной степени заполнения под азотной «подушкой». Герметичное хранение необходимо также в связи с большой гигроскопичностью продукта, особенно при повышенной температуре и влажности воздуха. Емкости снабжают устройствами для контроля давления и поддержания его на заданном уровне.

НДМГ — весьма токсичный продукт. Поражение им возможно при вдыхании паров и в результате всасывания его через кожу, вследствие чего появляется боль, головокружение, слабость, сдавленность в груди, повышенная температура, а при сильном отравлении — боль в области сердца, красные пятна на лице и груди, развивается отек легких, наблюдается потеря сознания, судороги вплоть до смертельного исхода.

Предельно допустимая концентрация паров горючего в воздухе равна 0,0001 мг/л, по запаху же ощущается

Таблица 1

Основные физические характеристики горючего НДМГ

Горючее	Тпл, К	Т кип, К	Ткр, К	Ркр, МПа	ρ_{293° , г/см ³	C_{293} , кДж/кг	r , кДж/кг	λ_{293° , Вт/мК	v_{293° , мм ² /с	i_{293° , кДж/кг
НДМГ	215	336	523	6,08	0,7905	2,68	586	0,17	0,68	+780

концентрация лишь 0,015–0,02 мг/л, поэтому все работы с НДМГ должны быть обеспечены техническими средствами обнаружения его паров в воздухе (автоматическими газоанализаторами), особенно в подземных сооружениях и стационарных закрытых хранилищах.

Емкости хранилища снабжены уровнемерами для определения объема топлива и пробоотборными устройствами для пробы топлива на химический анализ.

Обеспечение и контроль физико-химического состава компонентов ракетного топлива состоит в отборе пробы его из емкости, определении характеристик продукта и сопоставлении их значений с требованиями технических условий.

Целями контроля являются:

- предотвращение поставок некачественных продуктов;
- учет состояния хранимых запасов;
- своевременное освежение запасов.

Контроль осуществляется средствами стационарной физико-химической лаборатории.

В зависимости от числа определяемых при контроле характеристик компонента предусмотрены полный и контрольный анализы, каждый из которых выполняется в зависимости от обстоятельств перемещения продукта и сроков его хранения.

При всех перемещениях компонента (из транспортных средств в емкость хранилища, при доливе или освобождении емкости, сливе из ракеты и т.п.) общим правилом является: контрольный анализ проб, отбираемых из освобождающейся емкости (кроме бака ракеты), и не позднее чем в суточный срок полный анализ проб, отбираемых из принимающей емкости.

В процессе хранения компонента периодически в соответствии с утвержденным планом производится контрольный и полный анализы по срокам хранения:

- контрольный анализ всех компонентов выполняется 1 раз в три месяца;
- полный анализ производится по всем компонентам, как правило, 1 раз в год. В то же время период между анализами может отличаться для различных продуктов.

Отбор проб для анализа производится пробоотборными устройствами, обеспечивающими получение «усред-

ненной» по объему продукта пробы, при этом составляется «акт отбора». Все пробы учитываются в «Журнале регистрации проб» физико-химической лаборатории, а результаты анализов заносятся в «Журнал учета анализов».

По результатам каждого анализа (полного или контрольного) составляется паспорт продукта, действующий до очередного анализа и являющийся важным документом-носителем исходных данных для расчета объема компонента при заправке ракеты или космического аппарата.

В стандартах на компоненты ракетного топлива имеется более 15 различных показателей, по которым выносятся суждения о их свойствах.

По одним показателям можно получить представление об эксплуатационных свойствах КРТ, т.е. о том, как данный компонент будет вести себя при сгорании в двигателе, будет ли вызывать коррозию элементов двигателя и тары и т.п. Другие показатели служат для характеристики химического состава и, следовательно, косвенно тоже выражают эксплуатационные свойства КРТ.

Имеется ряд показателей, которыми пользуются, главным образом, для контроля кондиционности партий КРТ; при определении химической природы топлива подобные показатели полезны лишь в сочетании с другими.

Показатели КРТ широко используются в следующих случаях: при контроле качества компонента на производстве, в эксплуатации, при исследованиях и разработке новых топлив, изучении изменения свойств КРТ в условиях хранения, транспортировки и применения.

Кроме, собственно, НДМГ — основного компонента, дающего название горючему, продукт включает также некоторое количество примесей (табл. 2), которые являются неизбежным следом технологии получения горючего или результатом его окислительного разложения. Это метилендиметилгидразин — $(\text{CH}_3)_2\text{N}_2\text{HCH}_2$, диметиламин $(\text{CH}_3)_2\text{NH}$, вода и другие вещества.

Содержание этих примесей является контролируемым признаком качества горючего, так как с ростом их содержания ухудшаются энергетические и кинетические свойства.

Качество НДМГ должно удовлетворять спецификации НАТО Р-922, Mil-25604С или ВА-РР-202. Требования этих спецификаций и фактическое качество НДМГ представлено в табл. 3.

Требования по содержанию в НДМГ воды и механических примесей

Таблица 2

Примеси	Допустимое содержание в процентах от массы (не более чем)		
	При закладке горючего на длительное хранение	При заправке ампулизованных ракет и им подобных объектов	При заправке для немедленного пуска
Вода	0,3	0,4	0,5
Механические	0,003	0,003	0,005

Таблица 3

Техническое соответствие НДМГ

Характеристика	Технические требования	Фактическое качество
Плотность при 20°C	0,783-0,786	0,785
Содержание % НДМГ	не менее 98	99,2
Содержание % Воды	не более 0,3	0,1
Оптическая плотность	не менее 90	96
Фракционный состав Температура отгона °C		
10 %	не ниже 61,5°C	62,8°C
90%	не выше 64, 5°C	63,9°C

В тех случаях, когда необходимо определить качество горючего, производится забор проб из емкости, где хранится данное горючее и отправляется на химический анализ в стационарную физико-химическую лабораторию, которая проводит полный или контрольный анализ проб горючего и выносит результат не позднее 24 часов с момента забора проб.

При дифференциальном анализе качества горючего за основной показатель может приниматься плотность данного горючего, которую могут проверить непосредственно на заправочной станции, одним из основных приборов, которым измеряется плотность жидкости является ареометр.

Отсчет плотности производится по делению, до которого ареометр погружается в жидкость. Отсчет производится по верхнему краю мениска. Измерение производят при температуре окружающей среды. Для приведения плотности к плотности при нормальных условиях ($t = 20^\circ\text{C}$) используется формула:

$$\rho_{20} = \rho'_t + \gamma(t - 20), \tag{1}$$

где ρ_{20} — плотность при нормальной температуре (20°C); ρ'_t — плотность, измеренная при температуре t ; γ — температурная поправка.

Процесс измерения плотности является технологически сложным и требует наличия определенных навыков у личного состава подразделений космодрома, в связи с чем возникает ряд проблем, а именно:

1. Невозможность дежурной смены заправочной станции определить качество горючего собственными силами;
2. Процесс забора проб и доставки их в стационарную физико-химическую лабораторию для определения пригодности горючего является трудоемким и затратным по времени;
3. Высока вероятность ошибки в определении качества горючего;
4. Проведение работ личным составом заправочной станции сопровождается риском для их жизни.

Далее рассмотрен один из возможных подходов к оперативному контролю горючего в местах его хранения, основанный на измерении удельной электропроводности горючего при воздействии на него электромагнитного поля в диапазоне от 0,9 кГц до 10 МГц.

Для более полного понимания данного подхода для начала предлагается рассмотреть основные понятия.

Потребуются большие затраты времени, если попытаться иллюстрировать на примерах научное и техническое значение классификации величин. Однако, упомянем лишь название чрезвычайно важного класса величин, имеющих направление в пространстве, которые Уильям Гамильтон, ирландский математик, разделил на скаляры, полностью изображенные одной числовой величиной, и векторы, требующие для своего определения трех числовых величин, и которые составляют предмет исчисления кватернионов в электродинамике, в электромагнитной теории поля. Он дал точное изложение теории комплексных чисел, построил систему чисел-кватернионов.

Кватернион (от латинского *quaterni* — по четыре) обобщение понятия комплексного числа. Кватернион имеет вид:

$$a + bi + cj + dk, \tag{2}$$

где a, b, c, d — действительные числа, i, j, k — три специальные (мнимые) единицы. Для кватернионов справедливы все основные законы действий, кроме коммутативности умножения. Коммутативность (от позднелатинского *commutativus* — меняющийся) или коммутативный (переместительный) закон, свойство сложения и умножения, выраженное формулами: $a + b = b + a$; $a \cdot b = b \cdot a$.

Используя векторный анализ и достижения в электродинамике, полученные другими выдающимися учеными того времени, Джеймс Максвелл обработал экспериментальные данные по электромагнитной индукции, полученные Майклом Фарадеем, ввел понятие о токах смещения в веществе любого состояния и в вакууме и установил два взаимосвязанных уравнения, характеризующих распространение электромагнитной энергии

в веществе, динамические процессы в нем, протекающие в течение времени при различных частотах колебаний электромагнитного поля.

Отметим, что уравнение электрической индукции справедливо, если в решении процессов, связывающих изменяющиеся в зависимости от времени электрические и магнитные поля, используются удельные плотности токов в веществе.

Во всем диапазоне частотного спектра, практически от 0 (постоянный ток) до 10^{18} Гц (рентгеновское излучение) и выше справедливы два уравнения поля, которые описывают накопление и рассеяние энергии в веществе. Характер распространения электромагнитных колебаний в нем описывают следующими выражениями взаимосвязанных параметров электромагнитного поля:

$$\operatorname{rot} H = i + \varepsilon; \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} E = -\mu, \quad (4)$$

где H и E — векторы напряженности магнитного и электрического полей; ε и μ — абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости; i — плотность тока.

Электрические и магнитные свойства вещества в синусоидальных полях характеризуются комплексными величинами. Действительные и мнимые части этого полного комплексного переменного являются сопряженными функциями (четные и нечетные функции) переменной частоты ω .

При создании уравнений решающую роль сыграло введение Максвеллом понятия плотности тока смещения, выраженного формулой:

$$i_{\text{см}} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (5)$$

и его гипотеза о том, что ток смещения (ток «связанных» зарядов) порождает магнитное поле по такому же закону, как и ток проводимости за счет количества движения «свободных» зарядов.

Из этих уравнений, а также из уравнения

$$\operatorname{div} E = 4\pi p \quad (6)$$

представляющего собой выражение системы Гаусса в дифференциальной форме, и из уравнения, выражающего вихревой характер магнитного поля

$$\operatorname{div} H = 0, \quad (7)$$

вытекает очень важное следствие, которое позволило Максвеллу предсказать существование электромагнитных волн, в том числе свободных волн без источников питания, и электромагнитную природу света.

Из уравнения (4) следует, что согласно закону Фарадея изменение магнитного поля порождает вихрь электрического поля. При отсутствии источников питания уравнение (3) примет вид:

$$\operatorname{rot} H = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (8)$$

Определив основные понятия, можно перейти к рассмотрению особенностей электромагнитной индукции в жидкостях.

Допустим, что все виды помех, имеющих место обычно в процессе определения удельных электромагнитных параметров жидкостей устранены и наблюдается истинная динамика электромагнитных процессов в них.

При этом жидкость помещена в электромагнитное поле, имеющее различную частоту в рабочем объеме датчика. Температура жидкости в рабочем объеме может быть различна.

Преобразуем уравнение электрической индукции (3) в вид:

$$\operatorname{rot} H = e^{j\omega t} \cdot E_0 (\varepsilon + j\omega \dot{\varepsilon}) \quad (9)$$

где i — плотность тока, представленная, как

$$i = \varepsilon \cdot E = \varepsilon \cdot e^{j\omega t} \cdot E_0;$$

ε — активная удельная электропроводность жидкости, См/м;

$\dot{\varepsilon}$ — абсолютная комплексная диэлектрическая проницаемость жидкости.

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon \cdot e^{-j\varphi} = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (10)$$

где ε' — активная составляющая, Ф/м;

ε'' — реактивная составляющая, Ф/м.

С учетом выражения (10) получим:

$$\operatorname{rot} H = e^{j\omega t} \cdot E_0 \cdot (\varepsilon + j\omega \varepsilon \cdot e^{-j\varphi}) \quad (11)$$

откуда следует, что полная удельная электропроводность жидкости может быть представлена в виде:

$$\dot{Y} = \varepsilon + \varepsilon \omega \cdot e^{-j\varphi} \quad (12)$$

Второе слагаемое в выражении (12) представляет собой поляризационную составляющую, обусловленную количеством движения токов смещения, возникающих за счет ориентации «связанных» зарядов в электромагнитном поле.

Представим $e^{-j\varphi}$ в виде:

$$e^{-j\varphi} = \cos\varphi - j\sin\varphi \quad (13)$$

и подставим его в выражение (12). В результате получим:

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= \varepsilon + \varepsilon \omega \cos\varphi (\tan\varphi + j) = \\ &= \varepsilon + \varepsilon \omega \cos\varphi \cdot \tan\varphi + j\varepsilon \omega \cos\varphi, \end{aligned} \quad (14)$$

где $\tan\varphi$ — тангенс угла потерь, возникающих за счет колебаний в синусоидальном электромагнитном поле. Они не учитывают потери, обусловленные количеством движения так называемых «свободных» носителей зарядов. В определение $\tan\varphi$ не входит величина ε , т.е. $\tan\varphi = \varepsilon' / \varepsilon''$.

В наиболее общем случае полный ток \dot{I} в жидкости, подверженный воздействию внешнего электромагнитного поля в виде переменного напряжения V между электродами в рабочем объеме емкостного датчика может быть записан в виде:

$$\dot{I} = K^{-1} \cdot V [\varkappa + \varepsilon \omega \cos \varphi (\tan \varphi + j)], \quad (15)$$

где K — геометрический фактор емкостного датчика, м^{-1} .

Тогда геометрический фактор идеального датчика K_0 будет равен:

$$K_0 = \varkappa / G, \quad (16)$$

где \varkappa — активная удельная электропроводность, См/м ;

G — активная измеренная электропроводность в жидкости в рабочем объеме датчика, См .

Из уравнения (14) следует, что активная удельная электропроводность состоит из двух слагаемых. Одно из них \varkappa обусловлено количеством движения в жидкости под воздействием электромагнитного поля при данной частоте синусоидальных колебаний и при данной температуре так называемых «свободных» зарядов (ионов), образующих ток проводимости, способствующий переносу «свободных» зарядов от одного потенциального электрода (электродов) к другому (другим) потенциальному электроду.

Другое слагаемое ($\varepsilon \cdot \omega \cdot \cos \varphi \cdot \tan \varphi$) обусловлено количеством движения так называемых «связанных» зарядов в жидкости, образующих ток смещения, циркулирующий в жидкости рабочего объема датчика в такт изменения частоты колебаний электромагнитного поля. Это активная ориентационная часть тока смещения электрически несимметричных молекулярных ассоциатов жидкости.

Каждое из слагаемых в зависимости от температуры имеет противоположные приращения их активных составляющих. Обратим внимание на особенности измерения электрофизических сосредоточенных параметров в радиотехнике и электронике.

Измерения активных показателей в электронных системах (не в жидкости), использующих малогабаритные R , C , L элементы, как правило, являются сосредоточенными в низкочастотном диапазоне колебаний и высокостабильными. Для их метрологической аттестации и поверки используются высокоточные эталоны с сосредоточенными параметрами. В таких схемах в процессе измерения активных потерь за счет токов смещения нет или они очень малы.

В жидкостях же в рабочем объеме датчика имеют место распределенные параметры как в процессе движения «свободных» носителей зарядов, так и токов смещения. Активные удельные составляющие за счет токов смещения по сравнению с активными составляющими за счет токов переноса «свободных» зарядов в электромагнитном поле, действующего на жидкость, могут иметь любую

величину, зависящую от рода жидкости и конструктивных особенностей датчика.

Это означает, что средства измерения удельных параметров жидкостей требуют двойной аттестации. Одна из них относится к электронному блоку и его согласованию с датчиком с заполненным веществом и без него в заданном диапазоне частот колебаний электромагнитного поля. Вторая аттестация требуется для всей в целом системы измерения по жидким стандартным образцам (СО), принадлежащим к данному роду, а также к различным видам этого рода.

Как уже отмечалось, из уравнения (14) следует, что активная удельная электропроводность жидкости является слагаемым двух величин. В сумме это скалярный показатель активной удельной электропроводности, который представляет собой в процессе измерения одну величину действующего значения. Каждое из слагаемых является активной величиной и в зависимости от температуры имеет противоположные приращения. В процессе изучения этого уникального явления было обнаружено новое свойство жидкости, приобретенное в электромагнитном поле с характеристической частотой F_x и принадлежащее только данной жидкости, при которой в диапазоне температур от точки кипения до точки замерзания сохраняется неизменной активная удельная электропроводность \varkappa_{F_x} .

В результате был получен «Способ определения рода жидкостей», который может быть использован для оперативного определения рода и состояния жидкостей как органического, так и неорганического класса соединений — диамагнетиков и парамагнетиков. Данный способ лег в основу разработки подхода к оперативному контролю качества горючего жидкого ракетного топлива при долгосрочном хранении его в резервуарах на заправочных станциях.

Сущность способа заключается в следующем. Измеряют активные удельные электропроводности жидкости в диапазоне частот от 0,9 кГц до 10 МГц не менее, чем для двух различных температур в диапазоне от точки кипения до точки замерзания жидкости и по пересечению зависимостей активных электропроводностей от частоты синусоидальных электромагнитных колебаний поля находят характеристическую частоту колебаний F_x , которую используют как основной критерий рода и качества жидкостей.

Выбранный диапазон частот синусоидальных электромагнитных колебаний позволяет характеризовать изменение энергетики жидкости, сохраняя её характеристическую активную удельную электропроводность неизменной, также, как и характеристическую активную электропроводность рабочего объема датчика при различных температурах.

Выбранный диапазон температур обусловлен тем, что ниже температуры замерзания жидкость застывает, а выше температуры кипения происходит появление газовой фазы, что отражается на измерении.

Предложенный способ анализа жидкости был реализован на установке, включающей в себя: емкостной датчик, в конструкции которого имеется измеритель температуры, электронный блок, обеспечивающий воздействие на исследуемую жидкость электромагнитным полем с частотой f от 1 кГц до 10 МГц и измерительный блок для определения активной проводимости и других вспомогательных параметров жидкости, соединенный с компьютером.

В качестве оперативного измерителя величины активной электропроводности в рабочем объеме датчика G , активной удельной электропроводности α , характеристической синусоидальной частоты F_x электромагнитных колебаний поля, температуры t жидкостей использовалась автоматизированная система анализа.

Исследование рода жидкостей и разновидностей этого рода, а также состояния жидкостей проводили следующим образом. Сначала подготовленный чистый сухой датчик помещали в сосуд, заполненный исследуемой жидкостью. Затем жидкость термостатировали и проводили измерения активных электропроводностей при изменении частот электромагнитных синусоидальных колебаний от 1 кГц до 10 МГц не менее, чем для двух температур исследуемой жидкости. В качестве жидкости использовали горючее НДМГ.

Полученный результат приведен в табл. 4. Видно, что НДМГ соответствует своя характеристическая частота F_x электромагнитных колебаний и активная удельная электропроводность α_{F_x} . Погрешность определения частоты колебаний F_x не превышала 10 Гц, а удельной электропроводности α , См/м, не превышала 1% относительных.

Таблица 4

Результат эксперимента

Жидкость	Температуры измерений, t , °C	F_x , кГц	α_{F_x} , См/м
Несимметричный диметилгидразин (НДМГ) — $(\text{CH}_3)_2\text{N}_2\text{H}_2$	-60/+60	3800	$8,0 \cdot 10^{-5}$

На рис. приведены графические зависимости активной электропроводности α_{F_x} НДМГ от частоты F_x электромагнитного поля при четырех температурах. Символом ξ отмечена точка пересечения зависимостей.

По точке пересечения этих зависимостей ξ и определяется характеристическая частота F_x синусоидальных колебаний, при которой для данного горючего имеет место неизменность его характеристической электропроводности α_{F_x} от температуры.

На рис. 1 видно, что в точке ξ активная электропроводность α_{F_x} горючего НДМГ при частоте F_x электромагнитного поля при четырех температурах остается неизменной и это свойство жидкости справедливо для всех жидких сред, что было доказано экспериментально. Для каждой жидкости существует своя частота электромагнитного поля, при которой ее активная электропроводность остается неизменной при различных температурах. В случае качественного изменения состава жидкости точка ξ будет смещаться, что позволит создать новый подход к оперативному контролю горючего. Разместив датчик, который будет откалиброван под данный вид горючего в емкость

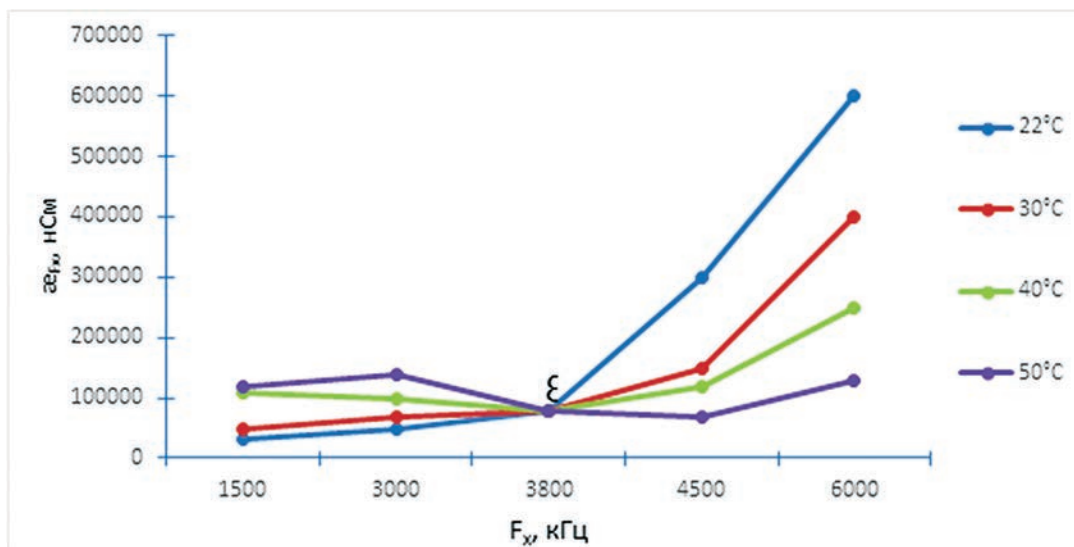


Рис. Зависимость активной электропроводности α_{F_x} НДМГ от частоты F_x электромагнитного поля при четырех температурах

с горючим, появится возможность в режиме реального времени контролировать качественные изменения горючего и принимать необходимые меры для восстановления установленных параметров для данного горючего или его своевременной замены, а также пересмотреть систему полных и контрольных проверок. В перспективе увеличения количества пусков ракет космического назначения предлагаемый подход, не увеличивая нагрузки на физико-химическую лабораторию, позволит делегировать часть контрольных функций личному составу боевых расчетов наземных испытательных комплексов. Также данный подход помогает сформировать ряд правил для различных нештатных ситуаций, связанных с принятием решения по замене горючего или его стабилизации, которые могут войти в экспертную систему поддержки принятия решения автоматизированной системы управления предстартовой подготовки и пуска ракет космического назначения.

Литература

1. *Зрелов В.Н., Серегин Б.П.* Жидкие ракетные топлива. М.: Химия, 1975. 320 с.
2. *Большаков Г.Ф.* Химия и технология компонентов жидкого ракетного топлива. Л.: Химия, 1983. 320 с.
3. *Паушкин Я.М.* Химия реактивных топлив. М.: АН СССР, 1962. 436 с.
4. *Сарнер С.* Химия ракетных топлив. М.: Мир, 1969. 488 с.
5. *Светлорусов М.А., Орлов А.С.* Метод снижения погрешности дозирования при заправке высококипящих компонентов ракетного топлива для РН «Союз» и «Молния» // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2010. № 627. С. 123–129.
6. *Радионов В.А.* Модель повышения оперативности контроля технического состояния сложных систем // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2010. № 628. С. 91–94.
7. *Басотин Е.В., Гравченко Ю.А., Гранкин Б.К., Козлов В.В., Сулаберидзе Д.В.* Модели нештатного функционирования пневмогидравлических систем комплексов заправки ракет космического назначения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2016. № 655. С. 140–150.
8. *Максвелл Д.К.* Статьи и речи. М.: Наука, 1968. 423 с.
9. *Полак Л.С.* Уильям Гамильтон 1805–1865 гг. М.: Наука, 1993. 267 с.
10. *Усиков С.В.* Определение электропроводности и диэлектрической проницаемости растворов. СПб.: Теза, 1997. 173 с.
11. *Бройль Л.* Революция в физике. М.: Атомиздат, 1965. 119 с.
12. Патент РФ № 2383010 Способ определения рода жидкости / Усиков С.В., Астратъева Н.В., Васильева Л.К., Карташов Ю.И., Усиков А.С., Фоменко В.В. Заявл. 04.05.2008. Опубл. 27.02.2010. Бюл. № 6. 6 с.
13. *Гусеница Я.Н., Малахов А.В.* Имитационное моделирование реконфигурируемых метрологических комплексов // Сборник научно-методических трудов I Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития вооружения, военной и специальной техники противовоздушной и противоракетной обороны, Космических войск Воздушно-космических сил». 2016. С. 102–116.
14. *Мышко В.В., Кравцов А.Н., Копкин Е.В., Чикуров В.А.* Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния сложных систем: монография. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. 303 с.
15. *Фендриков Н.М., Яковлев В.И.* Методы расчетов боевой эффективности вооружения. М.: Воениздат, 1971. 224 с.
16. *Шерстобитов С.А.* Методика формирования требований к системе контроля функционирования автоматизированного рабочего места по поверке средств измерений // Информатика и системы управления. 2017. № 1 (51). С. 95–99.
17. *Мищенко И.В., Миронов Е.А., Малахов А.В., Смагин В.А.* Средства измерений давления и вакуума, параметров потока, расхода, уровня и объема веществ и их поверка. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2015. 177 с.
18. *O'Connell J.* Metrology: The Creation of Universality by the Circulation of Particulars // Social Studies of Science. 1993. Vol. 23. Pp. 129–173.

THE APPROACH TO OPERATIONAL QUALITY CONTROL OF COMPONENTS OF LIQUID ROCKET FUEL DURING LONG TERM STORAGE IN TANKS AT PETROL STATIONS

ALEXANDER N. KRAVTSOV,

St. Petersburg, Russia, kan1970@bk.ru

ARKADIJ J. VELICHKO,

Plesetsk, Russia, R1-B4@mail.ru

VALENTIN D. USIKOV,

St. Petersburg, Russia, usikov_1989@list.ru

KEYWORDS: asymmetric dimethylhydrazine; rocket fuel; operational control of the quality of rocket fuel; electromagnetic field; active electrical conductivity.

ABSTRACT

This paper analyses the approach to control the quality of fuel liquid rocket fuel for long-term storage in tanks at petrol stations, for example, unsymmetrical dimethylhydrazine, and given the existing shortcomings of an approach to control the quality of fuel when exposed to electromagnetic fields at various frequencies of sinusoidal vibrations and temperatures. The proposed approach is based on the property of liquids in which at a certain characteristic frequency acquired in the frequency changing electromagnetic field in the range from 0.9 kHz to 10 MHz, the active conductivity remains unchanged at different temperatures, which allows to characterize the liquid and change its state. This property of liquids has helped with new positions to provide a theoretical framework to develop scientific and methodological apparatus operational quality control of fuel on the basis of the results of measurement of the specific electromagnetic characteristics. The results of experimental studies of fuel unsymmetrical dimethylhydrazine. Themselves the specific parameters are significantly different, as are directly associated with different forms of matter, at the same time contained in this fluid. These differences are of a structural nature and very significant. The proposed approach allows to continuously monitor quality of fuel changes, that occur during long-term storage, transportation, violation of storage technology, and to signal the impossibility of use of this fuel to fuel space rockets. Proposed ways of implementing this approach in filling stations space rockets. Due to the role of the interaction of military units metrological and physical-chemical laboratories for the calibration of sensors for monitoring fuel quality. Analyzed the relevance of this approach and the prospect of its application in military and space industry for quality control of various combustible liquid rocket fuels.

REFERENCES

1. Zrelov V.N., Seregin B.P. *Zhidkie raketny'e topliva* [Liquid rocket fuels]. Moscow: Chemistry, 1975. 320 p. (In Russian)
2. Bol'shakov G.F. *Ximiya i texnologiya komponentov zhidkogo raketnogo topliva* [Chemistry and technology of components of liquid rocket fuel]. Leningrad: Chemistry, 1983. 320 p. (In Russian)
3. Paushin Ya.M. *Ximiya reaktivny'x topliv* [Chemistry of jet fuels]. Moscow: AS USSR, 1962. 436 p. (In Russian)
4. Sarner S. *Ximiya raketny'x topliv* [Rocket fuel chemistry]. Moscow: Mir, 1969. 488 p. (In Russian)
5. Svetlorusov M.A., Orlov A.S. Metod snizheniya pogreshnosti dozirovaniya pri zapravke vysokokipyashchih komponentov raketnogo topliva dlya RN «Soyuz» i «Molniya» [Method of decrease in an error of dispensing when filling of the high-boiling components of rocket fuel for RN "Union" and "Lightning"]. *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo*. [Proc. of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky]. 2010. No. 627. Pp.123-129. (In Russian)
6. Radionov V.A. *Model' povysheniya operativnosti kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnyh sistem* [Model of increase in efficiency of control of technical condition of difficult systems]. *Trudy voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo*. [Proc. of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky]. 2010. No. 628. 2010. Pp. 91-94. (In Russian)
7. Basotin E.V., Gravchenko YU.A., Grankin B.K., Kozlov V.V., Sulaberidze D.V. Modeli neshtatnogo funkcionirovaniya pnevmogidravlicheskih sistem kompleksov zapravki raket kosmicheskogo naznacheniya [Models of emergency functioning of pneumatichydraulic systems of complexes of gas station of rockets of space appointment]. *Trudy voenno-ko-*

smicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo. [Proc. of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky]. 2016. No. 655. Pp.140-150. (In Russian)

8. Maksvell D.K. *Stat'i i rechi* [Articles and speeches]. Moscow: Nauka, 1968. 423 p. (In Russian)

9. Polak L. S. *Uil'jam Gamil'ton 1805-1865 gg* [William Hamilton 1805-1865]. Moscow: Nauka, 1993. 267 p. (In Russian)

10. Usikov S.V. *Opredelenie jelektroprovodnosti i dijelektricheskoy pronicaemosti rastvorov* [Determination of electrical conductivity and dielectric permittivity of the solutions]. St. Peterburg: Teza, 1997. 173 p. (In Russian)

11. Lui De Brojl'. *Revoljucija v fizike* [The revolution in physics]. Moscow: Atomizdat, 1965. 119 p. (In Russian)

12. Patent RF 2383010. *Sposob opredelenija roda zhidkosti* [The method of determining the type of fluid]. Usikov S.V., Astrat'eva N.V., Vasil'eva L.K., Kartashov Ju.I., Usikov A.S., Fomenko V.V. Declared 04.05.2008. Published 27.02.2010. Bulletin No. 6. 6 p. (In Russian)

13. Gusenitsa Y.N., Malakhov A.V. *Imitacionnoe modelirovanie rekonfiguriruemyh metrologicheskikh kompleksov* [Simulation of reconfigurable metrological complexes]. *Sbornik nauchno-metodicheskikh trudov I Vserossijskoj nauchno-prakticheskoi konferencii "Aktual'nye voprosy razvitija vooruzhenija, voennoj i special'noj tehniki protivovozdushnoj i protivoraketnoj oborony, Kosmicheskikh vojsk Vozdushno-kosmicheskikh sil"* [Proc. of the The collection of scientific and methodological papers I all-Russian scientific-practical conference "Topical issues of development of armaments, military and special equipment and missile defense, the Space forces, aerospace defense forces"]. 2016. Pp. 102-116. (In Russian)

14. Myshko V.V., Kravtsov A.N., Kopkin E.V., Chikurov V.A. *Teoreticheskie osnovy i metody optimizacii analiza tehnikeskogo sostojanija slozhnyh sistem* [Theoretical bases and

methods of optimization of technical analysis of complex systems]. St. Petersburg: *Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo Publ.*, 2013. 303 p. (In Russian)

15. Fendrikov N.M., Yakovlev V.I. *Metody' raschetov boevoj e'ffektivnosti vooruzheniya* [Methods of calculating the combat effectiveness of weapons]. Moscow: Voenizdat, 1971. 224 p. (In Russian)

16. Sherstobitov S.A. *Metodika formirovanija trebovanij k sisteme kontrolja funkcionirovanija avtomatizirovannogo rabocheho mesta po poverke sredstv izmerenij* [The technique of formation of system requirements, control operation of the workstation for verification of measuring instruments]. *Informatika i sistemy upravlenija* [Informatics and control systems]. 2017. No. 1 (51). Pp. 95-99. (In Russian)

17. Mishhenko I.V., Mironov E.A., Malahov A.V., Smagin V.A. *Sredstva izmerenij davlenija i vakuuma, parametrov potoka, rashoda, urovnja i obema veshhestv i ih poverka: uchebnik* [Means of measurement of pressure and vacuum, flow parameters, flow, level and volume of substances and their verification: a tutorial]. St. Peterburg: *Voenno-kosmicheskaya akademiya imeni A.F. Mozhaiskogo Publ.*, 2015. 177 p. (In Russian)

18. O'Connell J. Metrology: The Creation of Universality by the Circulation of Particulars. *Social Studies of Science*. 1993. Vol. 23. Pp. 129-173.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Kravtsov A.N., PhD, Docent, Head of the Department of Metrological Support of Arms, Military and Special equipment of the Military Space Academy;

Velichko A.J., Head of the Metrological Service of the main test spaceport of the Ministry of Defense of the Russian Federation;

Usikov V.D., Course officer – Teacher, of the Military Space Academy.

For citation: Kravtsov A. N., Velichko A. J., Usikov V. D. The approach to operational quality control of components of liquid rocket fuel during long term storage in tanks at petrol stations. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 1. Pp. 29-38. doi 10.24411/2409-5419-2018-10017 (In Russian)

РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ
ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ



СВЯЗЬ

Информационные и коммуникационные
технологии

24—27 апреля 2018

30-я юбилейная
международная выставка

Организатор:



При поддержке:

- Министерства промышленности и торговли РФ
- Федерального агентства связи (РОССВЯЗЬ)
- Российской ассоциации электронных коммуникаций (РАЭК)

Под патронатом ТПП РФ

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр»

www.sviaz-expo.ru

12+ Реклама



doi 10.24411/2409-5419-2018-10018

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И СТАНЦИЙ С УЧЕТОМ СРЕДСТВ ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОГО НАПАДЕНИЯ

**КОНОВАЛЬЧИК
Артем Павлович¹**

**КОНОПЕЛЬКИН
Максим Юрьевич²**

**ПЛАКСЕНКО
Олег Александрович³**

**ЩИРЫЙ
Андрей Олегович⁴**

Сведения об авторах:

¹к.т.н., заместитель начальника Научно-технического центра воздушно-космической обороны по специальным проектам акционерного общества «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей», г. Москва, Россия, konovalchik@almaz-antey.ru

²руководитель группы Научно-технического центра воздушно-космической обороны акционерного общества «концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей», г. Москва, Россия, m.konopelkin@almaz-antey.ru

³к.т.н., начальник отдела Научно-технического центра воздушно-космической обороны, акционерного общества «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей», г. Москва, Россия, o.plaksenko@almaz-antey.ru

⁴к.т.н., заместитель начальника отдела Научно-технического центра воздушно-космической обороны, акционерного общества «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей», г. Москва, Россия, andreyschiriy@almaz-antey.ru

АННОТАЦИЯ

В работе показаны актуальность разработки отечественной системы автоматизированного проектирования в полном сквозном цикле радиолокационных систем (комплексов, станций). Представлена общая архитектура системы: деление на условные клиентскую и серверную части; при этом клиентская часть представляет собой автоматизированное рабочее место разработчика, содержит средства ввода и редактирования исходных данных, просмотра результатов вычислений, функционал управления вычислительными модулями, а серверная часть состоит из вычислительных модулей, допускающих запуск как локально, так и в распределенной вычислительной среде, и реализующих функционал моделирования работы как отдельных узлов радиолокационных станций, так и работу радиолокационных станций, комплексов, систем в целом. Описана концепция пяти уровней проектирования радиолокаторов в разрабатываемой системе, это следующие уровни. Системный уровень: размещение на картах местности радиолокационных станций, компонентов радиолокационных комплексов, целей, а также маршрутов их движения, источников помех с заданием типов; компоненты выбираются из библиотек готовых изделий, а также из элементов, создаваемых на нижних уровнях проектирования. Структурный уровень: сборка структуры радиолокационных станций из составных частей. Функционально-логический уровень: варьирование алгоритмов цифровой обработки информации с целью обеспечения оптимального их сочетания по выбранным критериям эффективности. Схемотехнический уровень: создание принципиальных схем блоков. Конструктивно-технологический уровень: создание трехмерных моделей и чертежей конструктивных элементов, получение комплекта рабочей конструкторской документации. Специфика разрабатываемой системы автоматизированного проектирования наиболее выражена в учете сценариев использования проектируемого изделия в условиях конкретных средств воздушно-космического нападения и обороны; эта специфика проявляется в наибольшей степени на системном уровне проектирования. В работе обсуждены также подходы для реализации имитационного моделирования. В общем виде описана интеграция разрабатываемой системы с контрольно-измерительной аппаратурой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: САПР; РЛС; имитационное моделирование; автоматизированное проектирование; обработка информации.

Для цитирования: Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Отечественная система автоматизированного проектирования радиолокационных систем, комплексов и станций с учетом средств воздушно-космического нападения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 1 С. 40-47. doi 10.24411/2409-5419-2018-10018

Введение

Концерну ВКО „Алмаз-Антей“ при осуществлении комплексного проектирования сложных радиотехнических средств и систем, в частности радиолокационных комплексов (РЛК), требуется решать задачи выбора и оптимизации проектных параметров радиолокационных устройств, в т.ч. антенных систем, приемо-передающих трактов радиолокационных (РЛ) систем (РЛС), алгоритмов и устройств цифрового формирования и обработки радиолокационных сигналов, а также радиолокационных систем в целом. В настоящий момент не существует отечественных систем автоматизированного проектирования (САПР), позволяющих решать эти задачи в комплексе. Поэтому для решения подобных задач предприятиями Концерна используются ряд разрозненных программных решений собственной разработки и их зарубежных аналогов. Ввиду ряда ограничений, вызванных санкциями, закрытой тематикой работ, а также в целях импортозамещения, весьма актуальным является создание САПР РЛС, позволяющей решать указанные выше задачи в непрерывном сквозном цикле проектирования. Разработка САПР РЛС ведется силами АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»,

его дочерних предприятий и компаний, обладающих компетенциями в области проектирования РЛС, с использованием имеющегося у них задела.

Общая структура систем автоматизированного проектирования радиолокационных систем

В основе общей структуры САПР РЛС лежит разделение системы на две части (рис.):

— автоматизированное рабочее место (АРМ) разработчика РЛС, ”клиентская” часть, содержащая средства ввода и редактирования всех исходных данных, просмотра результатов вычислений, функционал управления вычислительными модулями; эта часть должна работать под ОС Windows (так как де-факто это наиболее распространенная система на рабочих местах), но ОС Linux желательна, хотя и не критична на первых этапах;

— вычислительные модули, условно говоря “серверная” часть, хотя в общем случае эти модули должны функционировать, как в гетерогенной распределенной вычислительной среде, так и в пределах одной-единственной ПЭВМ, однако требование обеспечения удаленного запуска в гетерогенной распределенной вычислительной среде

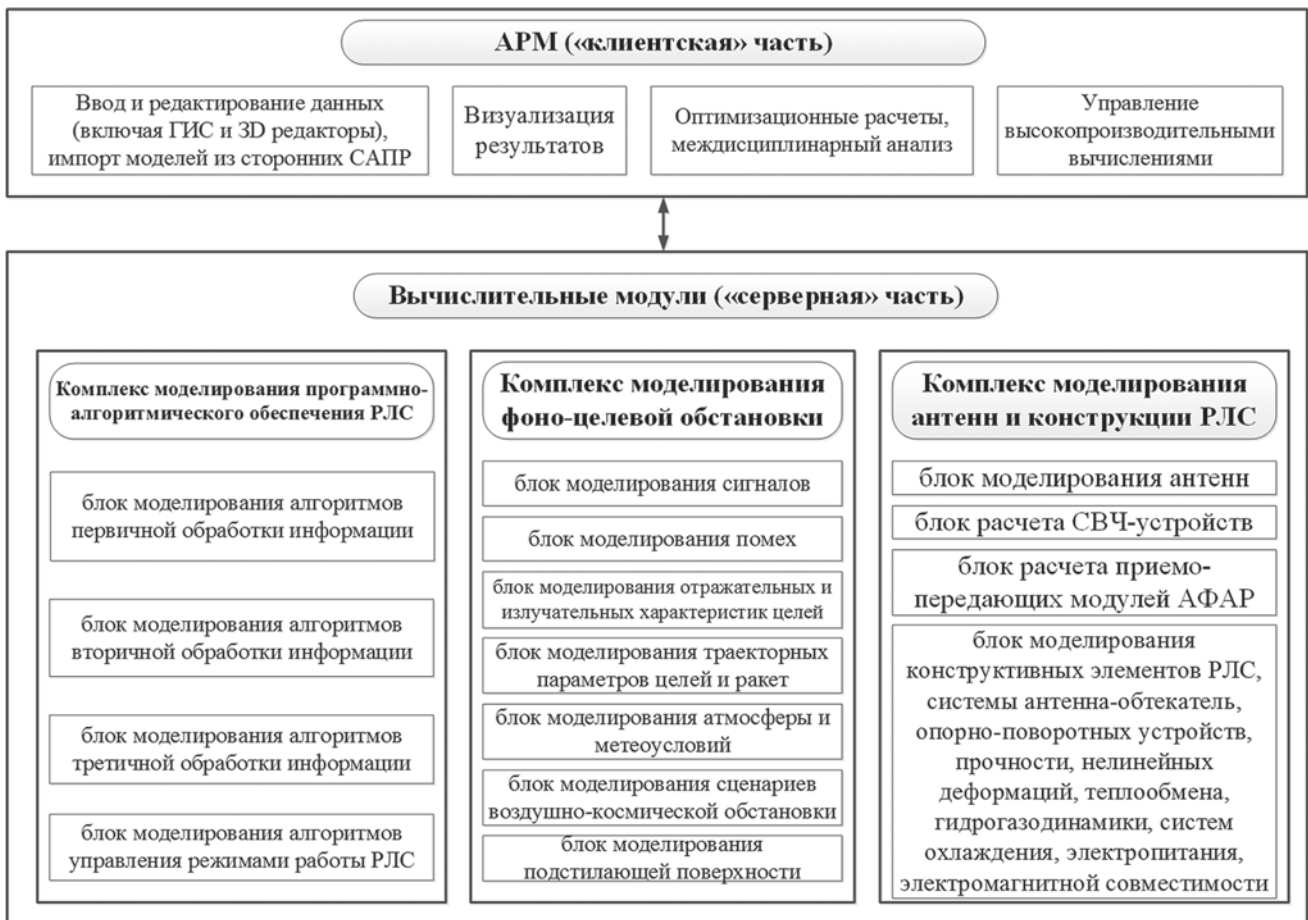


Рис. Состав и общая структура САПР РЛС

приводит к требованию межплатформенной реализации, а конкретно и для ОС Linux, и для ОС Windows.

АРМ разработчика должен включать функционал ГИС с возможностью задания слоёв (карт) электромагнитных свойств местности и матриц высот.

Вычислительные модули должны содержать комплекс моделирования фоно-целевой обстановки и комплекс моделирования программно-алгоритмического обеспечения РЛС, включающие в себя блоки моделирования алгоритмов первичной, вторичной, третичной обработки информации в условиях различной фоноцелевой и помеховой обстановки (ФЦПО), моделирования сценариев воздушно-космической обстановки, моделирования атмосферы и метеоусловий, а также моделирования алгоритмов управления режимами работы РЛС. Кроме того, должна быть возможность легкой интеграции новых моделей и алгоритмов (особенно в части алгоритмов цифровой обработки сигналов и алгоритмов моделирования фоноцелевой обстановки, алгоритмов первичной, вторичной, третичной обработки радиолокационной информации), разработанных с учетом требований заданных программных интерфейсов.

Должна обеспечиваться возможность оптимизационного подбора параметров всех проектируемых подсистем.

Вся САПР в целом должна обеспечивать функционал сквозного имитационного моделирования всей системы, когда пошагово моделируется работа всей проектируемой РЛС одновременно.

Клиентская часть должна содержать также средства ввода данных (включая функционал экспорта данных и моделей из сторонних САПР и 3D редакторов), а вычислительная часть — средства расчета для моделирования конструктивных элементов РЛС, включающая в себя блоки моделирования поворотных систем РЛС, систем электропитания, охлаждения, и т. п.

Все составные части разрабатываемой САПР будут интегрированы посредством специализированной интеграционной платформы. Выбор именно специализированной интеграционной платформы, а не универсальной, обоснован нами в [1].

Блоки, запланированные к реализации в последующих версиях САПР, на схеме не показаны (например, блок оценки экономической эффективности). Другим примером функционала, запланированного к реализации, возможно лишь в будущих версиях САПР РЛС, является поддержка проектирования загоризонтных (ЗГ) РЛС, так как эти РЛС работают в ДКМ диапазоне и для их моделирования требуется учет крайне специфических свойств среды распространения — ионосферы [2–6].

Нужно отметить, что сказанное здесь и далее про РЛС (т.е. РЛ системы), также справедливо и для РЛК (т.е. РЛ комплексов), и для отдельных РЛ станций (кроме, мо-

жет быть, системного уровня) — подразумевая, что РЛ станции входят в состав РЛ комплексов, а РЛ комплексы, в свою очередь, входят в состав РЛ систем [7–10].

Уровни проектирования радиолокационных систем в разрабатываемой систем автоматизированного проектирования

В разрабатываемую САПР РЛС закладывается концепция многоуровневого ведения проектирования РЛС с применением данной САПР:

1. Системный уровень: размещение на картах местности РЛС, компонентов радиолокационных (РЛ) комплексов, целей, а также маршрутов их движения, источников помех с заданием типов. Компоненты выбираются из существующих библиотек готовых изделий, образцов (шаблонов), а также из компонентов, создаваемых на следующих (нижних) уровнях проектирования. Позволяет оценить эффективность работы группировки РЛ средств по фиксированному набору целей с учетом местности и внешних воздействий в условиях применения конкретных средств воздушно-космического нападения (СВКН) и воздушно-космической обороны (СВКО).

2. Структурный уровень: создание структуры РЛС из готовых образцов составных частей (приемник, передатчик, антенно-фидерные устройства, опорно-поворотные устройства, АЦП/ЦАП, блок фоно-целевой обстановки и т.д.). На этом уровне проводится исследование возможности создания и оценка показателей эффективности работы РЛС, состоящей из различных составляющих для выполнения конкретной задачи в фиксированных условиях; обоснование оптимального состава РЛС. А в перспективе и функционально-стоимостной анализ различных проектных решений.

3. Логический (функционально-логический) уровень: варьирование алгоритмов цифровой обработки информации (первичной, вторичной, третичной) с целью обеспечения оптимального их сочетания по выбранным критериям эффективности. Выбор и обоснование оптимального алгоритма управления РЛС, типов и параметров используемых сигналов.

4. Схемотехнический уровень: создание принципиальных схем блоков аналоговой и цифровой обработки сигналов, устройств управления РЛС, приемных и передающих модулей, генераторов сигналов, блоков питания и т. п.

5. Конструктивно-технологический уровень: создание 3D-моделей и чертежей конструктивных элементов — компонентов РЛС (антенно-фидерные устройства, опорно-поворотные устройства, обтекатель, система охлаждения и т.д.), схем разводки плат. Разработка рабочей конструкторской документации (РКД).

Для реализации поддержки уровня 1 необходим, в том числе, функционал ГИС, включающий возможности

отображения в 2D и 3D проекциях и возможность импорта пространственных данных из различных источников (обязательное требование — поддержка формата SXF, который в настоящее время принят в качестве базового для хранения и передачи цифровых карт в государственном картографо-геодезическом фонде). Должна обеспечиваться работа не только с географическими и топографическими картами, но с любыми необходимыми цифровыми данными, имеющими пространственную привязку: матрицами свойств местности (прежде всего радиофизических свойств, например, диэлектрических), матрицами высот, метеорологическими данными (загружаемыми из открытых источников сети интернет из стандартизованных форматов). Перечисленные данные («некарты») нужны, прежде всего, для работы вычислительных модулей, но в случае необходимости должна обеспечиваться их визуализация как отдельных слоев. Также на 1 уровне необходим функционал для создания сценариев имитационного моделирования, с возможностью создания обороняющейся и нападающей боевых группировок. Моделирование РЛС в конкретных географических условиях необходимо для учета радиофизических свойств местности, а также рельефа (углы закрытия, расчёта зон видимости РЛС с учётом полета летательных аппаратов с огибанием рельефа местности). То есть будет реализован редактор радиосцены, позволяющий:

- задать положение компонентов РЛС, вписав их в рельеф местности;
- задать типы целей и их траекторию (контрольные точки, типы манёвров, ожидаемые скорости движения на участках);
- настроить режим работы РЛС: сектора сканирования, шаг сетки сканирования, режимы сопровождения и др.

Редактор радиосцены должен предоставлять возможность легкого переключения 2D-3D представлений. 2D-карта позволяет хорошо привязываться к местности, однако многие детали сцены на ней будут показаны неточно — в частности, трёхмерные траектории целей, зоны закрытия РЛС, положение главного лепестка диаграммы направленности (ДНА) РЛС и детали рельефа местности на ней могут быть показаны лишь приблизительно, в виде проекции на плоскость. 3D-карта позволяет показать детальную картинку, отображая любые объекты, включая рельеф и ДНА. Её недостаток — трудности в привязке к местности, особенно при большом увеличении.

Также на 1 уровне требуется функционал имитационного моделирования боевых действий [11–15] с возможностями создания варианта группировки своих войск (СВКО), создания варианта удара СВКН противника, создания сценария имитационного эксперимента, проведение имитационного эксперимента и фиксирование и оценка его результатов.

Для обеспечения поддержки 2 и 3 уровней реализуются программные средства т.н. программирования потоков данных (dataflow programming): то есть “сборки” необходимого функционала в виде набора параметризованных блоков, соединённых через входы и выходы (порты). Такой подход широко применяется как в относящихся к нашему проекту областях имитационного моделирования и моделирования цифровой обработки сигналов (например, Simulink), так и в других областях (например, известные системы RapidMiner и Orange Canvas, предназначенные для интеллектуального анализа неструктурированных текстовых данных и машинного обучения).

Для реализации поддержки 4 и 5 уровней на первом этапе разработки САПР РЛС предполагается интеграция с существующим программным обеспечением схемотехнического и конструкторско-технологического моделирования и проектирования.

Этапы проектирования посредством разрабатываемой САПР

В разрабатываемую САПР закладываются возможности использования на следующих этапах проектирования РЛС, нужно подчеркнуть, что это не этапы проектирования и создания конструкторской документации согласно ГОСТ, а этапы проектирования именно посредством создаваемой САПР, т.е. общий порядок её использования (далее всё сказанное про проектирование РЛС — радиолокационной системы — относится также и к проектированию РЛК, и отдельной РЛ станции) [16–19]:

1. этап предварительной оценки параметров РЛС, требуемых для обеспечения заданных характеристик (системный уровень проектирования); на данном этапе модуль предварительной оценки параметров РЛС получает в качестве входных данных численные значения характеристик, которые должны быть обеспечены и вычисляет требуемые для этого значения параметров;

2. этап инженерного анализа (системный, структурный или логический уровень проектирования); на данном этапе разработчик создает проект РЛС и конфигурирует компоненты проекта значениями параметров, полученных на предыдущем этапе, размещает проектируемую РЛС на местности, задает конструктив и типы используемых материалов, информационные связи, ФЦПО, внешние воздействия, опционально задействует аппаратные элементы; запускает расчет характеристик компонентов локально или на вычислительном кластере, в результате получают уточненные характеристики РЛС; по результатам анализа полученных значений характеристик принимается решение о переходе на следующий этап или возврате на предыдущий;

3. этап имитационного моделирования; на данном этапе разработчик задает сценарий имитационного эксперимента: состав, размещение и типы РЛС, характери-

ки зондирующих сигналов и режим работы, состав, типы и траекторные характеристики целей, типы и размещение (параметры движения) источников помех; выделяет значимые критерии эффективности и запускает моделирование; на основе анализа результатов эксперимента принимается решение о выполнении или невыполнении требований по реализации целевой функции моделируемой РЛС; в случае положительного решения происходит переход на один из последующих этапов проектирования, а в случае отрицательного — на один из предыдущих;

4. этап статистической обработки и оптимизации;
5. этап оценки экономической целесообразности;
6. этап разработки РКД.

Поддержка имитационного моделирования

Исследование процессов функционирования проектируемых РЛС в различных условиях фоно-целевой и помеховой обстановки, оценка эффективности боевого применения РЛС в составе группировок войск, а также оценка различных алгоритмических решений по обработке радиолокационной информации в РЛС, с использованием имитационной модели, предполагает формализованное описание логики функционирования исследуемых систем в соответствии со своими аналогами в реально протекающем процессе. Очень важно при разработке модели обеспечить синхронизацию всех моделируемых объектов по времени, то есть отобразить в модели реальный временной порядок и причинной-следственные связи. Ниже приводятся предложения по реализации варианта функционирования управляющей программы-планировщика (диспетчера-координатора).

В результате протекания процесса применения РЛС происходят события, переводящие систему из одного состояния в другое в определенные моменты времени. Учет категории времени позволяет рассматривать поведение или динамику системы в рамках некоторого интервала времени $[t_1, t_n] < T$. Множество моментов времени изменения состояния системы конечно и может быть описано выражением: $T = \langle t_1, t_2, \dots, t_p, \dots, t_n \rangle$, где t_i — i -ый момент времени изменения состояния системы.

Каждому моменту времени $t_i \in T$ можно поставить в соответствие элементарный оператор h_i , вычисляющий значение s_i в пространстве состояний S ($s_i \in S$) в соответствии с траекторией процесса F . Если момент времени t_i не может быть вычислен аналитически, он находится по принципу Δt , т.е. модельное время квантуется с шагом Δt и на каждом шаге проверяются условия изменения состояния системы. Таким образом, для имитации параллельных (одновременно протекающих) процессов и организации механизма системного времени в имитационной модели используется комбинированный принцип имитационного моделирования, сочетающий в себе достоинства пошаго-

вой и событийной имитации, и для упорядоченной последовательности времени $\langle t_i \rangle$ будет сформулирована во взаимно-однозначном соответствии последовательность операторов $\langle h_i \rangle$. Очевидно, что $\langle h_i \rangle$ представляет собой линейный граф, соответствующий траектории процесса F .

Для полного описания процесса функционирования имитационной модели необходимо иметь средство, позволяющее строго регламентировать моменты времени t_i выполнения операторов h_i . С этой целью оператор h_i представим в виде некоторой структуры данных $Z_i = \langle t_i, a_i \rangle$, называемой заявкой, где a_i — имя алгоритма обработки процесса типа w_j из конечного множества W ($w_j \in W$). Эта заявка вносится в список $Z = \langle z_1, z_2, \dots, z_n \rangle$, называемый календарным планом или календарем процессов. Данный список всегда упорядочен таким образом, чтобы $T(z_i) < T(z_i + 1)$, где — функция вычисляющая время обработки заявки z_i . Это т.н. процессно-событийная схема имитации функционирования РЛС.

Интеграция САПР РЛС

с контрольно-измерительной аппаратурой

В целях отладки составных компонентов САПР РЛС самими разработчиками САПР, а также в целях обучения сотрудников проектированию на существующих отечественных и зарубежных САПР, проведения имитационного моделирования и полунатурных испытаний разработанных в САПР РЛС устройств, создаются специализированные стенды для разработки аналоговых и цифровых ВЧ и СВЧ устройств, а также программирования цифровых элементов и устройств, в том числе и с применением отечественной элементной базы при возможности импортозамещения. На данных стендах будет производиться верификация характеристик устройств, проектируемых на схемотехническом и конструктивно-технологическом уровне САПР РЛС.

Отдельные стенды предназначены для проведения имитационного моделирования и полунатурных испытаний с использованием контрольно-измерительного оборудования и программных продуктов мировых лидеров в данном направлении. Такие программные средства разработки позволяют имитировать ФЦПО, поведение антенных систем, приемо-передающих устройств РЛС с целью проведения испытаний разработанных в САПР РЛС моделей на уровнях вплоть до системного. Вместе с тем для проведения полунатурных испытаний будет использоваться имитация на контрольно-измерительном оборудовании (КИО), которое имеет средства сопряжения с данными программными средствами. Аналогично САПР мировых лидеров, возможность подключения КИО к среде моделирования для обеспечения возможности проведения полунатурных испытаний предусматривается и в САПР РЛС.

Такой подход предоставляет возможность проводить совместные испытания изготовленных образцов

и устройств, которые на данный момент спроектированы только в виде программных моделей, проводить оценку результатов с внесением корректировок в данные программные модели.

Предварительный состав КИО для сопряжения с САПР РЛС представлен ниже.

6.1. КИО для генерации фоно-целевой обстановки.

К данной группе относятся:

- генератор сигналов произвольной формы;
- векторный генератор СВЧ сигналов широкополосный.

6.2. КИО для тестирования и имитации антенных систем.

К данной группе относятся:

- анализатор спектра;
- осциллограф;
- измеритель мощности;
- аналоговый генератор сигналов (для тестирования и калибровки).

6.3. КИО для тестирования и имитации компонентов РЛС.

К данной группе относятся:

- векторный анализатор цепей;
- анализатор спектра;
- осциллограф;
- генератор сигналов произвольной формы.

6.4. КИО для тестирования и имитации линий связи между компонентами РЛС.

К данной группе относятся:

- логический анализатор;
- осциллограф;
- векторный анализатор цепей.

В зависимости от назначения и функциональных требований для каждой группы КИО предусмотрен свой тип программного модуля взаимодействия. Каждый тип модуля взаимодействия характеризуется:

- поддерживаемыми стандартами обмена информацией с оборудованием;
- типом и форматом данных обмена с оборудованием, типом и форматом данных обмена с интеграционной платформой САПР-РЛС;
- на каком уровне среды моделирования используется (системный, структурный, схемотехнический);
- перечень поддерживаемого оборудования (модулей сопряжения с оборудованием).

Заключение

В работе показаны актуальность разработки отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла и её общая архитектура; представлена концепция пяти уровней проектирования РЛС в разрабатываемой САПР и основные требования при реализации данной концепции, а также поддержки имитационного моделирования; обсуждалась

интеграция разрабатываемой САПР с контрольно-измерительной аппаратурой. Специфика разрабатываемой САПР наиболее выражена в учете сценариев использования проектируемого изделия в условиях конкретных СВКН и СВКО. Одним из направлений дальнейшего развития и совершенствования САПР РЛС будет функционал для разработки и моделирования бортовых РЛС головок самонаведения (ГСН) ракет, а также отладки встроенного программного обеспечения бортовых вычислителей ГСН.

Литература

1. Коновальчик А. П., Конопелькин М. Ю., Плаксенко О. А., Щирый А. О. Постановка задачи разработки и предварительная архитектура отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2017. № 20. С.127–130.
2. Акимов В. Ф., Калинин Ю. К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов. Москва: Техносфера, 2017. 492 с.
3. Ахияров В. В., Нефедов С. И., Николаев А. И., Слушкин Г. П., Федоров И. Б., Шустиков В. Ю. Радиолокационные системы / Под ред. А. И. Николаева. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 349 с.
4. Щирый А. О. Программное обеспечение управления базовой станцией ионосферного мониторинга // Инженерный вестник: Информатика, радиофизика, управление. 2005. № 2. С. 204–207.
5. Колчев А. А., Щирый А. О., Недопекин А. Е. Математические модели и методики измерения АЧХ многолучевых ионосферных коротковолновых радиолоний: монография. Йошкар-Ола: Марийский гос. ун-т, 2013. 146 с. ISBN978–5–94808–762–7.
6. Щирый А. О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолоний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: Спец. 05.12.04; Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. СПб., 2007. 19 с.
7. Тяпкина В. Н., Фомин А. Н., Гарин Е. Н., Фатеев Ю. Л., Бердышев В. П., Ноговицын А. А., Темеров А. В., Сомов В. Г., Лютиков И. В. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск / под общ. ред. В. Н. Тяпкина. Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2011. 536 с. ISBN978–5–7638–2480–3.
8. Ботов М. И., Вяхирев В. А. Основы теории радиолокационных систем и комплексов. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. 531 с.
9. Конторов Д. С., Голубев-Новожилов Ю. С. Введение в радиолокационную системотехнику. Москва: Сов. радио, 1971. 366 с.

10. *Зайцев Д. В.* Многопозиционные радиолокационные системы. Методы и алгоритмы обработки информации в условиях помех. М.: Радиотехника, 2007. 114 с.

11. Имитационное моделирование боевых действий: теория и практика / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Созинова П. А., д-ра техн. наук, проф. Глушкова И. Н. Тверь: НПП Эргоцентр, 2013. 528 с.

12. *Попович В. В., Ивакин Я. А., Сорокин Р. П., Власов С. А.* Имитационное моделирование боевых действий на основе сценарного подхода // Труды 6-й Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2013, Казань). Казань: Фэн, 2013. Т. 2. С. 231–239.

13. *Резянов Н., Чесноков С., Инюхин М.* Имитационная система моделирования боевых действий JWARS ВС США // Зарубежное военное обозрение. 2008. № 11. С. 27–32.

14. *Новиков Д. А.* Иерархические модели военных действий // Управление большими системами. 2012. № 37. С. 25–62.

15. *Муромцев Ю. Л., Муромцев Д. Ю., Тюрин И. В., Кольтюков Н. А., Белоусов О. А.* Информационные технологии в проектировании радиоэлектронных средств. М.: Академия, 2010. 384 с.

16. *Норенков И. П.* Основы автоматизированного проектирования. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 430 с. ISBN 978-5-7695-6256-3.

17. *Холл А. Д.* Опыт методологии для системотехники / Пер. с англ.: Г. Н. Поваров, И. В. Соловьев; Ред. пер. с англ.: Г. Н. Поваров. М.: Советское радио, 1975. 447 с. ISBN 978-5-7038-3275-2.

18. *Малюх В. Н.* Введение в современные САПР. М.: ДМК Пресс, 2010. 192 с. ISBN 978-5-94074-551-8.

RUSSIAN COMPUTER-AIDED DESIGN OF RADAR SYSTEMS, SYSTEMS AND STATIONS WITHIN THE MEANS OF AEROSPACE ATTACK

ARTEM P. KONOVALCHIK,

Moscow, Russia, konovalchik@almaz-antey.ru

MAXIM Y. KONOPELKYN,

Moscow, Russia, m.konopelkin@almaz-antey.ru

OLEG A. PLAGSENKO,

Moscow, Russia, o.plaksenko@almaz-antey.ru

ANDREY O. SCHIRIY,

Moscow, Russia, andreyschiriy@almaz-antey.ru

KEYWORDS: CAD; radar; radar systems; airborne radar; . aided design; digital information processing.

ABSTRACT

The work shows the development of a domestic computer aided design in full cycle end-to-end radar systems (complexes, stations). The general architecture of the developing system: the division for a conditional client side and server side; moreover, the client part is a workstation of the developer of radar, includes means for input and editing of all input data, view the results of the calculations, the functionality of the control computing modules, while the server part consists of computational modules that run both locally and in a distributed computing environment and implements the functionality of the model as separate units of radar stations and radar stations, complexes, systems as a whole. The concept of five levels of design radar in the system being developed and the basic requirements for the implementation of this concept. System level: placement on the maps for the radar components, radar systems, targets, and routes of their movement, interference with job types; components are selected from existing li-

braries of ready-made products, designs and components created on the lower levels of design. Structural level: the assembly of the radar structure of the constituent parts. The functional-logic level: the variation of the algorithms of digital information processing to ensure their optimum combination in the selected criteria of effectiveness. Circuit level: the creation of circuit diagrams of blocks. Construction-technological level: the creation of three-dimensional models and drawings of structural elements, receiving a set of design documentation. The specificity of the developed computer-aided design system is most pronounced in activity-based scenarios for the use of the designed product in terms of the specific means of aerospace attack and defence; this specificity is manifested to the greatest degree on the system level design. In the work discussed approaches to implement the simulation. In general, the described integration of a software system with instrumentation equipment.

REFERENCES

1. Konovalchik A.P., Konopelky M.Y., Plaksenko O.A., Schiriy A.O. Postanovka zadachi razrabotki i predvaritel'naya arkhitektura otechestvennoy SAPR RLS polnogo skvoznoy tsikla [Formulation development and preliminary architecture of the domestic CAD software radar full end-to-end cycle]. *Novye informacionnye tehnologii v avtomatizirovannykh sistemah* [New information technologies in automated systems]. 2017. No. 20. Pp.127-130. (In Russian)
2. Akimov V.F., Kalinin Yu.K. *Vvedenie v proektirovanie ionosfernykh zagorizontnykh radiolokatorov* [Introduction to the design of the ionospheric over-the-horizon radar]. Moscow: Technosphere, 2017. 492 p. (In Russian)
3. Akhiyarov V.V., Nefedov S.I., Nikolaev A.I., Slukin G.P., Fedorov I.B., Shustikov V.U. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar systems: textbook]. Moscow: Moskovskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet imeni N.E. Baumana Publ., 2016. 349 p. (In Russian)
4. Schiriy A.O. Programmnoe obespechenie upravleniya bazovoy stantsiy ionosfernogo monitoringa [Control Software the base station ionospheric monitoring]. *Inzhenernyy vestnik: Informatika, radiofizika, upravlenie* [Engineering journal: Informatics, physics, management]. 2005. No. 2. Pp. 204-207. (In Russian)
5. Kolchev A.A., Schiriy A.O., Nedopekin A.E. *Matematicheskie modeli i metodiki izmereniya AChKh mnogoluchevykh ionosfernykh korotkovolnovnykh radioliniy: monografiya* [Mathematical models and methods of measuring the frequency response of multipath ionospheric shortwave radio links: monograph]. Yoshkar-Ola: Mariyskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2013. 147 p. (In Russian)
6. Schiriy A.O. *Razrabotka i modelirovanie algoritmov avtomaticheskogo izmereniya kharakteristik ionosfernykh korotkovolnovnykh radioliniy: Avtoref* [Design and simulation of algorithms for automatic measurement of the characteristics of ionospheric HF radio channels: PhD thesis]; Spec. 05.12.04; The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications. SPb., 2007. 19 p. (In Russian)
7. Tyapkin V.N., Fomin A.N., Garin E.N., Fateev Yu.L., Berdyshev V.P., Nogovitsyn A.A., Temerov A.V., Somov V.G., Lyutikov I.V. *Osnovy postroeniya radiolokatsionnykh stantsiy radiotekhnicheskikh voysk* [Fundamentals of radar stations, radio-technical troops]. Krasnoyarsk: Sibirskiy federal'nyy universitet Publ., 2011. 536 p. (In Russian)
8. Botov M.I., Vjahirev V.A. *Osnovy teorii radiolokatsionnykh sistem i kompleksov* [Fundamentals of the theory of radar systems and complexes]. Krasnoyarsk: Sibirskiy federal'nyy universitet Publ., 2013. 531 p. (In Russian)
9. Kontorov D.S., Golubev-Novozhilov Yu.S. *Vvedenie v radiolokatsionnyuyu sistemotekhniku* [Introduction to radar systems engineering]. Moscow: Sovetskoe radio, 1971. 366 p. (In Russian)
10. Zaitsev D.V. *Mnogopozitsionnye radiolokatsionnye sistemy. Metody i algoritmy obrabotki informatsii v usloviyakh pomekh* [Multiposition radar system. Methods and algorithms of information processing under conditions of interference]. Moscow: Radiotekhnika, 2007. 114 p. (In Russian)
11. Sozinov P.A., Glushkov I.N. (Eds.) *Imitatsionnoe modelirovanie boevykh deystviy: teoriya i praktika* [Simulation of fighting: theory and practice]. Tver: NPP Ergotsentr, 2013. 528 p. (In Russian)
12. Popovich, V.V., Ivakin, Y.A., Sorokin P.P., Vlasov, S.A., Imitatsionnoe modelirovanie boevykh deystviy na osnove stsennarnogo podkhoda [Simulation modeling of hostilities based on a scenario approach]. *Trudy 6-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» (IMMOD-2013, Kazan')* [Proceedings of 6-th all-Russian scientific-practical conference "Simulation: theory and practice" (IMMOD-2013)]. Kazan: Academy of Sciences RT, 2013. Vol 2. Pp. 231-239. (In Russian)
13. Rezyapov N., Chesnokov S., M. Imitatsionnaya sistema modelirovaniya boevykh deystviy JWARS VS SshA [Inwhen Simulation system simulation of fighting JWARS USA]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign military review]. 2008. No. 11. Pp. 27-32. (In Russian)
14. Novikov D.A. Hierarchical models of combat. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Administration of large systems]. 2012. Issue 37. Pp. 25-62. (In Russian)
15. Muromtsev Y.L., Muromtsev D. Yu., Tyurin I.V., Kol'tyukov N.A., Belousov O.A. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii radioelektronnykh sredstv* [Information technology in the design of electronic equipment]. Moscow: Akademija, 2010. 384 p. (In Russian)
16. Norenkov I.P. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Fundamentals of CAD]. 4d ed. Moscow: Moskovskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet imeni N.E. Baumana Publ., 2009. 430 p. (In Russian)
17. Hall A.D. *A Methodology for Systems Engineering*. New York: D. Van Nostrand Company, 1965.
18. Malukh V.N. *Vvedenie v sovremennye SAPR* [Introduction in modern CAD]. Moscow: DMK Press, 2010. 192 p. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

- Konovalchik A.P., PhD, Deputy head of Scientific Center of the JSC Concern Aerospace Defense "Almaz-Antey";
 Konopelkyn M. Y., Head of group of Scientific Center of the JSC Concern Aerospace Defense "Almaz-Antey";
 Plaksenko O.A., PhD, Head of Department of Scientific Center of the JSC Concern Aerospace Defense "Almaz-Antey";
 Schiriy A.O., PhD, Deputy head of Department of Scientific Center of the JSC Concern Aerospace Defense "Almaz-Antey".

For citation: Konovalchik A.P., Konopelkyn M.Y., Plaksenko O.A., Schiriy A.O. Russian computer-aided design of radar systems, systems and stations within the means of aerospace attack. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 1. Pp. 40-47. doi 10.24411/2409-5419-2018-10018 (In Russian)

doi 10.24411/2409-5419-2018-10019

МАКЕТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ВЫСОКОАДАПТИВНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ МНОГОКОМПЛЕКСНОЙ СБОЕ- И ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ - АКТУАЛЬНАЯ ПРОБЛЕМА

ЛОБАНОВ

Анатолий Васильевич¹

АШАРИНА

Ирина Владимировна²

ГРИШИН

Вячеслав Юрьевич³

СИРЕНКО

Владимир Григорьевич⁴

АННОТАЦИЯ

Рассматривается автоматизация процесса управления сложным распределенным в пространстве организационно-техническим комплексом, которая состоит в построении высокоадаптивной сетевидной распределенной многомашинной системы, выполняющей совокупности взаимодействующих целевых задач. Приводится классификация и структура рассматриваемой вычислительной системы, имеющей многоуровневую организацию взаимодействующих между собой аппаратно-программных средств, а также особенности такой организации при построении сбое- и отказоустойчивой распределенной сетевидной информационно-управляющей системы ответственного применения. Представлены характеристики, принципы построения, особенности рассматриваемых систем и их «философская» сущность с точки зрения сбое- и отказоустойчивости. Приведена классификация механизмов обеспечения сбое- и отказоустойчивости. Выполнен анализ публикаций в области построения сбое- и отказоустойчивых мультиагентных систем, декларируемых в литературе как наиболее перспективный подход к разработке интеллектуальных сложных систем рассматриваемого класса. Показаны существенные недостатки этого подхода, отрывающего алгоритмическую составляющую проектируемой системы от ее технического носителя, являющегося подлинным источником физических неисправностей. Определены факторы сложности при проектировании сбое- и отказоустойчивых систем рассматриваемого класса. Показан типовой подход к проектированию сбое- и отказоустойчивых систем, недостатки этого подхода и необходимые его изменения при построении рассматриваемых систем: необходимость учета вопросов сбое- и отказоустойчивости в процессе разработки архитектурной части проекта, а также важность проектирования «сверху-вниз» с обязательным взаимным участием разработчиков целевых функций системы и разработчиков проблем ее сбое- и отказоустойчивости. Рассматриваются и классифицируются методы реализации механизмов обеспечения сбое- и отказоустойчивости для наиболее общей «враждебной» модели допустимых неисправностей. Показано, что наиболее актуальной проблемой построения рассматриваемых систем является создание, отработка и испытания макетного образца высокоадаптивной распределенной сетевидной многомашинной сбое- и отказоустойчивой управляющей системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: распределенная многомашинная вычислительная система; сбое- и отказоустойчивость; мультиагентная система; динамическая избыточность; враждебная неисправность.

Информация 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

³к.т.н., первый зам. генерального директора – главный конструктор акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Субмикрон», г. Москва, Зеленоград, Россия, grishin@se.zgrad.ru

⁴д.т.н., профессор, генеральный директор акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Субмикрон», г. Москва, Зеленоград, Россия, submicron@se.zgrad.ru

Для цитирования: Лобанов А. В., Ашарина И. В., Гришин В. Ю., Сиренко В. Г. Макетный образец высокоадаптивной распределенной сетевидной многомашинной сбое- и отказоустойчивой управляющей системы – актуальная проблема // Научно-исследовательские технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 1 С. 48-58. doi 10.24411/2409-5419-2018-10019

Автоматизация процесса управления сложным распределенным в пространстве организационно-техническим комплексом состоит в создании сетевидной распределенной в пространстве многомашинной вычислительной системы (МВС) сетевой структуры, параллельно выполняющей совокупности взаимодействующих целевых задач. Самой сложной и актуальной областью применения таких систем являются глобальные системы управления сетевидными войсками [1–2]. По существующей классификации сетей системы рассматриваемого класса относятся к одноранговым, децентрализованным или пиринговым сетям — это оверлейные компьютерные сети, основанные на равноправии участников. В таких сетях отсутствуют выделенные серверы, и каждый узел может выполнять как функции клиента, так и функции сервера.

В отличие от архитектуры клиент-сервер, такая организация позволяет обеспечивать длительный срок активного существования и продолжительную траекторию управляемой деградации.

Эта вычислительная система имеет многоуровневую организацию взаимодействующих между собой аппаратно-программных средств, на нижнем уровне которой (см. рис.) находятся аппаратные средства такой системы (цифровые вычислительные машины (ЦВМ), сетевые элементы, каналы связи). Следующие уровни представляют программное обеспечение (ПО), которое снизу-вверх включает: 1) базовое ПО, обеспечивающее взаимодействие верхних уровней ПО с аппаратными средствами. 2) общее, системное программное обеспечение (ОПО), включающее, в частности, операционную систему, подсистему ввода-вывода и др. 3) служебный уровень, программы которого взаимодействуют как с ПО базового уровня, так и с ПО системного уровня. Обычно основное



Рис. Многоуровневая организация взаимодействующих между собой аппаратно-программных средств

назначение служебных программ состоит в автоматизации работ по проверке, наладке и настройке компьютерной системы. В разработке и эксплуатации служебных программ существует два альтернативных направления: *интеграция с операционной системой* и *автономное функционирование*. В первом случае служебные программы могут изменять потребительские свойства системных программ, делая их более удобными для практической работы. Во втором случае они слабо связаны с системным программным обеспечением, но предоставляют пользователю больше возможностей для персональной настройки их взаимодействия с аппаратным и программным обеспечением. 4) специальное (прикладное, целевое) программное обеспечение (СПО) — предназначено для решения целевых задач пользователя (СПО часто называют программным приложением или просто приложением).

Предстоящее широкое внедрение рассматриваемых сетевидных распределенных информационно-управляющих систем ответственного и критического применения требует особого внимания к вопросам их информационной безопасности. Одной из составляющих этой безопасности является обеспечение заданной сбое- и отказоустойчивости таких систем.

Сетевидная информационно-управляющая система представляет собой распределенную систему, организованную в виде набора независимых компьютеров, соединенных каналами связи, рассматриваемую пользователями в виде единой объединенной системы [3]. Наиболее важные характеристики, которые должна иметь такая система: а) от пользователей скрыты различия между компьютерами и способы связи между ними; б) пользователи и приложения единообразно работают в общем информационном пространстве и едином временном поле распределенной системы, независимо от того, где и когда происходит их взаимодействие; в) система относительно легко поддается адаптации, расширению или масштабированию; г) возможно, что в системе некоторые ее части могут временно выходить из строя, при этом пользователи и приложения не уведомляются о том, что эти части заменены или отремонтированы или что добавлены новые части для поддержки дополнительных пользователей или приложений.

Принципы построения распределенной сетевидной информационно-управляющей системы: 1) открытость (взаимодействие с внешней средой), 2) самоорганизация, 3) слабая иерархия в контуре принятия согласованных решений, 4) параллельное и одновременное решение взаимодействующих целевых задач в режиме реального времени, 6) обеспечение информационной безопасности (заданной достоверности выдаваемой информации, заданной сбое- и отказоустойчивости для каждой из решаемых целевых задач критического применения и сетевых сред их взаимодействия).

Особенностями распределенной сетевидной информационно-управляющей системы ответственного применения являются: а) автономность ЦВМ, б) отсутствие общей памяти, в) межмашинное взаимодействие по двухточечным и шинным каналам связи; г) многоуровневость системы и отсутствие централизованного управляющего органа; д) необходимость самосинхронизации и самоорганизации системы для обеспечения необходимой адаптации, масштабирования, защиты от внешних воздействий, воздействий неисправностей и ошибок проектирования; е) работа в режиме реального времени; ж) большой срок активного существования; з) высокие требования по надежности работы и достоверности результатов.

Уязвимое место идеи сетевидных информационно-управляющих систем — это вмешательство в процессы самосинхронизации и самоорганизации, разрушение циркулирующих в системах информационных потоков.

«Философской» сущностью рассматриваемых систем с точки зрения сбое- и отказоустойчивости являются: 1) сложность; 2) необходимость синхронизированной и согласованной работы их элементов; 3) практическая невозможность точных выводов о техническом состоянии системы; 4) необходимость самостоятельного формирования этих выводов на основе принимаемых заранее и, возможно, неточных критериев; 5) необходимость уточнения этих критериев со стороны самой системы в процессе ее целевой работы, возможность к самообучению и самоадаптации таких систем к условиям применения; 6) необходимость принимать и выполнять самостоятельные решения о реконфигурации и управляемой деградации системы; 7) необходимость проектирования таких систем «сверху-вниз» в условиях четких определений, понятий и моделей при тесном взаимодействии разработчиков целевых задач и разработчиков проблем обеспечения сбое- и отказоустойчивости.

Процесс проектирования рассматриваемых систем «сверху-вниз» кратко можно представить в виде этапов: 1) определение неформальной цели проекта; 2) системный анализ условий применения проектируемого объекта, определение и анализ существующих ограничений, предположений, гипотез, теорий; 3) формулировка формализованной цели проекта в рамках принятых ограничений, предположений, гипотез, теорий, условий применения; 4) разработка обобщенных, обоснованных методов и алгоритмов реализации формализованной цели проекта, их моделирование и оценка; 5) декомпозиция обобщенных алгоритмов на аппаратные части и программные части; 6) разработка технических заданий на аппаратные и программные части; 7) реализация аппаратных и программных частей; 8) стыковка аппаратных и программных частей; 9) комплексные испытания проекта; 10) внедрение и сопровождение разработанной системы у за-

казчика. Первые пять этапов определяют разработку архитектурной части проекта.

В соответствии с традиционным подходом к проектированию сбое- и отказоустойчивых систем сперва разрабатывается архитектура целевой системы без учета вопросов обеспечения сбое- и отказоустойчивости. Затем формируются ТЗ на аппаратные и программные части, в которых требование по сбое- и отказоустойчивости системы часто формулируется в виде требования к продолжению целевой работы при отказе одного или двух электро-радио изделий (ЭРИ). Разработчики аппаратных и программных средств, исходя из такого требования, вводят в разработанную архитектуру известные им автономные механизмы обеспечения сбое- и отказоустойчивости, которые при последующем анализе результатов такого введения могут потребовать коррекцию архитектуры проектируемой системы. Такие итерации повторяются до тех пор, пока не будет найдено удовлетворительное, с точки зрения проектировщиков, решение при данных предположениях. Однако такой процесс проектирования из-за высокой сложности системы может приводить к возникновению в ней негативных эффектов эмерджентности, состоящих в появлении ошибочного поведения из-за непредусмотренных системных явлений, неадекватности реалиям принятых моделей, ограничений или теорий. Такие эффекты, при их возникновении, чрезвычайно трудно поддаются анализу, если поддаются вообще, и обычно необоснованно «списываются» на еще не исследованные или не отработанные элементы технологии или защиты от внешних воздействий (например, недостаточную радиационную стойкость ЭРИ). Поэтому весьма важно на начальных, архитектурных этапах проектирования также ставить и решать архитектурные проблемы обеспечения сбое- и отказоустойчивости, применять адекватные модели, ограничения, предположения и теории. Сложность этих проблем может значительно превышать сложность решения поставленных целевых задач. Соотношение между этими проблемами обеспечения сбое- и отказоустойчивости и выполняемыми целевыми задачами уместно сравнить с соотношением сложности выполнения некоторым коллективом интеллектуальных роботов в режиме реального времени длительных, возможно, достаточно сложных целевых задач, и сложности проблем поддержания работоспособности этого коллектива с учетом имеющихся еще далеко не изученных механизмов сохранения требуемых внутренних характеристик работоспособности каждого члена коллектива и всего коллектива в целом, а также всех внешних систем поддержания жизнедеятельности как каждого члена коллектива, так и всего коллектива. Подобные исследования проводятся, например, в рамках построения сбое- и отказоустойчивых мультиагентных систем (МАС).

Интеллектуальные мультиагентные системы — одно из новых перспективных направлений искусственного ин-

теллекта, которое сформировалось на основе результатов исследований в области распределенных компьютерных систем, сетевых технологий решения проблем и параллельных вычислений. В мультиагентных технологиях заложен принцип автономности отдельных частей программы, совместно функционирующих в распределенной системе, где одновременно протекает множество процессов. Под агентом подразумевают автономный искусственный объект (компьютерную программу), обладающий активным мотивированным поведением и способный к взаимодействию с другими объектами в динамических виртуальных средах. Каждый агент может принимать сообщения, интерпретировать их содержание и формировать новые сообщения, которые направляются другим агентам [4].

Анализ публикаций в области построения сбое- и отказоустойчивых МАС [5–14] показывает, что предлагаемые методологии не обеспечивают сбое- и отказоустойчивость МАС, разрабатываемой для исходной системы, поскольку:

1) принятая модель неисправности МАС не соответствует возможным реальным физическим неисправностям компонентов МАС;

2) неясны и противоречивы предлагаемые механизмы парирования проявлений допустимых неисправностей, их обнаружения и идентификации по месту возникновения (например, с одной стороны утверждается достаточность однократной репликации агента, с другой стороны предлагаемый механизм согласования мнений реплик требует наличия хотя бы двух дополнительных копий агента; второй пример — наличие памяти, разделяемой реплицируемыми агентами, возможность неисправности которой не предусматривается);

3) оторванность предлагаемых моделей и методов от физической сущности системы неизбежно приведет к возникновению в реальных системах практически необъяснимых нештатных ситуаций (негативных эффектов эмерджентности), разбор и анализ которых потребует обязательного возврата на физическую аппаратно-программную основу системы, ее компонентов и каналов связи;

4) имеется острая необходимость по созданию методов построения сбое- и отказоустойчивых МАС, основанных на моделях, адекватных реалиям, методах парирования допустимых неисправностей, их обнаружения и идентификации, реконфигурации системы с учетом текущего технического состояния и восстановления целевой работы системы, учитывающих аппаратно-программную сущность элементов таких систем.

Поиск решения проблем обеспечения сбое- и отказоустойчивости рассматриваемых систем и их практические апробации из-за такого соотношения их сложности и сложности решения целевых задач, должны, в лучшем случае, опережать разработку целевых задач, или, по крайней мере, осуществляться одновременно и взаимос-

вязанно. Иначе неизбежно возникновение отмеченных выше негативных эффектов эмерджентности в работе МВС с потерей значительных материальных и временных ресурсов. Эти проблемы, имеющиеся теоретические и частично опробованные практические подходы в их решениях, а также открытые области научных исследований рассматриваются в настоящей работе.

При разработке крупных информационных и управляющих систем происходит концентрация сложности на начальных этапах (анализ условий применения и требований, проектирование спецификаций системы, разработка обоснованных методов и обобщенных алгоритмов), в то время как сложность и трудоемкость последующих этапов снижается. При этом, чем лучше прорабатываются начальные этапы, тем больше снижается трудоемкость последующих этапов, и чем раньше обнаруживается ошибка, совершенная на начальных этапах проектирования, тем дешевле обходится ее исправление. Для преодоления сложностей начальных этапов разработки предназначен структурный анализ, начинающийся с общего обзора системы, который затем все более детализуется, приобретая иерархическую структуру со все большим числом уровней.

Факторами сложности при проектировании сбое- и отказоустойчивых систем рассматриваемого класса являются: а) неприемлемость традиционных (константных, логических, обрывов и коротких замыканий проводников) моделей неисправностей ЦВМ; б) необходимость распределенного, синхронизированного и согласованного принятия решения в различных ЦВМ системы; в) необходимость организации и управления динамической избыточностью системы (самореконфигурация и самоуправляемая деградация системы с переходом в безопасный останов при исчерпании ресурсов) при возникновении неисправностей или манипулировании соотношением «производительность- достоверность» для различных параллельно решаемых взаимодействующих целевых задач.

Из всех используемых в настоящее время моделей неисправностей ЦВМ наиболее общей является модель враждебной (byzantine, rigorous, malicious) неисправности, при которой поведение неисправного процессора или ЦВМ допускается полностью произвольным, в том числе и подобным «злонамеренному», включая его неодинаковость по отношению к другим элементам системы. Эта модель 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.

Использование модели враждебной неисправности определяет необходимость применения структурной графовой модели системы, в которой вершины отображают ЦВМ и другие сетевые элементы МВС, а ребра и дуги — каналы связи между ними.

Повышение отказоустойчивости сетецентрической распределенной системы может достигаться за счет дорегостоящего обеспечения отказоустойчивости входящих в нее ЦВМ и сетевых элементов путем применения в них N-модульной избыточности (резервирования) каждого узла и мажорирования выходных значений всех избыточных модулей этого узла. Такой подход при увеличении размера системы вызывает необходимость увеличения кратности резервирования каждого ее узла с целью сохранения требуемых значений надежностных характеристик. Другой подход, более учитывающий сетевую особенность рассматриваемых систем (замкнутость системы, наличие большого количества взаимосвязанных распределенных ЦВМ и возможность оперативного формирования из них требуемых вычислительных структур), состоит в репликации задач и введении в систему динамической избыточности, обеспечивающих: 1) парирование проявлений допустимых враждебных неисправностей за счет параллельного выполнения копий одной и той же задачи на нескольких ЦВМ с обменом полученными результатами и выбором из них правильного, 2) обнаружение и идентификацию по месту возникновения и типу (сбой, программный сбой, отказ) возникающих неисправностей, 3) исправления ошибочной информации после сбоев и программных сбоев и восстановление целевой работы, 4) реконфигурацию системы (с использованием запасных элементов) и восстановление целевой работы после отказов, 5) управляемую деградацию системы с возможным допустимым снижением характеристик вплоть до предельно заданной возможной конфигурации, 6) безопасный останов системы при невозможности построения такой конфигурации, 7) возможность перераспределения ресурсов системы для изменения соотношения производительность-достоверность между различными решаемыми задачами. Именно этот подход рассматривается в данной работе.

Группа всех ЦВМ, решающих копии одной и той же задачи, называется комплексом. Система, содержащая один комплекс, называется однокомплексной. В многокомплексной системе имеются несколько пронумерованных комплексов, которые решают разные задачи, обменивающиеся между собой информацией. Практическое применение рассматриваемого подхода должно основываться на принятом всеми участниками проектирования наборе понятий, терминов, определений и моделей. В работе [15] представлены самые общие подходы, модели, ключевые определения и понятия, необходимые при проектирова-

нии систем рассматриваемого вида, которые отражают вышеотмеченную «философскую» сущность таких систем. 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.

Аппаратно-программные механизмы обеспечения сбое- и отказоустойчивости рассматриваемых систем можно разделить на две группы: базовые и основные механизмы. Базовые механизмы гарантируют необходимую синхронность и согласованность действий всех элементов системы в условиях возникновения допустимых враждебных неисправностей. Синхронность обеспечивается путем организации в системе и непрерывной работы подсистемы единого системного времени, включающей средства как начальной, так и промежуточной синхронизации автономных часов в отдельных элементах системы.

Начальная синхронизация [16–17] осуществляется при начальном несинхронном включении различных ЦВМ системы и формируется путем взаимообмена сообщениями между включенными ЦВМ начальную конфигурацию системы в момент, когда эта конфигурация будет содержать достаточное количество исправных ЦВМ при условии, что среди ЦВМ конфигурации может иметься допустимое количество враждебно неисправных ЦВМ. Промежуточная синхронизация обеспечивает на основе межмашинного взаимообмена сообщениями требуемую синхронность внутренних автономных часов различных ЦВМ, расходящихся из-за индивидуальных значений дрейфов этих часов и возникновения допустимых враждебных неисправностей.

Согласованность действий и принимаемых решений в различных ЦВМ и подсистемах гарантируется применением алгоритмов взаимного информационного согласования (ВИС) [18]. Достижимость ВИС составляет концептуальную основу создания отказоустойчивых алгоритмов для решения основных задач организации распределенных вычислений. В настоящее время разработано значительное число алгоритмов, различающихся по постановкам задачи и критериям эффективности. Целью всех этих методов являлось только достижение ВИС, и специальная задача обнаружения и идентификации проявлений неисправностей в процессе ВИС не ставилась. Более того, в [18] утверждалось, что враждебный отказ в процессе ВИС диагностировать невозможно. Однако, исследуемая в настоящей работе задача организации сбое- и отказоустойчивых вычислений в сетецентрических как полностью связанных, так и неполностью связанных системах на основе динамической избыточности требует разработки алгоритмов ВИС, которые вместе с достижением ВИС обеспечивали бы также обнаружение и идентификацию проявившихся

в процессе ВИС враждебных неисправностей, предотвращающих накопление латентных неисправностей, одновременное проявление которых может привести к отказу всей сетевидческой системы. Такие методы ВИС для одноконплексных полносвязных систем предложены в работах [19–21]. В [22–23] представлены обоснованные методы ВИС для неполносвязных систем, а в [24] — метод ВИС для неполносвязных систем с обнаружением и идентификацией случившихся в процессе ВИС проявлений враждебных неисправностей. Задачи и их решения, связанные с обеспечением системного ВИС в многоконплексных системах, рассматриваются в [25–26].

Основные механизмы обеспечения сбое- и отказоустойчивости на основе динамической избыточности для рассматриваемых одноконплексных систем при возникновении допустимых по кратности враждебных неисправностей включают механизмы парирования допустимых враждебных неисправностей (гарантирования правильности выходной информации системы при возникновении допустимых неисправностей) [27–31], функционального диагностирования системы с обнаружением и идентификацией возникающих допустимых по кратности враждебных неисправностей в процессе целевой работы и тестового диагностирования одноконплексных системы [27–36] и многоконплексных систем (двухконплексных систем [37]), тестового диагностирования подсистем и системы в целом [32–35, 38], восстановления целевой работы подсистем и системы в целом при возникновении программных сбоев и отказов, самоуправляемой реконфигурации и деградации конплексов и системы в целом, выполняемых также в условиях возникновения допустимых по кратности враждебных неисправностей [30]. Однако значительный перечень вопросов детального построения основных механизмов обеспечения сбое- и отказоустойчивости в многоконплексных распределенных МВС остаются открытыми.

Общий подход к созданию и организации целевой работы открытых сетевидческих многоконплексных систем в сети ЦВМ в условиях возникновения допустимых враждебных неисправностей, их парирования на основе репликации задач, обнаружения и идентификации, восстановления после сбоев и программных сбоев, самореконфигурации и самоуправляемой деградации до предельно допустимой конфигурации с переходом к безопасному останову системы при последующем возникновении неисправности, рассматривается в [39]. В случае одноконплексных сбое- и отказоустойчивых распределенных МВС необходима многоуровневая организация аппаратно-программных средств, показанная на рис., в которой между уровнем СПО и уровнем служебного ПО располагается добавочный уровень ПО отказоустойчивости одноконплексной МВС. Для многоконплексных

распределенных МВС между уровнем СПО и уровнем ПО сбое- и отказоустойчивости одноконплексной МВС должен располагаться уровень ПО сбое- и отказоустойчивости многоконплексной МВС, который кроме проблем обеспечения сбое- и отказоустойчивого междоконплексного взаимодействия должен также решать проблемы реализации всех необходимых свойств динамической избыточности при таком взаимодействии.

Организация работы предлагаемых механизмов сбое- и отказоустойчивости должна быть многоуровневой: на нижнем уровне — базовые механизмы (синхронизация и ВИС). На следующем уровне — основные механизмы (парирования проявлений неисправностей, тестового и функционального диагностирования, восстановления, самореконфигурации и самоуправляемой деградации). Все остальные механизмы организации работы системы составляют более высокие уровни. Их основной задачей с точки зрения сбое- и отказоустойчивости является определение места и объема восстанавливаемой информации, а также периода выполнения восстановления при возникновении программных сбоев и отказов. Взаимодействие всех механизмов сбое- и отказоустойчивости составляет сущность интерфейса отказоустойчивости данной системы.

Приведенный список литературы показывает, что для ряда задач по обеспечению сбое- и отказоустойчивости рассматриваемых сетевидческих систем имеется решение. Однако значительно больше проблем и задач остаются открытыми. К ним относятся задачи снижения оценок сложности предлагаемых методов по объемам требуемых аппаратурной, временной и информационной избыточности, разработки приемлемых методов самоорганизации сбое- и отказоустойчивых параллельных взаимосвязанных вычислений на основе использования динамической избыточности, разработки и взаимной увязки всех необходимых архитектурных, аппаратурных и программных механизмов ее реализации, разработки методов моделирования и оценки эффективности таких систем, методов отладки и испытаний (включая инъекцию допустимых неисправностей и преднамеренное создание возможных нештатных ситуаций) как отдельных элементов и подсистем, так и системы в целом.

Особо следует отметить, что из-за высокой математической абстрактности и сложности предлагаемых теоретически обоснованных решений возникает острая необходимость их моделирования, практического макетирования и апробации с целью отработки этих решений и получения оценочных характеристик по используемым ресурсам.

НИИ «Субмикрон» имеет давний успешный опыт разработки и практического внедрения в космической отрасли РФ рассматриваемых одноконплексных распределенных систем [27–28]. К сожалению, имеется также и последу-

ющий весьма дорогостоящий отрицательный опыт, когда отступление от принципов и предлагаемой методологии построения рассматриваемых сбое- и отказоустойчивых распределенных систем привело к появлению в целевой работе системы вышеуказанных эффектов отрицательной эмерджентности, устранение которых, по мнению авторов данной работы, возможно только при перепроектировании уровня ПО сбое- и отказоустойчивости однокомплексной системы на основе предлагаемых принципов и методологии. В настоящее время НИИ «Субмикрон» пока еще сохраняет уникальный на мировом уровне научный потенциал, необходимый для разработки сетцентрических сбое- и отказоустойчивых многокомплексных распределенных систем, о чем свидетельствует совокупность теоретических публикаций в наиболее авторитетном отечественном научном журнале, а также упомянутый выше положительный практический опыт создания однокомплексных сбое- и отказоустойчивых распределенных систем. Наиболее эффективное развитие и теоретических результатов, и практического опыта в области построения сбое- и отказоустойчивых сетцентрических многокомплексных распределенных МВС, может быть достигнуто в приемлемые сроки только в НИИ «Субмикрон» путем адекватного моделирования такой системы (что потребует предварительного создания соответствующей системы моделирования) и/или, что более реально и продуктивно, в процессе построения макетного образца системы, его исследования и оценки. Вот только найдутся ли заказчики?

Литература

1. Гришин В. Ю., Лобанов А. В., Сиренко В. Г. Сетцентрическая война и живучесть системы ее управления. Часть 1 // Новый оборонный заказ. Стратегии. 2014. № 2. С. 34–35.
2. Гришин В. Ю., Лобанов А. В., Сиренко В. Г. Сетцентрическая война и живучесть системы ее управления. Часть 2 // Новый оборонный заказ. Стратегии. 2014. № 3. С. 6–9.
3. Ефремов А. Ю., Максимов Д. Ю. Сетцентрическая система управления — что вкладывается в это понятие? // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения: труды Третьей российской конференции УКИ-2012 с международным участием. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 158–161.
4. Городецкий В. И., Карсаев О. В., Самойлов В. В., Серебряков С. В. Прикладные многоагентные системы группового управления // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 9. С. 3–24.
5. Padgham L., Winikoff M. Prometheus: A methodology for developing intelligent agents // Agent-Oriented Software

Engineering III. Eds. F. Giunchiglia, J. Odell, G. Weiss. New York: Springer, 2003. Vol. 2585 of LNCS. Pp. 174–185.

6. Wooldridge M., Jennings N. R., Kinny D. Developing multiagent systems: The gaia methodology // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. 2004. No. 12(3). Pp. 317–370.

7. Liam C., Wo T., Hu H. Building a Fault Tolerant Architecture for Internet Robots Using Mobile Agents // Proceedings of the 1st British Workshop on Internet and Online Robots (IORW). University of Reading, 28th May 2003.

8. Fedoruk A., Deters R. Improving fault-tolerance by replicating agents // Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. Bologna, 2002. Pp. 737–744.

9. Kola G., Kosar T., Livny M. A fully automated fault-tolerant system for distributed video processing and off-site replication // Proceedings of the 14th international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video. Cork, Ireland, 2004. Pp. 122–126.

10. Kumar S., Cohen P. R. Towards a fault-tolerant multi-agent system architecture // Proceedings of the fourth international conference on Autonomous agents. ACM, Barcelona, 2000. Pp. 459–466.

11. Mishra S. Agent Fault Tolerance Using Group Communication // Proceedings of the 2001 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA 2001). Las Vegas, NV, CSREA Press. Pp. 383–389.

12. Pullum L. L. Software fault tolerance techniques and implementation. Boston, London: Artech House, 2001. 360 p. ISBN1580531377.

13. Mellouli S., Mineau G., Moulin B. Laying down the foundations of an agentmodelling methodology for fault-tolerant multi-agent systems // Engineering Societies in the Agents World IV 4th International Workshop, ESAW 2003 (London, October 29–31, 2003). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. Vol. 3071. Pp. 275–293.

14. Mellouli S., Mineau G., Moulin B. Towards an agent modelling methodology for fault-tolerant multi-agent systems // Informatica Journal. 2004. Pp. 31–40.
15. 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.

16. Лобанов А. В. Синхронизация и взаимное информационное согласование // Программирование. 1997. № 2. С. 76–80.

17. Песикова О. В. Метод начальной синхронизации многомашинной отказоустойчивой вычислительной

системы // Тезисы докладов 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами» (Москва. 24–26 октября 2012 г.) Москва, 2012. С. 152–154.

18. *Генинсон Б. А., Панкова Л. А., Трантенгерц Э. А.* Отказоустойчивые методы обеспечения взаимной информационной согласованности в распределенных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1989. № 5. С. 3–18.

19. *Лобанов А. В.* Взаимное информационное согласование с идентификацией неисправностей в распределенных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1992. № 4. С. 137–146.

20. *Лобанов А. В.* Взаимное информационное согласование с идентификацией неисправностей на основе глобального синдрома // Автоматика и телемеханика. 1996. № 5. С. 150–159.

21. *Лобанов А. В., Сиренко В. Г., Гришин В. Ю.* Взаимное информационное согласование в многомашинных вычислительных системах с обнаружением и идентификацией кратных враждебных неисправностей // Автоматика и телемеханика. 2003. № 4. С. 123–133.

22. *Лобанов А. В., Ашарина И. В., Мищенко И. Г.* Взаимное информационное согласование в неполносвязных многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 5. С. 190–198.

23. *Ашарина И. В., Лобанов А. В.* Взаимное информационное согласование в неполносвязных гетерогенных многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 2010. № 5. С. 133–146.

24. *Лобанов А. В.* Взаимное информационное согласование с обнаружением и идентификацией враждебных неисправностей в неполносвязных многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 2003. № 6. С. 175–185.

25. *Ашарина И. В., Лобанов А. В.* Выделение комплексов, обеспечивающих достаточные структурные условия системного взаимного информационного согласования в многокомплексных системах // Автоматика и телемеханика. 2014. № 6. С. 115–131.

26. *Ашарина И. В., Лобанов А. В.* Выделение структурной среды системного взаимного информационного согласования в многокомплексных системах // Автоматика и телемеханика. 2014. № 8. С. 146–156.

27. *Лобанов А. В.* Протокол отказоустойчивого обмена // Приборы и системы управления. 1993. № 7. С. 8–11.

28. *Лобанов А. В., Нахаев С. А.* Обеспечение сбое- и отказоустойчивости в протоколе отказоустойчивого обмена // Приборы и системы управления. 1993. № 7. С. 12–13.

29. *Лобанов А. В.* Распределенное мажорирование информации с обнаружением и идентификацией неисправностей // Автоматика и телемеханика. 1997. № 1. С. 145–149.

30. *Лобанов А. В.* Организация сбое- и отказоустойчивых вычислений в полносвязных многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 2000. № 12. С. 138–146.

31. *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.

32. *Лобанов А. В.* Обнаружение и идентификация «враждебных» неисправностей путем одновременного сочетания функционального и тестового диагностирования в многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 1999. № 1. С. 159–165.

33. *Лобанов А. В., Сиренко В. Г., Гришин В. Ю.* Функциональное диагностирование в распределенном системном диагностировании многомашинных вычислительных систем // Автоматика и телемеханика. 2002. № 1. С. 152–158.

34. *Сиренко В. Г.* Функциональное диагностирование процессов послышки информации в вычислительных системах при неизвестном исходном значении передаваемой информации // Автоматика и телемеханика. 2005. № 11. С. 135–154.

35. *Сиренко В. Г.* Метод локализации «враждебных» неисправностей в многомашинных вычислительных системах // Известия вузов. Электроника. 2006. № 3. С. 38–43.

36. *Лобанов А. В., Гришин В. Ю., Сиренко В. Г.* Распределенное системное диагностирование враждебных неисправностей в неполносвязных многомашинных вычислительных системах // Автоматика и телемеханика. 2005. № 2. С. 148–157.

37. *Лобанов А. В.* Организация сбое- и отказоустойчивой работы двухкомплексной многомашинной вычислительной системы // Автоматика и телемеханика. 1998. № 2. С. 143–152.

38. *Лобанов А. В., Сиренко В. Г.* Распределенные методы системного диагностирования // Автоматика и телемеханика. 2000. № 8. С. 165–172.

39. *Лобанов А. В.* Стратегические и тактические проблемы и задачи в организации сбое- и отказоустойчивых вычислений на основе репликации задач в многокомплексных многомашинных вычислительных системах и сетях ЦВМ // Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе: материалы XXXVI Международной конференции и дискуссионного научного клуба IT+SE'10. Майская сессия. Ялта-Гурзуф. Приложение к журналу «Открытое образование». 2010. С. 119–121.

A PROTOTYPE OF A HIGHLY ADAPTIVE, DISTRIBUTED, NET-CENTRIC, MULTICOMPLEX MALFUNCTION- AND A FAULTY-TOLERANT CONTROL SYSTEM – A TOPICAL PROBLEM

ANATOLY V. LOBANOV,

Moscow, Russia, lav@se.zgrad.ru

IRINA V. ASHARINA,

Moscow, Russia, asharinairina@mail.ru

VYJACHESLAV JU. GRISHIN,

Moscow, Russia, grishin@se.zgrad.ru

VLADIMIR G. SIRENKO,

Moscow, Russia, submicron@se.zgrad.ru

ABSTRACT

Discusses the automation of the process of managing complex distributed in the space of organizational and technical complex which is to build high-adaptive, network-centric distributed multicomputer system for set of interacting tasks. Describing Classification and structure of the considered computing system having a multi-level organization of interacting hardware and software, as well as the features of such an organization is when building fault-tolerant distributed network-centric information system of management responsible manner. The characteristics, principles of construction, features of the systems under consideration and their "philosophical" essence are presented in terms of malfunction- and fault tolerance. The classification of mechanisms for ensuring malfunction- and fault-tolerance is given. The analysis of publications in the field of building malfunction- and fault-tolerant multi-agent systems, declared in the literature as the most promising approach to the development of intelligent complex systems of the class under consideration, is performed. Essential drawbacks of this approach are shown, which detaches the algorithmic component of the projected system from its technical carrier, which is the true source of physical malfunctions. The complexity factors in the design of malfunction- and fault-tolerant systems of the class under consideration were determined. A typical approach to designing malfunction- and fault-tolerant systems is shown, the drawbacks of this approach and the necessary changes in the design of the systems under consideration: the need to take into account the issues of fault and fault tolerance in the design of the architectural part of the project, and the importance of designing "top-down" with mandatory mutual participation developers of target tasks of the system and developers of problems of its malfunction- and fault- tolerance. The methods of implementing malfunction- and fault-tolerance mechanisms for the most common "byzantine (hostile)" model of permissible faults are considered and classified. It is shown that the most relevant problem the construction of the systems under consideration is the creation, is testing and

KEYWORDS: distributed multi-computer system; malfunction- and fault-tolerance; multiagent system; dynamic redundancy; hostile malfunction.

testing of a prototype of a highly adaptable distributed multicomplex network-centric malfunction- and fault-tolerant control system.

REFERENCES

1. Grishin V.Yu., Lobanov A.V., Sirenko V.G. Setetsentricheskaya voyna i zhivuchest' sistemy ee upravleniya. Chast' 1 [Network-centric warfare and survivability system of management. Part 1]. *Novyy oboronnyy zakaz. Strategii* [New defence order. Strategy]. 2014. No. 2. Pp. 34-35. (In Russian)
2. Grishin V.Yu., Lobanov A.V., Sirenko V.G. Setetsentricheskaya voyna i zhivuchest' sistemy ee upravleniya. Chast' 2 [Network-centric warfare and survivability system of management. Part 2]. *Novyy oboronnyy zakaz. Strategii* [New defence order. Strategy]. No. 3. 2014. S. 6-9. (In Russian)
3. Efremov A. Yu., Maksimov D. Yu. Setetsentricheskaya sistema upravleniya – chto vkladyvaetsya v eto ponyatie? [Network-centric control system – what is embedded in this concept?]. *Tekhnicheskije i programmnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya: Trudy Tret'ey rossijskoy konferentsii UKI-2012 s mezhdunarodnym uchastiem*. [Network-centric control system – what is embedded in this concept? // Technical and software control systems, control and measurement: proceedings of the Third Russian conference IES-2012 with international participation] Moscow: IPU RAN, 2012. Pp. 158-161. (In Russian)
4. Gorodetskiy V.I., Karsaev O.V., Samoylov V.V., Serebryakov S.V. Prikladnye mnogoagentnye sistemy gruppovogo upravleniya [Applied multiagent systems of group control]. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy* [Artificial intelligence and decision making]. 2009. No. 9. Pp. 3-24. (In Russian)
5. Padgham L., Winikoff M. Prometheus: A methodology for developing intelligent agents. *Agent-Oriented Software Engineering III*. Eds. F. Giunchiglia, J. Odell, G. Weiss. New York: Springer, 2003. Vol. 2585 of LNCS. Pp. 174-185.

6. Wooldridge M., Jennings N.R., Kinny D. Developing multiagent systems: The gaia methodology. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2004. No. 12(3). Pp. 317-370.
7. Liam C., Wo T., Hu. H, Building a Fault Tolerant Architecture for Internet Robots Using Mobile Agents. *Proceedings of the 1st British Workshop on Internet and Online Robots (IORW)*. University of Reading, 28th May 2003
8. Fedoruk A., Deters R. Improving fault-tolerance by replicating agents. *Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. Bologna, 2002. Pp. 737-744.
9. Kola G., Kosar T., Livny M. A fully automated fault-tolerant system for distributed video processing and off-site replication. *Proceedings of the 14th international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video*. Cork, Ireland, 2004. Pp.122-126.
10. Kumar S., Cohen P.R. Towards a fault-tolerant multi-agent system architecture. *Proceedings of the fourth international conference on Autonomous agents*. ACM, Barcelona, 2000. Pp. 459-466.
11. Mishra S. Agent Fault Tolerance Using Group Communication. *Proceedings of the 2001 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA 2001)*. Las Vegas, NV, CSREA Press. Pp. 383-389.
12. Pullum L.L. Software fault tolerance techniques and implementation. Boston, London: Artech House, 2001. 360 p. ISBN1580531377.
13. Mellouli S., Mineau G., Moulin B. Laying down the foundations of an agentmodelling methodology for fault-tolerant multi-agent systems. *Engineering Societies in the Agents World IV 4th International Workshop, ESAW 2003* (London, October 29-31, 2003). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. Vol. 3071. Pp. 275-293.
14. Mellouli S., Mineau G., Moulin B. Towards an agent modelling methodology for fault-tolerant multi-agent systems. *Informatica Journal*. 2004. Pp. 31-40.
15. Lobanov A.V. Modeli zamknutykh mnogomashinnykh vychislitel'nykh sistem so sbroe- i otkazoustoychivost'yu na osnove replikatsii zadach v usloviyakh voznikoveniya vrazhdebnykh neispravnostey [Models of closed multi-computer systems with faults and fault tolerance based on replication of tasks under conditions of hostile faults]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2009. No. 2. Pp. 171-189. (In Russian)
16. Lobanov A.V. Sinkhronizatsiya i vzaimnoe informatsionnoe soglasovanie [Synchronization and mutual information agreement]. *Programirovanie* [Programming]. 1997. No. 2. Pp. 76-80. (In Russian)
17. Pesikova O.V. Metod nachal'noy sinkhronizatsii mnogomashinnoy otkazoustoychivoy vychislitel'noy sistemy [The method of initial synchronization of a multi-machine fault-tolerant computing system]. *2-ya Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sistemy upravleniya bespilotnymi kosmicheskimi i atmosferynymi letatel'nymi apparatami»*. Moskva. 24-26 oktyabrya 2012 g. Tezisy dokladov. [2nd All-Russian scientific and technical conference "Control systems for unmanned space and atmospheric aircrafts". Moscow. October 24-26, 2012 Abstracts of the reports]. Pp. 152-154. (In Russian)
18. Geninson B.A., Pankova L.A., Trahtengerts E.A. Otkazoustoychivye metody obespecheniya vzaimnoy informatsionnoy soglasovannosti v raspredelennykh vychislitel'nykh sistemakh [Fault-tolerant methods for ensuring mutual information consistency in distributed computing systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1989. No.5. Pp. 3-18. (In Russian)
19. Lobanov A.V. Vzaimnoe informatsionnoe soglasovanie s identifikatsiyey neispravnostey v raspredelennykh vychislitel'nykh sistemakh [Mutual information agreement with the identification of faults in distributed computing system] *Avtomatika i telemekhanika*. [Automation and Remote Control]. 1992. No. 4. Pp. 137-146. (In Russian)
20. Lobanov A.V. Vzaimnoe informatsionnoe soglasovanie s identifikatsiyey neispravnostey na osnove global'nogo sindroma [Mutual information agreement with the identification of faults based on the global syndrome]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 1996. No.5. Pp. 150-159. (In Russian)
21. Lobanov A.V., Sirenko V.G., Grishin V. Yu. Vzaimnoe informatsionnoe soglasovanie v mnogomashinnykh vychislitel'nykh sistemakh s obnaruzheniem i identifikatsiyey kratnykh vrazhdebnykh neispravnostey [Mutual information agreement in multi-computer systems with the detection and identification of multiple hostile failures]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2003. No. 4. Pp. 123-133. (In Russian)
22. Lobanov A.V., Asharina I.V., Mishhenko I.G. Vzaimnoe informatsionnoe soglasovanie v nepolnosvjaznykh mnogomashinnykh vychislitel'nykh sistemakh [Mutual informational coordination in nepolnoglasnykh multi-machine computing systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2003. No. 5. Pp. 190-199. (In Russian)
23. Asharina I.V., Lobanov A.V. Vzaimnoe informatsionnoe soglasovanie v nepolnosvjaznykh geterogennykh mnogomashinnykh vychislitel'nykh sistemakh [Mutual informational coordination in nepolnoglasnykh heterogeneous multicomputer computational systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2010. No. 5. Pp. 133-146. (In Russian)
24. Lobanov A.V. Vzaimnoe informatsionnoe soglasovanie s obnaruzheniem i identifikatsiyey vrazhdebnykh neispravnostey v nepolnosvjaznykh mnogomashinnykh vychislitel'nykh sistemakh [Mutual information agreement with the detection and identification of hostile failures in incompletely connected multi-computer systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2003. No. 6. Pp. 175-185. (In Russian)
25. Asharina I.V., Lobanov A.V. Vydelenie kompleksov, obespechivajushchih dostatochnye strukturnye usloviya sistemnogo vzaimnogo informatsionnogo soglasovanija v mnogokompleksnykh sistemakh [The formation of complexes, providing sufficient structural conditions of the system mutual information matching in mnogokomponentnykh systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2014. No. 6. Pp. 115-131. (In Russian)
26. Asharina I.V., Lobanov A.V. Vydelenie strukturnoj sredy sistemnogo vzaimnogo informatsionnogo soglasovanija v mnogokompleksnykh sistemakh [The allocation of the structural environment of the system mutual information matching in mnogokomponentnykh systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2014. No. 8. Pp. 146-156. (In Russian)

27. Lobanov A.V. Protokol otkazoustojchivogo obmena [Protocol for failover exchange]. *Pribory i sistemy upravlenija* [Devices and control systems]. 1993. No. 7. Pp. 8-11. (In Russian)
28. Lobanov A.V., Nahaev S.A. Obespechenie sboe- i otkazoustojchivosti v protokole otkazoustojchivogo obmena [Providing fault and fault tolerance in the fault-tolerant exchange protocol]. *Pribory i sistemy upravlenija* [Devices and control systems]. 1993. No. 7. Pp. 12-13. (In Russian)
29. Lobanov A.V. Raspredelennoe mazhorirovanie informacii s obnaruzheniem i identifikaciej neispravnostej [Distributed majorization of information with detection and identification of faults]. *Avtomatika i telemehhanika* [Automation and Remote Control]. 1997. No. 1. Pp. 145-149. (In Russian)
30. Лобанов А.В. Lobanov A.V. Organizacija sboe- i otkazoustojchivyh vychislenij v polnosvjaznyh mnogomashinnyh vychislitel'nyh sistemah [Organization of fault-tolerant and fault-tolerant computing in fully connected multi-computer systems]. *Avtomatika i telemehhanika* [Automation and Remote Control]. 2000. No. 12. Pp. 138-146. (In Russian)
31. Lobanov A.V. Obnaruzhenie i identifikacija neispravnostej v raspredelennyh upravljajushchih vychislitel'nyh sistemah s programmno-upravljaemoj sboe- i otkazoustojchivost'ju [Detection and identification of faults in distributed control computing systems with program-controlled fault and fault tolerance]. *Avtomatika i telemehhanika* [Automation and Remote Control]. 1998. No. 1. Pp. 155-164. (In Russian)
32. Lobanov A.V. Obnaruzhenie i identifikacija "vrazhdebnyh" neispravnostej putem odnovremennogo sochetanija funkcional'nogo i testovogo diagnostirovanija v mnogomashinnyh vychislitel'nyh sistemah [Detection and identification of "hostile" faults by simultaneous combination of functional and test diagnostics in multi-computer systems]. *Avtomatika i telemehhanika* [Automation and Remote Control]. 1999. No. 1. Pp. 159-165. (In Russian)
33. Lobanov A.V., Sirenko V.G., Grishin V.Ju. Funkcional'noe diagnostirovanie v raspredelennom sistemnom diagnostirovanii mnogomashinnyh vychislitel'nyh sistem [Functional diagnosis in distributed system diagnostics of multi-computer systems]. *Avtomatika i telemehhanika* [Automation and Remote Control]. 2002. No 1. Pp. 152-158. (In Russian)
34. Sirenko V.G. Funkcional'noe diagnostirovanie processov posylki informacii v vychislitel'nyh sistemah pri neizvestnom ishodom znachenii peredavaemoj informacii [Functional diagnosis of the processes of sending information in computer systems with unknown initial value of transmitted information]. *Avtomatika i telemehhanika* [Automation and Remote Control]. 2005. No. 11. Pp. 135-154. (In Russian)
35. Sirenko V.G. Metod lokalizacii "vrazhdebnyh" neispravnostej v mnogomashinnyh vychislitel'nyh sistemah [Method of localization of "hostile" faults in multi-computer systems]. *Izvestija vuzov. Jel'ektronika* [Proceedings of high schools. Electronics]. 2006. No. 3. Pp. 38-43. (In Russian)
36. Lobanov V.A., Grishin V.Ju., Sirenko V.G. Raspredelennoe sistemnoe diagnostirovanie vrazhdebnyh neispravnostej v nepolnosvjaznyh mnogomashinnyh vychislitel'nyh sistemah [Distributed system diagnostics of hostile faults in incompletely connected multi-computer systems]. *Avtomatika i telemehhanika* [Automation and Remote Control]. 2005. No. 2. Pp. 148-157. (In Russian)
37. Lobanov A.V. Organizacija sboe- i otkazoustojchivoj raboty dvuhkompleksnoj mnogomashinnoj vychislitel'noj sistemy [Organization of faulty and fault-tolerant operation of a two-complex multi-computer system]. *Avtomatika i telemehhanika* [Automation and Remote Control]. 1998. No. 2. Pp. 143-152. (In Russian)
38. Lobanov A.V., Sirenko V.G. Raspredelennye metody sistemnogo diagnostirovanija [Distributed methods of system diagnosis]. *Avtomatika i telemehhanika* [Automation and Remote Control]. 2000. No. 8. Pp. 165-172. (In Russian)
39. Lobanov A.V. Strategicheskie i takticheskie problemy i zadachi v organizacii sboe- i otkazoustojchivyh vychislenij na osnove replikacii zadach v mnogokompleksnyh mnogomashinnyh vychislitel'nyh sistemah i setjah CVM [Strategic and tactical problems and tasks in the organization of faulty and fault-tolerant computing on the basis of task replication in multi-computer multi-computer systems and digital computer networks]. *Informacionnye tehnologii v nauke, obrazovanii, telekommunikacii i biznese: materialy XXXVI Mezhdunarodnoj konferencii i diskussionnogo nauchnogo kluba IT+SE'10. Majskaia sessija. Jalta-Gurzuf. – prilozhenie k zhurnalnu «Otkrytoe obrazovanie»* [Information technologies in science, education, telecommunications and business: materials of the XXXVI International Conference and Discussion Science Club IT + SE'10. May session. Yalta-Gurzuf. – supplement to the journal "Open Education"]. 2010. Pp. 119-121. (In Russian)

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'"; Grishin V. Ju., PhD, Deputy Director of the Joint-Stock Company "Scientific Research Institute 'Submicron'"; Sirenko V.G., PhD, Full Professor, Director of the Joint-Stock Company "Scientific Research Institute 'Submicron'".

For citation: Lobanov A.V., Asharina I.V., Grishin V. Ju., Sirenko V.G. A prototype of a highly adaptive, distributed, net-centric, multicomplex malfunction- and fault-tolerant control system – a topical problem. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 1. Pp. 0-00. doi 10.24411/2409-5419-2018-10019 (In Russian)

doi 10.24411/2409-5419-2018-10020

ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ ОДНОТИПНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛИКВИДАЦИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ГРУППОВОМ СПОСОБЕ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

МИНАКОВ

Евгений Петрович¹

ТАРАСОВ

Анатолий Геннадьевич²

КРАВЦОВ

Владимир Владимирович³

Информация об авторах:

¹д.т.н., профессор, профессор кафедры управления организационно-техническими системами космического назначения Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, ер.minakov12345@mail.ru;

²к.т.н., заместитель начальника кафедры автономных систем управления Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, AtoI-77@mail.ru;

³адъюнкт кафедры управления организационно-техническими системами космического назначения Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия, lolo072606@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Высокие риски, обусловленные угрозами возникновения техногенных экстремальных ситуаций и катастроф, вызывают необходимость поиска наиболее эффективных путей улучшения работы по предупреждению, выявлению, локализации экстремальных ситуаций и ликвидации их последствий. При этом под экстремальной ситуацией понимается обстановка, складывающаяся в некоторой пространственно-временной области, характеризующаяся возникновением факторов непосредственной угрозы для здоровья и жизни людей или угрозы срыва их деятельности по решению задач в этой области.

Групповое применение робототехнических систем может быть достигнуто из определенных пространств, в которых они должны быть развернуты перед началом применения и которые следует называть исходными рубежами. Локомоция робототехнических систем в эти пространственно-временные области – ключевые зоны применения, порождает ряд задач, решение одной из которых рассматривается в настоящей статье, а именно: решение задачи определения маршрутов движения одноподобных робототехнических систем ликвидации экстремальных ситуаций при групповом способе их применения.

В процессе работы выявлены зависимости максимального времени движения робототехнических систем до узлов ключевых зон применения, времени ликвидации экстремальных ситуаций в узлах с максимальным уровнем опасных факторов, суммарного времени применения робототехнических систем и интенсивности ликвидации экстремальных ситуаций группировками робототехнических систем в каждом из этих узлов от варьируемых значений производительности ликвидации опасных факторов экстремальных ситуаций робототехническими системами (интенсивности расхода ресурса манипуляционной подсистемы робототехнических систем).

Приведенные зависимости дают возможность вычисления времени ликвидации, расхода ресурса манипуляционной и локомоционной подсистем, а также позволяют на этапе планирования определить рациональный маршрут движения одноподобных робототехнических систем ликвидации экстремальных ситуаций при их групповом способе применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: робототехническая система; ключевая зона применения; рубеж атаки; экстремальная ситуация; опасный фактор.

Для цитирования: Минаков Е.П., Тарасов А.Г., Кравцов В.В. Задача определения маршрутов движения одноподобных робототехнических систем ликвидации экстремальных ситуаций при групповом способе их применения // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 1 С. 59-68. doi 10.24411/2409-5419-2018-10020

В том случае, когда тактико-технические характеристики (ТТХ) робототехнических систем (РТС) являются известными, возникает задача планирования их группового применения, целераспределения и оценивания эффективности ликвидации опасного фактора (ОФ) экстремальной ситуации (ЭС) [1–3]. Одним из первых алгоритмов, разработанных для решения проблемы распределения целей (задач, функций) между группой агентов, является Венгерский алгоритм [4], который позволяет распределить агентов по целевым функциям таким образом, чтобы минимизировать затраты на их выполнение.

Кроме того, для решения задачи целераспределения нередко используются подходы с применением метода релаксаций Лагранжа [5], линейного целочисленного программирования и нелинейных сетевых потоков [6], динамического программирования [7], нечетких моделей [8], нейронных сетей [9], генетических алгоритмов [10], муравьиных алгоритмов [11]. Также в области распределения целей находят применение алгоритмы коллективного улучшения плана [12–14].

Пусть ключевая зона применения (КЗП) РТС задана равноразмерными кубами, имеющими одинаковую ориентацию в связанной системе координат (СК) $O_{cb} X_{cb} Y_{cb} Z_{cb}$ и расположенными послойно, начиная с плоскости $O_{cb} X_{cb} Y_{cb}$. Пусть ребра куба определяются через одинаковый для всех РТС радиус зоны действия манипуляционной подсистемы (МП) по формуле:

$$a = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \Delta r_{МП} \cos \beta = \text{const}$$

где β — угол между диагональю куба и ее проекцией на боковую грань;

$\Delta r_{МП}$ — радиус действия шаровой МП.

Пусть для каждого i -го куба КЗП определена величина ОФ ЭС — ΔW_i и заданы технические характеристики (ТХ) однотипных РТС:

— радиус действия шаровой МП — $\Delta r_{МП}$;

— ресурс РТС для ликвидации ОФ ЭС заданного типа — $\Delta W_{РТС}$.

Существует ряд основных способов применения робототехнических систем (РТС):

- 1) способ одновременного массированного применения РТС в узлах КЗП с максимальным уровнем ОФ ЭС;
- 2) способ одновременного массированного применения РТС в узлах КЗП с максимальным уровнем ОФ ЭС с последующим равноприоритетным применением РТС в оставшихся узлах;
- 3) способ последовательного массированного применения РТС в узлах КЗП с максимальным уровнем ОФ ЭС;
- 4) способ последовательно-группового применения РТС во всех узлах КЗП с самыми высокими уровнями ОФ до полной ликвидации ОФ (до требуемого уровня) с последующими переходами и аналогичными применениями

РТС в других узлах КЗП с последовательно понижающимися уровнями ОФ;

5) способ локального, последовательно-группового применения РТС в узлах КЗП с самыми высокими уровнями ОФ до полной ликвидации ОФ (до требуемого уровня) с последующим переходом РТС в другие узлы таким образом, чтобы обеспечить воздействие по ОФ в максимально возможном числе узлов;

6) способ равномерного воздействия РТС на ОФ ЭС по всем узлам КЗП (способ пропорционального понижения уровня ЭС);

7) способ применения РТС с ближайших к границе точек КЗП (с единого рубежа атаки (РА), с рассредоточенного РА);

8) комбинация способов.

Уровень ОФ ЭС может измеряться с помощью разработанного в [15] сигнализатора обнаружения и определения местоположения тревожных и критических ситуаций. Таким образом, исходными данными для решения задачи определения маршрутов движения/применения РТС в КЗП являются:

1) величина ребра аппроксимационного куба КЗП — a ;

2) топология КЗП до начала применения РТС: $A_0 = \{A_{0i}\}$, где $A_{0i} = \langle X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, \Delta W_{0i} \rangle$, i — номер (идентификатор) узла КЗП; X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i} — координаты i -го узла КЗП; ΔW_{0i} — уровень ОФ ЭС в i -м узле, $i = 1, 2, \dots, M$, где M — число узлов КЗП;

3) число РТС — N и их состав $Q = \{q_n\}$;

4) ТХ однотипных РТС:

$$T_x = \langle \Delta W_{РТС}, \Delta V_{РТС}, v_{РТС}, \lambda_{РТС} = \Delta W_{РТС} / \Delta t_{РТС} \rangle,$$

где $\Delta W_{РТС}$ — ресурс МП РТС для воздействия по ОФ ЭС; $\Delta V_{РТС}$ — ресурс локомоторной подсистемы (ЛП) РТС; $v_{РТС}$ — интенсивность расхода ресурсов ЛП РТС (расход ресурсов ЛП РТС на единицу пути); $\lambda_{РТС} = \Delta W_{РТС} / \Delta t_{РТС}$ — производительность ликвидации ОФ ЭС РТС (интенсивность расхода ресурса МП РТС); $\Delta t_{РТС}$ — предельное время функционирования МП РТС;

5) координаты точек стояния РТС на РА (начала движения РТС): $B_k = \langle X_k, Y_k, Z_k \rangle$, $k = 1, 2, \dots, N$; РТС: $N < M$.

Допущения:

- 1) закладка начальной топологии КЗП на РТС осуществляется на этапе их подготовки к применению;
- 2) при планировании движения и применения, РТС рассматриваются как материальные точки;
- 3) движение РТС между узлами КЗП происходит по отрезкам, соединяющим эти узлы;
- 4) движение РТС до узлов КЗП при априорном целераспределении происходит по кратчайшем до них пути (отрезку прямой) из точки начала движения;
- 5) в качестве пути между любыми двумя узлами КЗП принимается сумма отрезков минимальной из всех возможных длины;

- 6) возможность изменения у точки стояния и применения РТС появляется только после полной ликвидации ОФ ЭС;
- 7) каждое РТС обладает возможностью оценивать уровень ОФ ЭС в узле КЗП.

Требуется: определить маршруты движения/применения РТС при их применении в составе РТК для ликвидации ОФ ЭС в КЗП и время, потребное для ликвидации ОФ ЭС.

Для реализации способа одновременного массированного применения РТС в узлах КЗП с максимальным уровнем ОФ ЭС (рис. 1) необходимо одновременное сосредоточение совокупности РТС в одном узле КЗП. Пусть для этого имеется возможность такого расположения РТС, при котором они образуют фигуру, внешняя конфигурация которой аппроксимируется сферой внутри которой РТС располагаются равномерно, плотно прижатыми друг к другу с развернутыми наружу (от центра сферы) МП (рис. 2).

Считается, что из-за сужения области воздействия МП при таком расположении РТС в узле КЗП интенсивность ликвидации ОФ ЭС происходит с интенсивностью:

$$\Lambda_i = N_i \times \lambda_{\text{РТС}} \quad (1)$$

где N_i — число применяемых в i -м узле РТС.

Способ одновременного массированного применения РТС в узлах КЗП с максимальным уровнем ОФ ЭС при начале их движения из точек рассредоточенного РА, расположенного вне КЗП состоит в выявлении узлов КЗП с максимальным на этапе уровнем ОФ ЭС (назначением узлов) и концентрированным (массированным) применением в них всех пригодных для этого РТС (рис. 1).

Этапы определения маршрутов РТС (последовательностей применения и путей движения РТС) и их характеристик (времен движения и применения между начальным и последним узлами КЗП, числа обслуженных узлов КЗП и остаточных ресурсов РТС) при этом способе включают в себя:

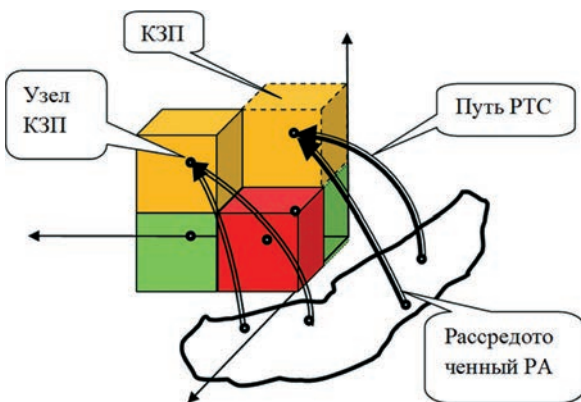


Рис. 1. Способ одновременного массированного применения РТС в узлах КЗП с максимальным уровнем ОФ ЭС

I. Этап оценивания потенциально результативного по расходованию ресурсов МП целераспределения РТС:

$$U_{\text{ПРЦ}} = \sum_{i=1}^M \Delta W_{0i} - \sum_{j=1}^N \Delta W_{\text{РТС}j} = \sum_{i=1}^M \Delta W_{0i} - N \Delta W_{\text{РТС}}$$

Для однотипных РТС:

$$U_{\text{ПРЦ}} = \sum_{i=1}^M \Delta W_{0i} - N \Delta W_{\text{РТС}}$$

Если $U_{\text{ПРЦ}} \leq 0$, то считается, что существует потенциально результативное целераспределение N РТС по M узлам КЗП по показателю ресурсов их МП.

Если $U_{\text{ПРЦ}} > 0$, то потенциально результативное целераспределение N РТС по M узлам КЗП не существует. В этом случае оценивается показатель предельных возможностей РТК по ликвидации ЭС:

$$B = \frac{N \Delta W_{\text{РТС}}}{\sum_{i=1}^M \Delta W_{0i}} \cdot 100\% \quad (2)$$

по величине (2) принимается решение о задействовании дополнительных сил и средств для ликвидации ЭС.

II. Этап оценивания времени, потребного для полной ликвидации ОФ ЭС:

1) выявление узлов с максимальным уровнем ОФ (назначение узлов) неразличимых по приоритетности ликвидации этих факторов, — $\{i_{0m}^{\text{max}}\}$;

2) определение равного числа РТС, назначаемых на каждый из этих узлов:

а. при выявлении узлов с максимальным одинаковым уровнем ОФ:

$$N_{0i} = E \left[N / \eta \{i_{0m}^{\text{max}}\} \right]$$

где $\eta \{i_{0m}^{\text{max}}\}$ — мощность множества $\{i_{0m}^{\text{max}}\}$;

б. при назначении узлов с различным уровнем ОФ:

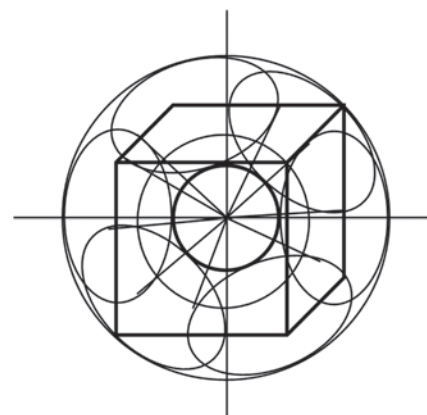


Рис. 2. Аппроксимация сферой внутри которой РТС располагаются равномерно

$$N_{0i} = E[K_i \cdot N]$$

где $K_i = \Delta W_{0i} / \sum_{i=1}^M \Delta W_{0i}$ — вес узла по уровню ОФ;

3) оценивание затрат ресурсов ЛП РТС на выдвигание каждой q -й РТС, $q = 1 \dots N$, из начальной точки на РА в соответствующий i_m^0 — й узел:

$$\Delta t_{ni0m}^q = \frac{L_{ni0}}{V_{РТС}}$$

где L_{ni0} — длина пути от точки стояния РТС на РА до i_m^0 -го узла КЗП;

а. оценивание времен, потребных на выдвигание каждой q -й РТС из начальной точки на РА в соответствующий i_m^0 -й узел:

$$\Delta t_{ni0m}^q = \frac{L_{ni0}}{V_{РТС}}$$

б. ранжирование времен по возрастанию и выделение первых $N_i^0 \cdot \eta \{i_m^0\}$ РТС;

4) формирование целераспределения $N_{0i} \rightarrow \eta \{i_m^0\}$ РТС, т.е. назначение состава из N_i^0 РТС — $\{q_{i0m}\}$ на каждый i_m^0 -й узел, выявленный по п. 1, по критерию $\Delta t_{ni0m}^q \rightarrow \min$;

5) оценивание времен начала выдвигания РТС к заданным узлам:

$$t_{ni0m}^q = T_H - \Delta t_{ni0m}^q$$

где T_H — время начала ликвидации ЭС;

6) оценивание оставшегося незадействованным по множеству узлов $\{i_m^0\}$ состава РТС $\{q_1^0\} = \{q\} \setminus \{q_{i0m}\}$, где $\{q\}$ — множество действующих по множеству узлов $\{i_m^0\}$ РТС, и координат точек их стояния на РА (начала движения РТС) $B_{k1} = \langle X_{k1}, Y_{k1}, Z_{k1} \rangle$, $k_1 = 1, 2, \dots, M \{q_1^0\}$; следует иметь ввиду, что, во-первых, множество $\{q_1^0\}$ можно рассматривать как резерв РТС, во-вторых, оно может быть пустым;

7) оценивание времени, потребного для полной ликвидации уровня ОФ ЭС в каждом i_m^0 -м выявленном узле:

$$\Delta t_{i0m} = \frac{\Delta W_{0i}}{\Lambda_{i0m}} = \frac{\Delta W_{0i}}{\sum_{i=1}^m \lambda_{i0}}$$

где Λ_{i0m} — суммарная интенсивность воздействия по ОФ ЭС выделенных для этого РТС в i_m^0 -м узле, определяемая по формуле (1);

9) оценивание времени, потребного для полной ликвидации ОФ ЭС в множестве узлов $\{i_m^0\}$, включая времена движения РТС до этих узлов:

$$\Delta t_{i0} = \max_{i_0m} \left\{ \Delta t_{i0m} + \max_q \left\{ \Delta t_{ni0m}^q \right\} \right\}$$

Пример и результаты оценивания характеристик способа одновременного массированного группового применения однотипных робототехнических систем ликвидации экстремальных ситуаций

Исходные данные:

1) величина ребра аппроксимационного куба КЗП — a ;
 2) топология КЗП до начала применения РТК: $A_0 = \{A_{0i}\}$, где $A_{0i} = \langle X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, \Delta W_{0i} \rangle$, i — номер (идентификатор) узла КЗП; X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i} — координаты i -го узла КЗП; ΔW_{0i} — уровень ОФ ЭС в i -м узле, $i = 1, 2, \dots, M$, где M — число узлов КЗП;

3) число РТС — N и их состав $Q = \{q_n\}$;

4) ТХ однотипных РТС: $T_X = \langle \Delta W_{РТС}, \Delta V_{РТС}, v_{РТС}, V_{СР} \rangle$, $\lambda_{РТС} = \Delta W_{РТС} / \Delta t_{РТС}$, где $\Delta W_{РТС}$ — ресурс МП РТС для воздействия по ОФ ЭС; $\Delta V_{РТС}$ — ресурс ЛП РТС; $v_{РТС}$ — интенсивность расхода ресурсов ЛП РТС (расход ресурсов ЛП РТС на единицу пути); $\lambda_{РТС}$ — производительность ликвидации ОФ ЭС РТС (интенсивность расхода ресурса МП РТС); $\Delta t_{РТС}$ — предельное время функционирования МП РТС;

5) координаты точек стояния РТС на РА (начала движения РТС) $B_k = \langle X_k, Y_k, Z_k \rangle$, $k = 1, 2, \dots, N$; РТС: $N < M$.

Допущения:

1) пути РТС представляют собой отрезки прямых, соединяющих узлы КЗП;

2) время на подготовку РТС к применению не учитывается;

3) все РТС считаются однотипными (гомогенными).

Исходные данные по топологии КЗП представлены в табл. 1.

Исходные данные по ТХ РТС приведены в табл. 2.

Варьируемым параметром при вычислительных экспериментах была принята величина $\lambda_{РТС}$ — производительности ликвидации ОФ ЭС РТС, которая равнялась 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 у.е./с.

Таблица 1

Топология КЗП

№ узла (i)	X_{0i} , км	Y_{0i} , км	Z_{0i} , км	ΔW_{0i} , у.е.
1	8,0001	8,0001	8,0001	8
2	8,0001	8,0001	8,0001	8
3	8,0001	8,0001	8,0001	1
4	8,0001	8,0001	8,0001	2
5	8,0001	8,0001	8,0001	2
6	8,0001	8,0001	8,0001	3
7	8,0001	8,0001	8,0001	2
8	8,0001	8,0001	8,0001	8
9	8,0001	8,0001	8,0001	1
0	8,0001	8,0001	8,0001	5

Таблица 2

Технические характеристики РТС

№ П/П	a , км	$\Delta W_{\text{РТС}}$, у.е.	$\Delta V_{\text{РТС}}$, у.е.	$N_{\text{РТС}}$, у.е./км.	$\Lambda_{\text{РТС}}$, у.е./с	X_k , км	Y_k , км	Z_k , км	$V_{\text{сп}}$, км/с
1	1	3	3	0,3	0,5	7	7	7	3
2	2	3	3	0,3	0,5	7,2	7,2	7,2	3
3	3	3	3	0,3	0,5	7,4	7,4	7,4	3
4	4	3	3	0,3	0,5	7,6	7,6	7,6	3
5	5	3	3	0,3	0,5	7,8	7,8	7,8	3
6	6	3	3	0,3	0,5	8	8	8	3
7	7	3	3	0,3	0,5	8,2	8,2	8,2	3
8	8	3	3	0,3	0,5	8,4	8,4	8,4	3
9	9	3	3	0,3	0,5	8,6	8,6	8,6	3
10	10	3	3	0,3	0,5	8,8	8,8	8,8	3

Эксперименты проводились для трех группировок РТС:

I. РТС с №№ 1–10;

II. РТС с №№ 1–5;

III. РТС с №№ 1,2.

Результаты вычислительных экспериментов приведены для каждой из указанных группировок в табл. 4.

I. Группировка РТС

Продолжительность движения РТС от точек на РА до узлов с максимальным уровнем ОФ ЭС с №№ 1, 2, 8 (табл. 1) приведены в табл. 3 и их целераспределение по этим узлам приведены в табл. 4.

В табл. 5 остаточный уровень ОФ ЭС соответствует применению РТС по узлам с максимальным уровнем ОФ ЭС. Значение остаточного уровня ОФ ЭС меньше нуля демонстрирует, что в этом узле ОФ ликвидирован с суммарным перерасходом ресурсов РТС. Если значение остаточного уровня ОФ ЭС равно нулю, то РТС полностью ликвидировали ОФ ЭС, полностью исчерпав свои ресурсы. Если значение остаточного уровня ОФ ЭС больше нуля, то РТС полностью ликвидировали ОФ ЭС, сохранив свои ресурсы в соответствующем суммарном количестве.

В том случае, если число применяемых РТС меньше общего их числа в резерв выводилось РТС с максимальным

Таблица 3

Продолжительность движения РТС от точек на РА до узлов с максимальным уровнем ОФ ЭС

№ РТС	№ узла с максимальным уровнем ОФ ЭС		
	1	2	8
	Продолжительность движения РТС до соответствующего узла		
	$\Delta t_{\text{ни}0\text{м}}^q$, час	$\Delta t_{\text{ни}0\text{м}}^q$, час	$\Delta t_{\text{ни}0\text{м}}^q$, час
1	0,577408	0,866083	1,154758
2	0,46193795	0,750613	1,039288
3	0,3464679	0,635143	0,923818
4	0,23099784	0,519673	0,808348
5	0,11552779	0,404203	0,692878
6	0,000057735	0,288733	0,577408
7	0,11541232	0,173263	0,461938
8	0,23088237	0,057793	0,346468
9	0,34635243	0,057677	0,230998
10	0,46182248	0,173147	0,115528

Таблица 4

Целераспределение РТС по узлам с максимальным уровнем ОФ ЭС

№ РТС	№ узла с максимальным уровнем ОФ ЭС		
	1	2	8
1			
2			2
3		3	
4	4		
5			5
6	6		
7	7		
8		8	
9		9	
10			10

временем движения из точки РА до какого-либо узла КЗП. Например, для первой группировки такой является РТС с № 1.

Максимальные времена движения РТС до узлов КЗП, время ликвидации ЭС в узлах с максимальным уровнем ОФ, суммарное время применения РТС и интенсивности ликвидации ЭС группировками РТС в каждом из этих узлов для варьируемых значений $\lambda_{РТС}$ представлены в табл. 6.

Соответствующие гистограммы зависимостей для Δt_{i0m} и Δt_{i0} представлены на рис. 3.

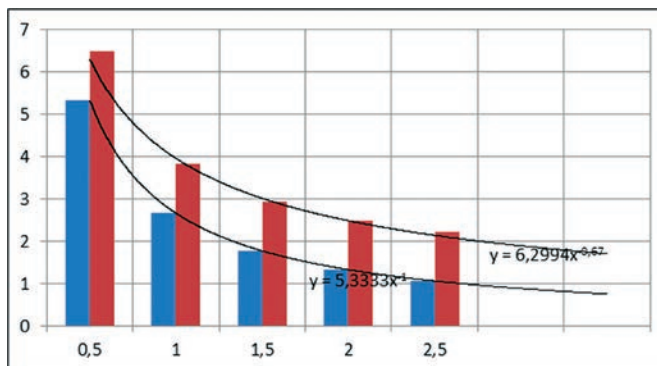


Рис. 3. Зависимости Δt_{i0m} и Δt_{i0} от $\lambda_{РТС}$

Приведенные гистограммы могут быть аппроксимированы степенными функциями с параметрами, указанными на этом рисунке.

II. Группировка РТС

Продолжительность движения РТС от точек на РА до узлов с максимальным уровнем ОФ ЭС с №№ 1, 2, 8 (табл. 1) приведены в табл. 7 и их целераспределение по этим узлам приведены в табл. 8.

Результаты оценивания числа применяемых РТС и показателя предельных возможностей РТК по ликвидации ЭС для всех рассматриваемых группировок РТС приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты оценивания числа применяемых РТС и показателя предельных возможностей РТК по ликвидации ЭС для всех рассматриваемых группировок РТС

№ группировки	Общее число РТС	Число применяемых РТС	В	Остаточный уровень ОФ ЭС, у.е.
I	10	9	75	-1
II	5	4	71,428571	2
III	2	2	37,5	5

Таблица 6

Зависимость временных параметров применения РТС и интенсивности ликвидации ЭС группировками РТС от значений $\lambda_{РТС}$

$\max \left\{ \Delta t_{ni0m}^q \right\}$, час	$\lambda_{РТС}$, у.е./с	Δt_{i0m} , час	Δt_{i0} , час	$\Delta i0m$, у.е./с
1,0392882	0,5	5,3333333	6,3726216	1,5
1,0392882	1	2,6666667	3,7059549	3
1,0392882	1,5	1,7777778	2,817066	4,5
1,0392882	2	1,3333333	2,3726216	6
1,0392882	2,5	1,0666667	2,1059549	7,5

Таблица 6

Продолжительность движения РТС от точек на РА до узлов с максимальным уровнем ОФ ЭС

№ РТС	№ узла с максимальным уровнем ОФ ЭС		
	1	2	8
	Продолжительность движения РТС до соответствующего узла		
	Δt_{ni0m}^q , час	Δt_{ni0m}^q , час	Δt_{ni0m}^q , час
1	0,577408	0,866083	1,154758
2	0,46193795	0,750613	1,039288
3	0,3464679	0,635143	0,923818
4	0,23099784	0,519673	0,808348
5	0,11552779	0,404203	0,692878

Таблица 8

Целераспределение РТС по узлам с максимальным уровнем ОФ ЭС

№ РТС	№ узла с максимальным уровнем ОФ ЭС		
	1	2	8
1		1	
2	2		
3			3
4		4	
5	5		

В этом случае число применяемых РТС меньше общего их числа и в резерв выводилось РТС с № 1 с максимальным временем движения из точки РА до какого-либо узла КЗП.

Максимальные времена движения РТС до узлов КЗП, время ликвидации ЭС в узлах с максимальным уровнем ОФ, суммарное время применения РТС и интенсивности ликвидации ЭС группировками РТС в каждом из

этих узлов для варьируемых значений $\lambda_{РТС}$ представлены в табл. 9.

Соответствующие гистограммы зависимостей для Δt_{i0m} и Δt_{i0} представлены на рис. 4.

Приведенные гистограммы могут быть аппроксимированы степенными функциями с параметрами, указанными на этом рисунке.

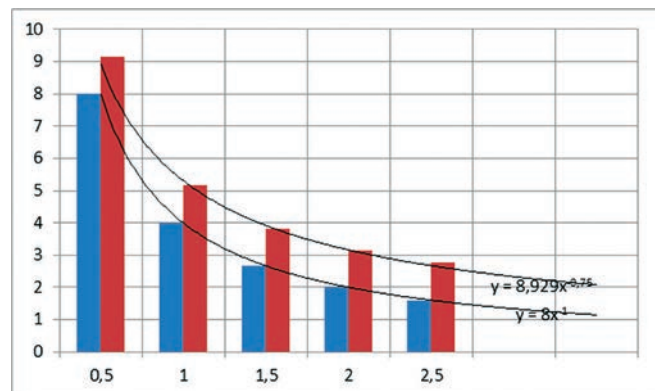


Рис. 4. Зависимости Δt_{i0m} и Δt_{i0} от $\lambda_{РТС}$

Таблица 9

Зависимость временных параметров применения РТС и интенсивности ликвидации ЭС группировками РТС от значений $\lambda_{РТС}$

$\max \left\{ \Delta t_{ni0m}^q \right\}$, час	$\lambda_{РТС}$, у.е./с	Δt_{i0m} , час	Δt_{i0} , час	Δi_{0m} , у.е./с
0,9238182	0,5	8	8,9238182	1
0,9238182	1	4	4,9238182	2
0,9238182	1,5	2,6666667	3,5904848	3
0,9238182	2	2	2,9238182	4
0,9238182	2,5	1,6	2,5238182	5

III. Группировка РТС

Продолжительность движения РТС от точек на РА до узлов с максимальным уровнем ОФ ЭС с №№ 1, 2, 8 (табл. 1) приведены в табл. 10 и их целераспределение по этим узлам приведены в табл. 11.

Максимальные времена движения РТС до узлов КЗП, время ликвидации ЭС в узлах с максимальным уровнем ОФ, суммарное время применения РТС и интенсивности ликвидации ЭС группировками РТС в каждом из этих узлов для варьируемых значений $\lambda_{РТС}$ представлены в табл. 12.

Соответствующие гистограммы зависимостей для Δt_{i0m} и Δt_{i0} представлены на рис. 5.

Приведенные гистограммы могут быть аппроксимированы степенными функциями с параметрами, указанными на этом рисунке.

Выводы

В результате вычислительного эксперимента при принятых модельных условиях установлено, что максимальную вероятность ликвидации ОФ ЭС обеспечивает способ рассредоточенного применения однотипных РТС в любых узлах КЗП, а также доказано, что рассредоточенное применение однотипных РТС от граничных узлов КЗП позволяет сократить до 50% ресурс ЛП, за счет кото-

Таблица 10

Продолжительность движения РТС от точек на РА до узлов с максимальным уровнем ОФ ЭС

№ РТС	№ узла с максимальным уровнем ОФ ЭС		
	1	2	8
	Продолжительность движения РТС до соответствующего узла		
	Δt_{hi0m}^q , час	Δt_{hi0m}^q , час	Δt_{hi0m}^q , час
1	0,577408	0,866083	1,154758
2	0,46193795	0,750613	1,039288

Таблица 11

Целераспределение РТС по узлам с максимальным уровнем ОФ ЭС

№ РТС	№ узла с максимальным уровнем ОФ ЭС		
	1	2	8
1		1	
2	2		

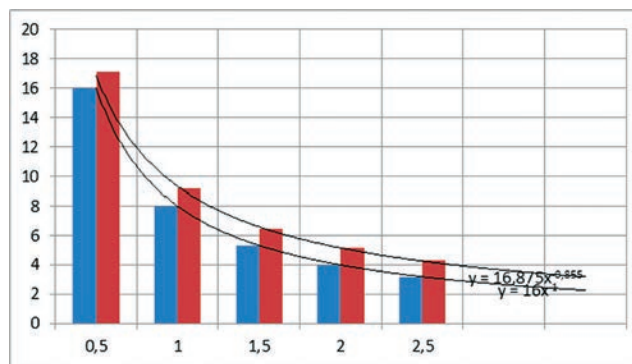


Рис. 5. Зависимости Δt_{i0m} и Δt_{i0} от $\lambda_{РТС}$

Таблица 12

Зависимость временных параметров применения РТС и интенсивности ликвидации ЭС группировками РТС от значений $\lambda_{РТС}$

$\max \left\{ \Delta t_{hi0m}^q \right\}$, час	$\lambda_{РТС}$, у.е./с	Δt_{i0m} , час	Δt_{i0} , час	Δi_{0m} , у.е./с
0,8660831	0,5	16	16,866083	0,5
0,8660831	1	8	8,8660831	1
0,8660831	1,5	5,3333333	6,1994165	1,5
0,8660831	2	4	4,8660831	2
0,8660831	2,5	3,2	4,0660831	2,5

рого может быть повышена вероятность ликвидации ОФ при изменении прогнозируемых условий развития ЭС.

Литература

1. *Тарасов А.Г., Минаков Е.П.* Робототехнические комплексы автоматизированных систем управления подготовкой и пуском ракет космического назначения и показатели эффективности их применения // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 6. С. 19–24.
2. *Минаков Е.П., Тарасов А.Г., Онов В.А.* Обоснование необходимых условий и вариантов применения робототехнических систем и комплексов ликвидации экстремальных ситуаций // Проблемы управления рисками в техносфере. 2016. № 3 (39). С. 17–25.
3. *Тодосейчук С.П., Самойлов К.И., Климачева Н.Г.* Научно-методические основы создания и применения робототехнических средств для решения задач МЧС России. М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. 192 с.
4. *Письменная В.А., Якутин А.В.* Решение задачи целераспределения с использованием венгерского алгоритма // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 2. С. 32–36.
5. *Ni M., Yu Z., Ma F., Wu X.* A Lagrange Relaxation Method for Solving Weapon-Target Assignment Problem // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. 2011. Vol. 1. Pp. 1–10.
6. *Gainanov D.N., Rasskazova V.A.* An inference algorithm for monotone boolean functions associated with undirected graphs // Bulletin SUSU. 2016. Vol. 9. No. 3. Pp. 17–30.
7. *Sikanen T.* Solving Weapon Target Assignment Problem with Dynamic Programming. Independent research projects in applied mathematics. 2008. 32 p.

8. *Mukhedkar R., Naik S.* Weapon Target Allocation Problem Using Fuzzy Model // Intern. J. of Application or Innovation in Engineering & Management. 2013. Vol. 2. No. 6. Pp. 279–289.

9. *Yang Xin-quan.* The Algorithms Optimization of Artificial Neural Network Based on Particle Swarm // The Open Cybernetics & Systemics Journal. 2014. Vol. 8. Pp. 519–524.

10. *Lu Y., Miao W., Li M.* The Air Defense Missile Optimum Target Assignment Based on the Improved Genetic Algorithm // J. of Theoretical and Applied Information Technology. 2013. Vol. 48. No. 2. Pp. 809–816.

11. *Liu B., Qin Z., Wang R., Gao Y-B., Shao L-P.* A Hybrid Heuristic Ant Colony System for Coordinated Multi-Target Assignment // Information Technology Journal. 2009. Vol. 8. No. 2. Pp. 156–164.

12. *Kohlbrecher S., Stryk O. Von, Meyer J., Klingauf U.* A Flexible and Scalable SLAM System with Full 3D Motion Estimation. Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), IEEE International Symposium on. 2011. Pp. 155–160.

13. *Zavlanos M., Pappas G.* Dynamic assignment in distributed motion planning with limited information // Proc. of the American Control Conference. USA, New-York City, 2007. Pp. 1173–1178.

14. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 278 с.

15. Патент РФ 2631102. Сигнализатор обнаружения и определения местоположения тревожных и критических ситуаций / Тарасов А.Г., Минаков Е.П. Заявл. 09.03.2016. Опубл. 14.09.2017. Бюл. № 26.

THE PROBLEM OF DETERMINING ROUTES OF SIMILAR ROBOTIC SYSTEMS ELIMINATE EMERGENCY SITUATIONS IN CASE OF GROUP METHOD OF APPLICATION

EVGENIY P. MINAKOV,

St-Peterburg, Russia, ep.minakov12345@mail.ru

ANATOLII G. TARASOV,

St-Peterburg, Russia, Atol-77@mail.ru

VLADIMIR V. KRAVTSOV,

St-Peterburg, Russia, lol072606@mail.ru

KEYWORDS: the robotic system; key application area; an extreme situation; the line of attack; dangerous factor.

ABSTRACT

High risks are associated with threats of occurrence of technogenic extreme situations and disasters, necessitate the search of the most effective ways of improving the prevention, detection, containment, extreme situations and liquidation of their consequences. Under extreme situation refers to a situation in a certain space-time region characterized by the emergence of factors immediate threat to the health

and lives of people or the threat of disruption of their activities for solving problems in this area.

At the moment, as we have in the country and abroad massively created robotic systems for various target destination, the application of which should ensure the safety of people in conditions of emergency. A group application for robotic systems can be achieved from certain

spaces in which they must be deployed before use and to be called original borders. Locomotion of robotic systems in these space-time region is a key area of application poses a number of problems one of which is discussed in the present article, namely the problem of determining routes of similar robotic systems eliminate emergency situations in case of group method of application.

In the process, identified according to a maximum time of movement of robotic systems to sites of key application areas, the time of liquidation of extreme situations in the nodes with the highest level of hazardous factors, the total time of application of robotic systems and the intensity of the elimination of emergency situations groups of robotic systems in each of these nodes from variable performance values the elimination of hazards of extreme situations of robotic systems (the intensity of consumption of resource manipulation subsystem for robotic systems).

Dependences give the possibility of calculating the time of the liquidation, consumption and manipulation locomotional subsystems, and allow the planning phase to determine the rational route of similar robotic systems eliminate extreme situations, if the group method of application.

REFERENCES

1. Tarasov A.G., Minakov E.P. Robototekhnicheskie komplekсы avtomatizirovannyh system upravleniya podgotovkoj i puskom raket kosmicheskogo naznacheniya i pokazateli ehffektivnosti ih primeneniya [Robotic systems of automated control systems preparation and launching of a space rocket and indicators of efficiency of their application]. *Promyshlennye ASU i kontrolyer* [Industrial automation and controllers]. 2015. No. 6. Pp. 19-24. (In Russian).
2. Minakov E.P., Tarasov A.G., Onov V.A. Obosnovanie neobhodimyh uslovij i variantov primeneniya robototekhnicheskikh system i kompleksov likvidacii ehkstreimalnyh situacij [Rationale for the necessary conditions and applications of robotic systems and complexes elimination of extreme situations]. *Problemy upravleniya riskami v tehnosfere* [Issues of Risk Management in the Technosphere]. 2016. Vol.3 (39). Pp. 17-25. (In Russian).
3. Todosijchuk S.P., Samoilov K.I., Klimacheva N.G. *Nauchno-metodicheskie osnovy sozdaniya i primeneniya robototekhnicheskikh sredstv dlja reshenija zadach MChS Rossii* [Scientific-methodical bases of creation and application of robotic means for the decision of tasks of EMERCOM of Russia]. Moscow: FGU VNII GOCHS (FC), 2011. 192 p. (In Russian)
4. Pismennaja V. A., Jacutin A.V. Reshenie zadachi celeraspredeleniya s ispolzovaniem vengerskogo algoritma [Solution to the problem of target distribution using the Hungarian algorithm]. *Uspehi sovremennoj radioelektroniki* [Successes of modern Radioelectronics]. 2016. No. 2. Pp. 32-36. (In Russian)
5. Ni M., Yu Z., Ma F., Wu X. A Lagrange Relaxation Method for Solving Weapon-Target Assignment Problem. *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*. 2011. Vol. 1. Pp. 1-10.
6. Gainanov D.N., Rasskazova V.A. An inference algorithm for monotone boolean functions associated with undirected graphs. *Bulletin SUSU*. 2016. Vol. 9. No. 3. Pp.17-30.
7. Sikanen T. *Solving Weapon Target Assignment Problem with Dynamic Programming. Independent research projects in applied mathematics*. 2008. 32 p.
8. Mukhedkar R., Naik S. Weapon Target Allocation Problem Using Fuzzy Model. *Intern. J. of Application or Innovation in Engineering & Management*. 2013. Vol. 2. No. 6. Pp. 279-289.
9. Yang Xin-quan. The Algorithms Optimizaition of Artificial Neural Network Based on Particle Swar. *The Open Cybernetics & Systemics Journal*. 2014. Vol. 8. Pp. 519-524.
10. Lu Y., Miao W., Li M. The Air Defense Missile Optimum Target Assignment Based on the Improved Genetic Algorithm. *J. of Theoretical and Applied Information Technology*. 2013. Vol. 48. No. 2. Pp. 809-816.
11. Liu B., Qin Z., Wang R., Gao Y-B, Shao L-P. A Hybrid Heuristic Ant Colony System for Coordinated Multi-Target Assignment. *Information Technology Journal*. 2009. Vol. 8. No. 2. Pp. 156-164.
12. Kohlbrecher S., Stryk O. von, Meyer J., Klingauf U. *A Flexible and Scalable SLAM System with Full 3D Motion Estimation*. Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), IEEE International Symposium on. 2011. Pp. 155-160.
13. Zavlanos M., Pappas G. Dynamic assignment in distributed motion planning with limited information. *Proc. of the American Control Conference*. USA, New-York City, 2007. Pp. 1173-1178.
14. alyayev I. A., Gaiduk A.R., Kapustian S.G. *Modeli i algoritmy kollectivnogo upravleniya v gruppah robotov* [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow: Fizmatlit, 2009. 278 p. (in Russian)
15. Patent RF 2631102. *Signalizator obnaruzhenia i opredeleniya mestopolozheniya trevozhnyh i kriticheskikh situacij* [The alarm device detection and definition location alarm and critical situation]. Tarasov A.G., Minakov E.P. Declared 09.03.2016. Published 14.09.2017. Bulletin No. 26.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Minakov E. P., PhD, Full Professor, Professor at the Department of Organizational-Technical Systems for Space Purposes of Military Space Academy;
 Tarasov A. G., PhD, Deputy Head of the Department of Autonomous Control Systems of Military Space Academy;
 Kravtsov V. V., Postgraduate at the Department of Organizational-Technical Systems for Space Purposes of Military Space Academy.

For citation: Minakov E. P., Tarasov A. G., Kravtsov V. V. The problem of determining routes of similar robotic systems eliminate emergency situations in case of group method of application. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 1. Pp. 59-68. doi 10.24411/2409-5419-2018-10020 (In Russian)

doi 10.24411/2409-5419-2018-10021

ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ДРЕЙФА КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ИММУННОГО АЛГОРИТМА

СМИРНОВ

Владимир Александрович¹

СМИРНОВ

Дмитрий Владимирович²

Сведения об авторах:

¹к.т.н., ведущий инженер-электроник, руководитель группы перспективных заказов отдела новой техники закрытого акционерного общества «Научно-производственный центр «Аквамарин», г. Санкт-Петербург, Россия, vlad.sm2010@yandex.ru

²инженер-электроник 2 категории отдела новой техники закрытого акционерного общества «Научно-производственный центр «Аквамарин», г. Санкт-Петербург, Россия, Smit-90@inbox.ru

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены вопросы технологического проектирования систем контроля сложных технических объектов одноразового использования. Предмет исследования – гибридный подход к прогнозированию временных рядов на основе искусственной иммунной системы, применяемый для решения задачи прогнозирования временного дрейфа критических параметров бортовой аппаратуры, который характеризуется значительной неопределенностью и неполнотой информации для его моделирования традиционными методами. Целью работы является разработка гибридного подхода к прогнозированию временного дрейфа контролируемых параметров бортовой автоматизированной системы управления на основе комплексного использования инструментария теории искусственного интеллекта и сплайн аппроксимации, позволяющего получать приближенные оценки с приемлемой для практического применения точностью. В исследовании использовались следующие теории и методы: системного анализа, численного анализа, технического контроля и диагностики, искусственного интеллекта (рассуждений на основе прецедентов, искусственных иммунных систем, эволюционных вычислений, нечетких множеств), принятия решений, проектирования интеллектуальных информационных систем. Определена специфика временных рядов и области применения. Предложен модифицированный иммунный алгоритм клональной селекции и пошаговое описание его работы с интерпретацией используемых биологических понятий в терминах предметной области. Основные отличия предлагаемого алгоритма от известных эволюционных алгоритмов заключаются в способе представления иммунных объектов, механизмах адаптации иммунной системы, наборе, содержании и порядке выполнения иммунных операторов, в которых применены ряд идей и принципов различных альтернативных концепций эволюции, а также, эвристических приемов из различных областей знаний. Получены теоретические результаты, которые могут быть использованы при разработке прикладных приложений интеллектуальных систем поддержки принятия решений для контроля состояния сложных технических объектов на предприятиях ракетно-космической отрасли. Применение предложенного подхода дает возможность повысить эксплуатационную надежность и эффективность процесса эксплуатации изделия и создает предпосылки для организации технического обслуживания по фактическому состоянию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прогнозирование; прецедент; сплайн аппроксимация; антиген; антитело; аффинность.

Для цитирования: Смирнов В.А., Смирнов Д.В. Подход к прогнозированию дрейфа критических параметров бортовой системы управления на основе модифицированного иммунного алгоритма // Научоёмкие технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 1 С. 69-81. doi 10.24411/2409-5419-2018-10021

Введение

Проблема обеспечения высокой надежности и безотказности авиационной и ракетно-космической техники становится крайне значимой. Неудачные запуски космических аппаратов, участвовавшие отказы в период предстартовой подготовки, а также опыт применения ракетной техники в боевых условиях заставляют внимательно проанализировать всю цепочку проектирования и изготовления такого рода изделий, включая теоретические основы проектирования технологии контроля бортовой автоматизированной системы управления (БАСУ) летательным аппаратом (ЛА) одноразового использования.

Одной из причин увеличения количества параметрических отказов, влияющих на качество функционирования БАСУ и полноту выполняемых назначенных функций, является недостаточный запас работоспособности ее критичных элементов. Данная причина обусловлена рядом обстоятельств. В существующей на сегодняшний день системе автоматизированного параметрического контроля БАСУ реализован традиционный бинарный подход к оценке контролируемых параметров и работоспособности изделия. Он основан на критерии принадлежности значений параметров соответствующим допусковым зонам и не позволяет обнаруживать предотказные состояния БАСУ. Кроме того, применение некачественных комплектующих элементов, несовершенство или нарушения процесса изготовления, хранения, транспортировки, а также, несоблюдение правил и условий эксплуатации могут привести к изменению физических и химических свойств материалов (ускорению коррозии металлов, разрушению изоляции проводов и кабелей и т.д.), электрических и магнитных параметров комплектующих элементов (ускорению протекания процессов старения, которые не принимают лавинообразный характер). В результате воздействия множества дестабилизирующих факторов происходит изменение значений контролируемых параметров, определяющих техническое состояние объекта.

Одним из перспективных направлений поддержания работоспособного состояния сложной технической системы, мощным фактором повышения ее надежности, качества функционирования в сложных условиях эксплуатации и снижения вероятности и тяжести последствий отказов является прогнозирование ее будущего состояния на этапе эксплуатации [1]. Следует отметить, что в настоящее время вопросы прогнозирования для данного вида объекта контроля, к большому сожалению, не решены. Применительно к БАСУ актуальным является разработка моделей прогнозирования дрейфа контролируемых параметров, так как информация о характере процессов дрейфа параметров позволяет оценить скорость изменения процесса потери работоспособности в ближайший период времени, ожидаемую продолжительность срока службы. Наличие прогнозных

оценок позволит разрабатывать рекомендации эксплуатирующим организациям для выбора стратегии проведения профилактических мероприятий и снабжения запасными частями, гарантирующей сохранение работоспособности на заданном интервале эксплуатации.

Выбор метода прогнозирования для построения прогнозной модели требует учета особенностей предметной области. В нашем случае временные ряды значений параметров имеют следующую специфику, затрудняющую их анализ: длина анализируемого временного ряда содержит сравнительно немного элементов, ограничено количество известных временных рядов, временной ряд является стохастическим, нестационарным и неравноотстоящим и т.д. Также следует отметить малый объем необходимой для прогнозирования информации и ограниченные возможности проведения экспериментов для получения достаточной статистической информации. В этих условиях наиболее распространенные методы и модели прогнозирования (наименьших квадратов, максимального правдоподобия, экспоненциального сглаживания, регрессионные, авторегрессионные) из-за целого ряда ограничений на их использование, не позволяют получить адекватную оценку предстоящих изменений в поведении процесса дрейфа параметров. В настоящее время перспективным направлением решения задач прогнозирования временных рядов является комплексное применение различных методов и моделей, их комбинирование и использование технологий теории искусственного интеллекта. Такой подход позволяет преодолевать ограничения, наложенные на традиционные методы, эффективно использовать их преимущества и, в то же время, преодолевать некоторые недостатки.

Целью работы является разработка гибридного подхода к прогнозированию дрейфа контролируемых параметров БАСУ на основе комплексного использования инструментария теории искусственного интеллекта и сплайн аппроксимации, позволяющего получать приближенные оценки с приемлемой для практического применения точностью.

Постановка задачи прогнозирования временного дрейфа параметров БАСУ

Техническое состояние БАСУ определяется множеством контролируемых параметров $X = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$, характеризующих работоспособность составных частей изделия. На этапе изготовления и эксплуатации осуществляется контроль параметров в процессе различных испытаний: предъявительских и приемосдаточных испытаний на приборостроительных заводах, входном контроле и испытаниях в составе ЛА на заводах-изготовителях ЛА, периодических испытаниях в составе ЛА в эксплуатируемых организациях до использования по прямому назначению и т.д. Контроль параметров производится в моменты времени $t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_s$. Результаты измерений

каждого параметра $x_i(t_j)$ $i = \overline{1, p}; j = \overline{0, s}$ фиксируются, собираются с различных этапов жизненного цикла изделия и обрабатываются, формируя временной ряд — хронологическую последовательность значений параметров с указанием времени измерения каждого параметра. Временной ряд имеет длину s и в процессе поступления новых данных контрольных испытаний его длина изменяется. Задача прогнозирования дрейфа параметра БАСУ сводится к формированию прогноза, состоящего из двух частей: точечного и интервального прогноза. Точечный прогноз представляет собой оценку значения прогнозируемой переменной t_j — времени от момента составления прогноза до момента, когда значение параметра достигнет границы заранее установленной области упреждения в пределах зоны допустимых значений параметра. Интервальный прогноз — это пессимистичная t_p и оптимистичная t_o оценки значений прогнозируемой переменной, определяющих границы интервала, в котором можно ожидать появления фактического значения прогнозируемой переменной.

Поскольку временные ряды характеризуются высокой степенью неопределенности, то в соответствии с главным принципом мягких вычислений (толерантность к неопределенности, неопределенности и частичной истинности для достижения устойчивых решений с низкой стоимостью и лучшего соответствия с реальностью) точность полученных приближенных прогнозных оценок должна быть приемлемой для практического применения.

Описание подхода к прогнозированию дрейфа критических параметров критических параметров БАСУ

Наличие большого количества параметров, характеризующих состояние БАСУ, существенно затрудняет решение задачи построения прогноза. В этой связи предлагается выбрать ограниченную совокупность наиболее информативных параметров, а именно, критические параметры БАСУ, выход значений которых за пределы допусков приводит к критическому отказу изделия. Критерием выбора таких параметров является допустимый уровень по тяжести возможных последствий. При выборе критических параметров предлагается учитывать следующие основные факторы:

взаимосвязь параметра с отказом, влияние которого на качество функционирования БАСУ превосходит допустимый уровень по тяжести возможных последствий (материальный, моральный и политический ущерб), вызывает полный ее отказ или приводит к срыву выполнения поставленной задачи;

взаимосвязь параметра с элементами, по которым в момент проведения анализа отсутствуют достоверные данные об их качестве и надежности в рассматриваемых условиях применения и возможных последствиях их отказов;

скорость развития негативных последствий отказа, исключая возможность принятия своевременных мер защиты от них и т. д.

Вопросы, связанные с определением структуры области работоспособности и границы области упреждения в пределах зоны допустимых значений параметра, характеризующей неудовлетворительный запас работоспособности и определяющей близость к отказу изделия, достаточно подробно рассмотрены в работе [2]. Решение данной задачи основано на теории нечетких множеств.

Для решения задачи прогнозирования предлагается применить комбинацию активно развивающихся подходов, а именно, метода моделирования рассуждений на основе прецедентов (CBR) [3], иммунной модели клональной селекции [4–7] и метода аппроксимации кубическими сплайнами [8]. Идея предлагаемого подхода заключается в построении прогнозных моделей и получении прогнозных оценок на основе трендовых зависимостей дрейфа параметров, используя данные значений параметров, сохраненные в виде прецедентов в интеллектуальной системе поддержки принятия решений (ИСППР) [9]. Выбор, адаптация и генерация прецедентов для решения текущей задачи прогнозирования осуществляется модифицированным алгоритмом клональной селекции, основанным на принципах работы иммунной системы [10–16]. Для получения трендовых зависимостей и расчета пропущенных значений временных рядов предлагается использовать метод аппроксимации экспериментальных данных (табл.) кубическими сплайнами.

Таблица

Табличная функция $f(t)$

t	t_0	t_1	...	t_n
$f(t)$	x_0	x_1	...	x_n

Кубический сплайн дефекта l с узлами, совпадающими с узлами табличной функции $f(t)$, описывается уравнением:

$$Spl(t) = \begin{cases} Spl_1(t) & t \in [t_0, t_1] \\ Spl_2(t) & t \in [t_1, t_2] \\ \dots \\ Spl_i(t) & t \in [t_{i-1}, t_i] \\ \dots \\ Spl_n(t) & t \in [t_{n-1}, t_n] \end{cases} \quad (1)$$

Кусочные функции сплайна представляют собой полиномы третьей степени:

$$Spl_i(t) = a_i + b_i \cdot (t - t_{i-1}) + c_i \cdot (t - t_{i-1})^2 + d_i \cdot (t - t_{i-1})^3, \quad (2)$$

где a_i, b_i, c_i, d_i — коэффициенты полиномов,

$I = 1, 2, \dots, n$ — номер кусочной функции сплайна.

Модифицированный иммунный алгоритм клональной селекции является составной частью искусственной иммунной системы (ИИС) прогнозирования дрейфа параметров бортовой аппаратуры. Концептуальная модель такой системы представлена на рис. 1.

На подготовительном этапе ИИС работает в режиме формирования начальной популяции клеток памяти Ab_M исполняющих роль прецедентов, представленных в формате для долговременного хранения. Клетка памяти представляет собой структурированный вектор генов (параметров), состоящий из двух частей. Структурную часть составляет выборка значений временного ряда и коэффициентов кусочной функции сплайна, расположенных в строго определенной последовательности. Регуляторная часть состоит из значения показателя относительного возраста P_v , определяющего порядковый номер появления Ab_M в ИИС, значения показателя применимости P_p , характеризующего число удачных применений Ab_M в алгоритме при поиске решения,

и сегмента генотипа (структурированной совокупности генов) F , представляющего собой буквенную постфиксную польскую запись математической формулы кусочной функции сплайна. Данные контрольных испытаний, данные и знания аналогичных ИИС, собранные в информационной системе предприятия-изготовителя PDM-системой (системой управления данными об изделии), поступают в ИСППР, кодируются в соответствии с ранее разработанным форматом и записываются в библиотеку клеток памяти (БКП). Когда мощность БКП достигнет требуемого значения, осуществляется переход на основной этап работы, использующий модифицированный иммунный алгоритм.

Следует заметить, что при разработке иммунного алгоритма клональной селекции не ставилась цель ограничиваться законами природы и в точности воспроизвести механизм функционирования иммунной системы живых организмов. Кроме того, в алгоритме применяются операции, которые не используются в биологических системах. На рис. 2 и 3 при-

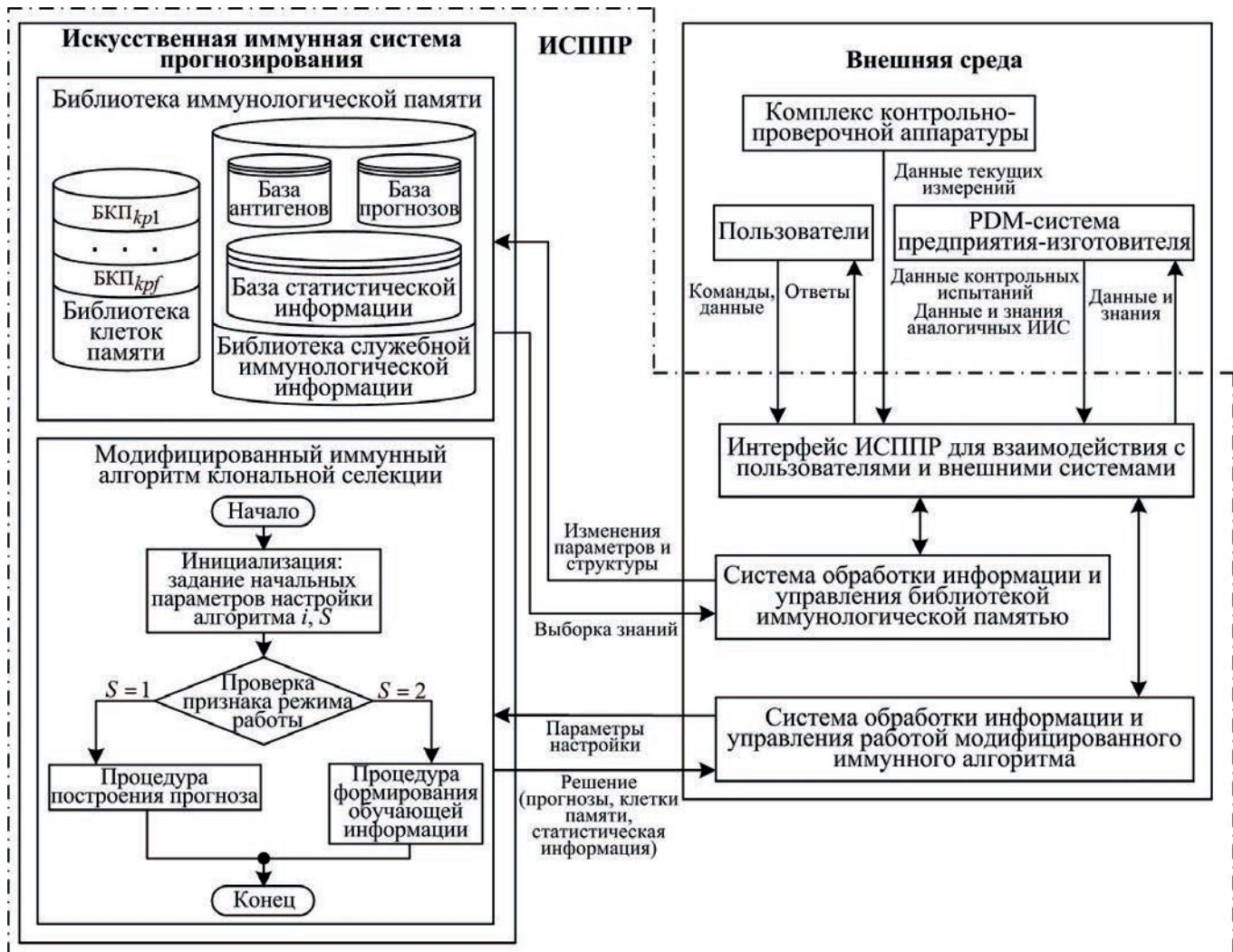


Рис. 1. Концептуальная модель ИИС

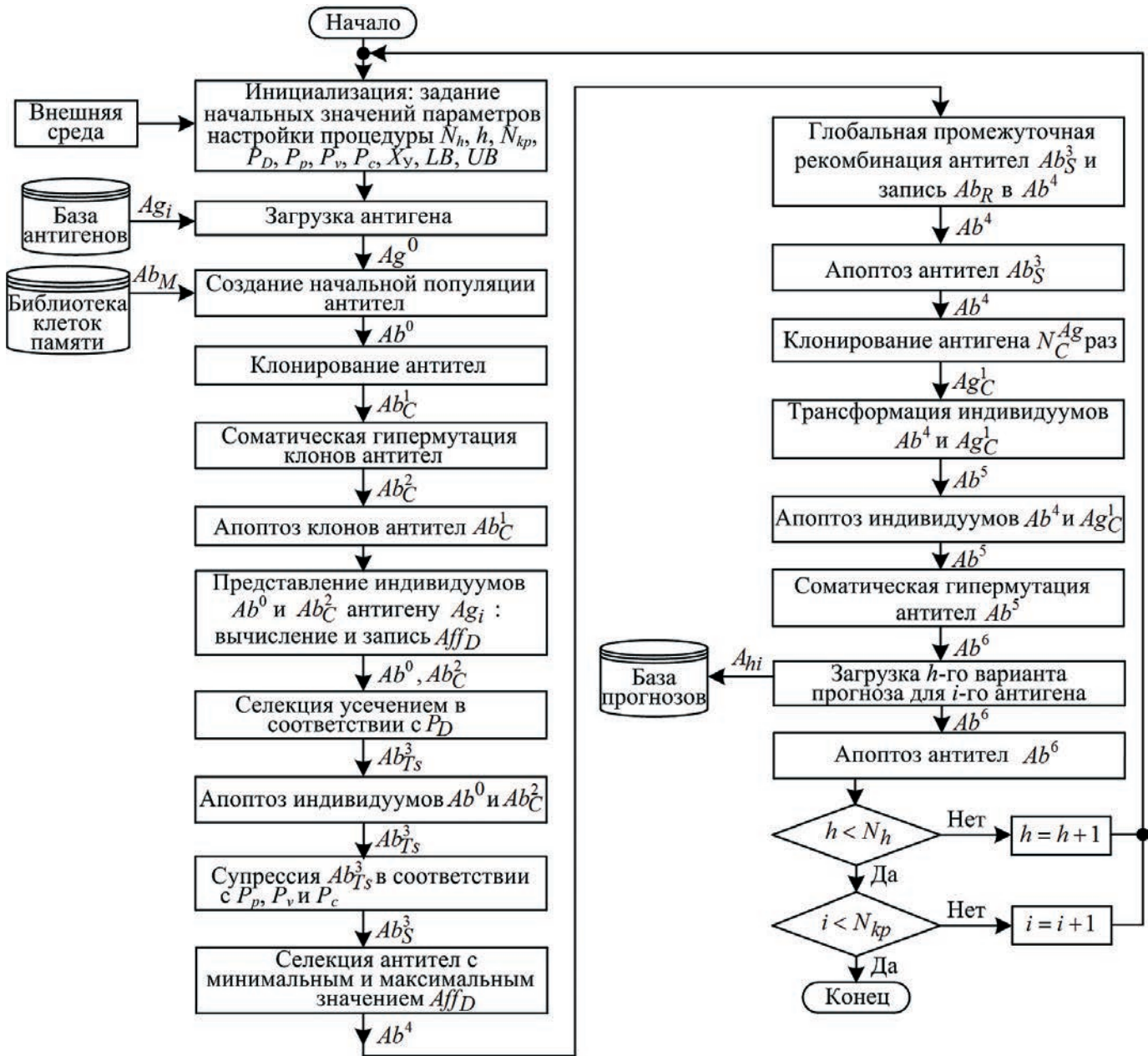


Рис. 2. Блок-схема процедуры построения прогноза

ведены блок-схемы выполнения процедур построения прогноза и формирования обучающей информации.

В режиме формирования антигена Ag производится кодирование средствами ИСППР данных текущих измерений в соответствии со структурой антигена. Антиген представляет собой вектор генов фиксированной длины с числовым кодированием временного ряда (значений параметров и времени их фиксации), характеризующих текущую ситуацию, на основе которой требуется построить прогноз. Эти данные поступают с комплекса контрольно-проверочной аппаратуры после проведения различных

контрольных испытаний и записываются в базу антигенов (БА) библиотеки иммунологической памяти (БИП).

Далее пошагово рассмотрим работу предлагаемого алгоритма в режиме построения прогноза с интерпретацией используемых биологических понятий в терминах предметной области.

Шаг 1. Задание начальных параметров настройки алгоритма.

Пользователь задает начальное значение номера критического параметра i и признак режима работы $S = 1$, соответствующий режиму «Процедура построения прогноза».

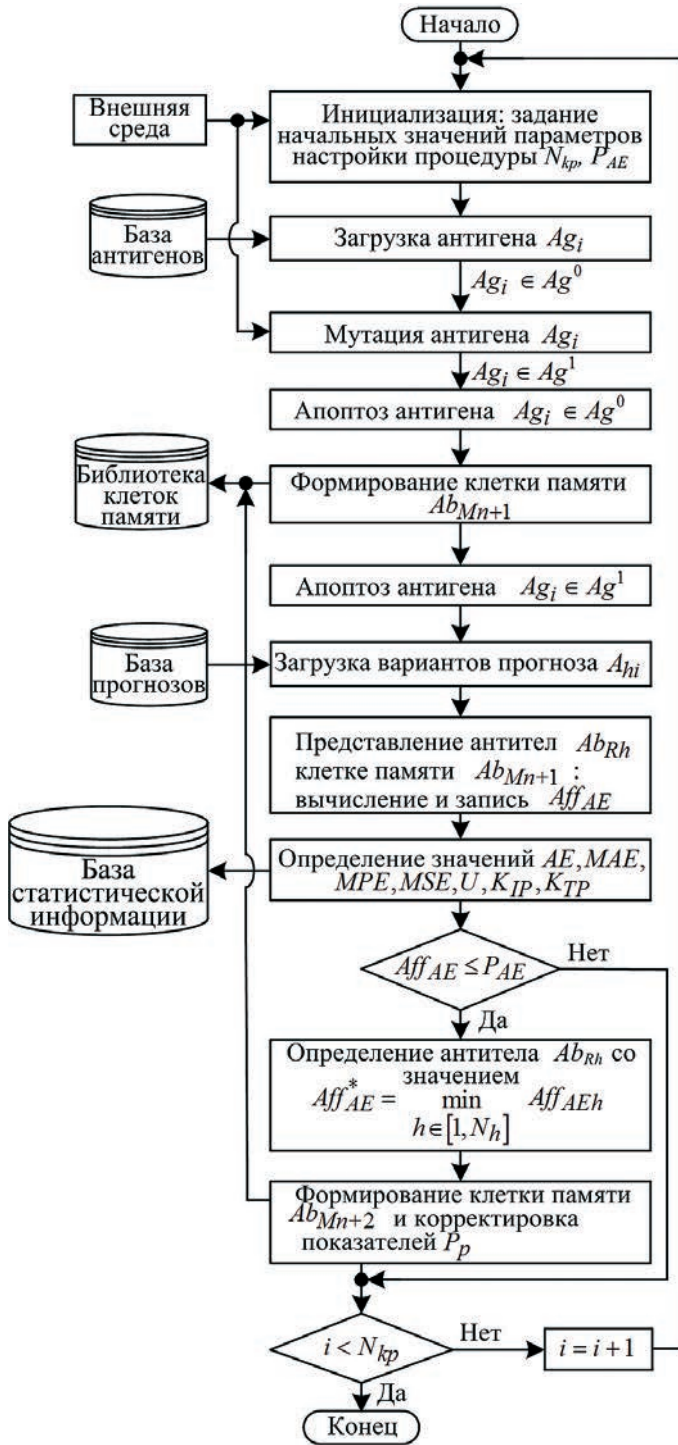


Рис. 3. Блок-схема процедуры формирования обучающей информации

Шаг 2. Проверка признака режима работы.

Производится проверка признака режима работы, и осуществляется переход к выполнению процедуры построения прогноза.

Шаг 3. Задание начальных значений параметров настройки процедуры.

Пользователь задает значения следующих параметров:

N_h — количество вариантов прогноза (альтернатив)
 $A_h = \{Ab_{Rh}, Ab_{minh}, Ab_{maxh}\}$, где $Ab_{Rh}, Ab_{minh}, Ab_{maxh}$ — антитела, содержащие значения t_p, t_p, t_o . Антитело Ab исполняет роль прецедента в терминологии СБР и отличается от клетки памяти форматом представления, ориентированным на удобство обработки операторами алгоритма для поиска решения. Антитело состоит из трех частей. Структура детекторной части совпадает со структурой антигена и позволяет численно оценить близость между антителом и антигеном. Решающая часть содержит домены (структурные участки индивидуума, состоящие из двух генов, определяющих значение параметра и время его фиксации), описывающие выборку известных значений временного ряда, значения коэффициентов кусочных функций сплайна, одно из значений t_p, t_p, t_o . Аллель (значение гена), соответствующая t_p, t_p или t_o , заполняется в генотипе в зависимости от результатов адаптации антитела. При этом два оставшихся гена остаются с пропущенными аллелями. Регуляторная часть содержит рассмотренные выше P_v, P_p и F , а также, значения аффинности, вычисленные на основе функции расстояния (Aff_D) и функции абсолютной ошибки прогноза (Aff_{AE});

h — начальное значение номера варианта прогноза;

N_{kp} — количество критических параметров;

P_D — пороговая аффинность связи $Ag - Ab$ и $Ag - Ab_c$, определяющая минимальную степень соответствия (метрическое расстояние) между антигеном Ag и антителом Ab (клоном (полной копией) антитела Ab_c), при которой Ab и Ab_c способны участвовать в формировании иммунного ответа;

P_p — показатель применяемости, характеризующий число удачных применений Ab_M при построении прогнозов;

P_v — показатель относительного возраста, определяющий порядковый номер появления Ab_M в иммунной системе;

P_c — порог сжатия популяции (конечного множества антител), определяющий максимальное количество антител в популяции и позволяющий регулировать устойчивость и точность решения;

X_v — параметр области упреждения;

LB — нижняя граница относительного возраста;

UB — верхняя граница относительного возраста.

Шаг 4. Загрузка антигена.

Производится загрузка из БА антигена Ag_i и формирование начальной популяции антигенов Ag^0 .

Шаг 5. Создание начальной популяции антител Ab^0 .

Для направленного формирования (зачатия) Ab^0 выполняется следующая последовательность действий:

1. Определяются клетки памяти Ab_M , удовлетворяющие критерию $LB \leq P_v \leq UB$.

2. Производится выбор из множества, сформированного на этапе 1, подходящих клеток памяти Ab_M таким образом, чтобы характер тенденции изменения времен-

ных рядов (возрастание или убывание) у клеток памяти и антигена совпадал, а их длина позволяла осуществлять прогнозирование для заданного значения X_p .

3. Восстанавливаются пропущенные домены в клетках памяти Ab_M , обеспечивающие комплементарность структуры детекторной части антитела и антигена, т.е. способность антигена и антитела к специфическому взаимодействию по принципу «ключ-замок». Пропущенные домены восстанавливаются на основе функциональных зависимостей, закодированных в каждой клетке памяти Ab_M .

4. Формируются детекторные части антител с валентностью (числом доменов, способных к взаимодействию с антигеном) равной числу доменов антигена.

5. Формируются решающие и регуляторные части антител. Следует заметить, что заложенные в структуру антитела гены t_p, t_p, t_o , позволяющие приобретать в процессе эволюции новые свойства, на данном этапе не заполняются, т.е. имеют пропущенные аллели.

Шаг 6. Клонирование антител.

Клонирование антител заключается в получение копий антител, содержащих идентичную генетическую информацию. Каждое антитело начальной популяции клонируется 1 раз, и создается популяция клонов антител Ab_C^1 для решения задачи расширения поискового пространства.

Шаг 7. Соматическая гипермутация клонов антител.

Соматическая гипермутация — это процесс преобразования генотипа индивидуума путем изменения аллелей переменных генов, удаления и вставки генных сегментов с целью увеличения их специфичности и аффинности к антигену. Оператор соматической гипермутации производит преобразования генотипов клонов антител популяции Ab_C^1 путем целенаправленного изменения аллелей переменных генов. Мутировавшие клоны формируют следующую популяцию Ab_C^2 . Изменениям подвергаются значения параметров x_i и a_i с целью смещения значений временного ряда и кусочных функций сплайна таким образом, чтобы значения параметров антигена и клонов антител в начальный момент времени t_0 совпадали. Для каждого клона антитела выполняется следующая последовательность действий:

1. Вычислить значение аффинности между антигеном Ag_i и клоном антитела Ab_{Cj} на основе функции расстояния между начальными значениями критического параметра по формуле:

$$Aff_{\Delta}(Ag_i, Ab_{Cj}) = ag_{i2} - ab_{Cj2}, \quad (3)$$

где ag_{i2} и ab_{Cj2} — значения i -го критического параметра x_0 в начальный момент времени t_0 для антигена Ag_i и j -го клона антитела Ab_{Cj} . Индекс «2» обозначает локус гена (номер позиции, указывающий размещение конкретного гена в генотипе индивидуума).

2. Преобразовать генотип, используя продукционную систему правил:

Правило 1: Если « $Aff_{\Delta} > 0$ », То «Увеличить значения всех параметров x_p, a_i на Aff_{Δ} и записать в генотип клона антитела популяции Ab_C^2 », Иначе «Выполнить Правило 2»;

Правило 2: Если « $Aff_{\Delta} < 0$ », То «Уменьшить значения всех параметров x_p, a_i на Aff_{Δ} и записать в генотип клона антитела популяции Ab_C^2 », Иначе «Преобразования не производить».

Шаг 8. Апоптоз клонов антител популяции Ab_C^1 .

Популяция Ab_C^1 уничтожается.

Шаг 9. Представление антител популяции Ab^0 и клонов антител популяции Ab_C^2 антигену Ag_i .

Производятся вычисления аффинностей между антителами популяции Ab^0 , клонами антител популяции Ab_C^2 и антигеном Ag_i на основе функции Aff_D :

$$Aff_D = Aff(Ag_i, Ab) = \frac{1}{1 + D(Ag_i, Ab)}, \quad (4)$$

где $D(Ag_i, Ab)$ — Евклидово расстояние между индивидуумом Ab из популяций Ab^0, Ab_C^2 и антигеном Ag_i .

$$D(Ag_i, Ab) = \sqrt{\sum_{j=1}^k (ag_{ij} - ab_j)^2}, \quad (5)$$

где ag_{ij}, ab_j — значения временного ряда в генотипе антигена и детекторной части индивидуума, k — длина выборки. Следует заметить, что значения функции Aff_D изменяются в интервале от 0 до 1. Наиболее подходящие для формирования иммунного ответа индивидуумы имеют большие значения Aff_D .

Вычисленное значение аффинности для каждого индивидуума заносится в его генотип.

Шаг 10. Селекция усечением в соответствии с P_D .

Оператор селекции усечением производит отбор антител популяции Ab^0 и клонов антител популяции Ab_C^2 в соответствии с критерием P_D и используя элитарную стратегию. Применение элитарной стратегии позволяет гарантировать попадание следующей промежуточной популяции (родительский пул) Ab_{Ts}^3 наиболее приспособленных индивидуумов из популяций родителей Ab^0 и потомков Ab_C^2 , не допуская потерю лучших решений. Пороговая аффинность P_D определяет минимальную аффинность антитела, позволяющую участвовать в формировании иммунного ответа. Если значение аффинности индивидуума $Aff_D > P_D$, то данный индивидуум получает разрешение на производство потомства, отбирается и записывается в следующую популяцию Ab_{Ts}^3 .

Шаг 11. Апоптоз индивидуумов популяций Ab^0 и Ab_C^2 .

Шаг 12. Супрессия популяции Ab_{Ts}^3 в соответствии с P_p, P_v, P_c .

Оператор супрессии удаляет антитела промежуточной популяции $Ab_{T_S}^3$, имеющие наименьшую аффинность, с целью устранения ее избыточности. Оставшиеся антитела образуют следующую популяцию Ab_S^3 . Процедура супрессии $Ab_{T_S}^3$ производится в следующем порядке:

1. Ранжируются антитела в порядке убывания значений аффинности Aff_D . Антитело с рангом равным 1 является самым приспособленным. В случае равенства значений Aff_D сравниваются показатели применимости P_p , характеризующие число удачных применений предков антител (клеток памяти Ab_M). Антитело, имеющее большее значение P_p , считается более приспособленным, и, соответственно, занимает в ранжированном списке более высокую позицию. В случае равенства значений P_p сравниваются показатели относительного возраста P_v , определяющие порядковый номер появления предков антител в иммунной системе. Антитело, имеющее большее значение P_v , является более приспособленным и получает более высокий ранг, дающий преимущество при отборе.

2. Удаляются антитела в соответствии с порогом сжатия популяции P_c , определяющего максимальное количество антител в популяции и позволяющего регулировать устойчивость и точность решения. Удалению подлежат антитела, у которых порядковый номер в ранжированном списке больше значения P_c .

Шаг 13. Селекция антител с минимальным и максимальным значением Aff_D .

Оператор селекции отбирает из популяции Ab_S^3 антитела с минимальным и максимальным значением Aff_D , которые переходят в следующую популяцию Ab^4 .

Шаг 14. Глобальная промежуточная рекомбинация антител Ab_S^3 и запись Ab_R в Ab^4 .

Рекомбинация представляет собой процесс перераспределения генетического материала между антителами, результатом которого является появление новых сочетаний генов и аллелей у антител-потомков, что позволяет наследовать все лучшие функциональные признаки родителей и повысить генетического разнообразие внутри популяции. Оператор рекомбинации позволяет сформировать рекомбинантное антитело Ab_R с использованием эволюционной стратегии глобальной промежуточной рекомбинации, по следующей схеме:

1. Формирование детекторной и регуляторной части антитела Ab_R .

1.1. Аллель каждого j -го гена ab_{Rj} из множества $\{x_0, \dots, x_n, P_v, P_p, Aff_D, Aff_{AE}\}$ определяется по формуле:

$$ab_{Rj} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k ab_{ji}, \quad (6)$$

где k — количество антител в популяции Ab_S^3 .

1.2. Сегмент гено типа F одинаков для всех антител и вносится в генотип Ab_R^4 без изменений.

2. Формирование решающей части.

2.1. Определяется последнее значение времени фиксации параметра во временном ряду t_{n+f} соответствующее антителу с самой короткой решающей частью.

2.2. Аллели t_{n+1}, \dots, t_{n+f} вносятся в порядке возрастания путем последовательного перебора всех антител популяции Ab_S^3 .

2.3. Аллели x_{n+1}, \dots, x_{n+f} определяются по формуле (6). В случае отсутствия в каком-нибудь генотипе антитела необходимой для вычисления аллели, то она определяется с помощью кусочной функции сплайна с коэффициентами, соответствующими требуемому временному интервалу.

2.4. Аллели, соответствующие коэффициентам кусочных функций сплайна, определяются путем аппроксимации кубическим сплайном набора аллелей, полученного на этапах 2.2 и 2.3.

Шаг 15. Апоптоз антител Ab_S^3 .

Шаг 16. Клонирование антигена N_C^{Ag} раз.

Оператор клонирования антигена популяции Ag^0 копирует $N_C^{Ag} = 3$ раз антиген Ag_i для формирования популяции Ag_C^1 .

Шаг 17. Трансформация индивидуумов Ab^4 и Ag_C^1 .

Оператор трансформации индивидуумов популяций Ab^4 и Ag_C^1 синтезирует антитела Ab_R^5, Ab_{min}^5 и Ab_{max}^5 в виде иммунных комплексов антиген-антитело и объединяет их в популяции Ab^5 . Иллюстративный пример работы оператора представлен на рис. 4.

Шаг 18. Апоптоз индивидуумов популяций Ab^4 и Ag_C^1 .

Шаг 19. Соматическая гипермутация антител Ab^4 .

Оператор соматической гипермутации производит преобразование генотипов антител Ab_R^5, Ab_{min}^5 и Ab_{max}^5 с образованием популяции Ab^6 . Изменениям подвергаются аллели генов x_i и a_i в решающей части антитела таким образом, чтобы значения параметров детекторной и решающей части антитела в момент времени t_n совпадали. Для каждого антитела выполняется следующая последовательность действий:

1. Определить аллель гена x_n^{RCH} для решающей части антитела в момент времени $t = t_n$ из формулы:

$$x_n^{RCH} = Spl_{n+1}(t) = a_{n+1} + b_{n+1} \cdot (t - t_n) + c_{n+1} \cdot (t - t_n)^2 + d_{n+1} \cdot (t - t_n)^3 = a_{n+1}. \quad (7)$$

. Вычислить значение смещения x_n^{RCH} относительно x_n детекторной части по формуле:

$$\Delta_x = x_n - x_n^{RCH} \quad (8)$$

3. Изменить аллели генов x_i и a_i в соответствии с продукционным правилом:

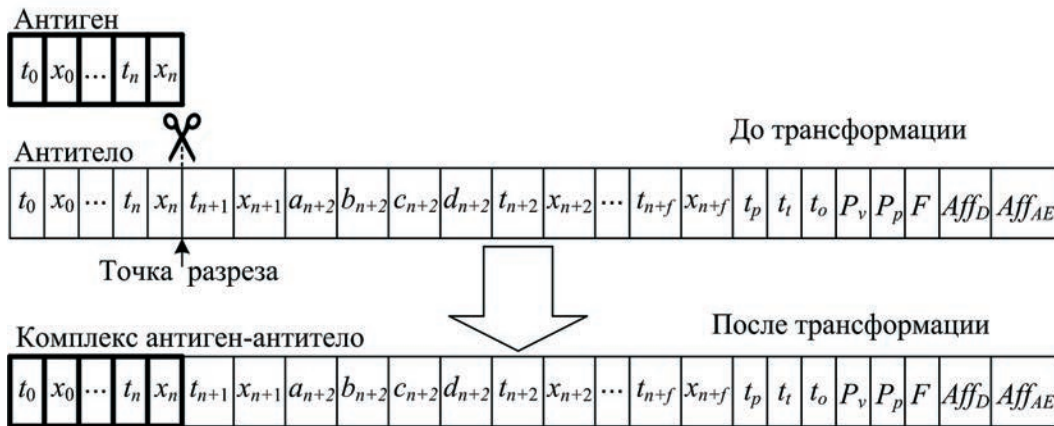


Рис. 4. Пример работы оператора трансформации

Правило 1: Если « $\Delta_x = 0$ », То «Изменения не производить», Иначе «Переход к Правилу 2»;

Правило 2: Если « $\Delta_x > 0$ », То «Увеличить аллели генов x_i и a_i на Δ_x », Иначе «Уменьшить аллели генов x_i и a_i на Δ_x ».

4. Вычислить на основе кусочных функций сплайнов, описывающих $Ab_R^5, Ab_{\min}^5, Ab_{\max}^5$, моменты времени t , при которых $x = X_{\#}$.

5. Вычислить t_p, t_o по формулам:

$$t_l = t_R - t_n, \quad (9)$$

$$t_p = t_{\min} - t_n, \quad (10)$$

$$t_o = t_{\max} - t_n, \quad (11)$$

где t_{\max}, t_{\min}, t_R — максимальное, минимальное и промежуточное между максимальным и минимальным значение t .

6. Записать в генотипы $Ab_R^5, Ab_{\min}^5, Ab_{\max}^5$ все измененные аллели генов.

Шаг 20. Загрузка h -го варианта прогноза для i -го антигена.

Производится загрузка полученного варианта прогноза A_{hi} в базу прогнозов (БП).

Шаг 21. Апоптоз антител популяции Ab^6 .

Шаг 22. Проверка выполнения условия $h < N_h$.

Проверяется условие окончания процедуры построения прогноза для i -го критического параметра в соответствии с количеством вариантов прогноза N_h . Если номер варианта прогноза h меньше N_h , то h увеличивается на единицу и происходит переход к шагу 1. В противном случае осуществляется переход к шагу 23.

Шаг 23. Проверка выполнения условия $i < N_{kp}$.

Проверка условия окончания процедуры построения прогноза осуществляется в соответствии с количеством критических параметров N_{kp} . Если номер критического

параметра i меньше N_{kp} , то i увеличивается на единицу и происходит переход к шагу 1. В противном случае, означающем обработку всех антигенов, работа процедуры построения прогноза завершается.

Далее рассмотрим работу иммунного алгоритма в режиме «Процедура формирования обучающей информации». Этот режим применяется после получения из эксплуатирующих организаций фактических значений прогнозируемых величин.

Шаг 1. Задание начальных параметров настройки алгоритма.

Пользователь задает начальное значение номера критического параметра i и признак режима работы $S=2$, соответствующий режиму «Процедура формирования обучающей информации».

Шаг 2. Проверка признака режима работы.

Производится проверка признака режима работы, и осуществляется переход к выполнению процедуры формирования обучающей информации.

Шаг 3. Задание начальных значений параметров настройки процедуры.

Пользователь задает значения следующих параметров: N_{kp} и P_{AE}, P_{AE} представляет собой пороговую аффинность связи $Ab_M - Ab$, определяющую минимальную степень соответствия между клеткой памяти Ab_M и антителом Ab , при которой Ab способно участвовать в формировании новой клетки памяти.

Шаг 4. Загрузка антигена Ag_i популяции Ag^0 .

Осуществляется загрузка антигена Ag_i из БА.

Шаг 5. Мутация антигена Ag_i .

Оператор мутации увеличивает размер генотипа Ag_i за счет записи поступивших фактических значений прогнозируемого временного ряда, которые вводятся пользователем ИСППР, с образованием следующей популяции Ag^1 .

Шаг 6. Апоптоз антигена Ag_i популяции Ag^0 .

Шаг 7. Формирование клетки памяти Ab_{Mn+1} .

Происходит формирование клетки памяти Ab_{Mn+1} из данного антигена и ее запись в библиотеку клеток памяти (БКП) с образованием следующей популяции клеток памяти Ab_M^1 .

Шаг 8. Апоптоз антигена Ag_i популяции Ag^1 .

Шаг 9. Загрузка вариантов прогноза A_{hi} .

Осуществляется загрузка вариантов прогноза A_{hi} из БП.

Шаг 10. Представление антител Ab_{Rh} из вариантов прогноза A_{hi} клетке памяти Ab_{Mn+1} : вычисление и запись Aff_{AE} .

Оператор представления антитела Ab_{Rh} клетке памяти Ab_{Mn+1} производит вычисление аффинности между ними на основе функции Aff_{AE} :

$$Aff_{AE} = Aff(Ab_{Mn+1}, Ab_{Rh}) = \frac{1}{1 + D(Ab_{Mn+1}, Ab_{Rh})}, \quad (12)$$

где $D(Ab_{Mn+1}, Ab_{Rh})$ — абсолютная ошибка прогноза.

$$D(Ab_{Mn+1}, Ab_{Rh}) = |t^f - t_i|, \quad (13)$$

где t^f — фактическое значение прогнозируемой переменной, t_i — прогнозное значение переменной. Вычисленное значение аффинности заносится в генотип Ab_{Rh} .

Шаг 11. Определение значений AE , MAE , MPE , MSE , U , K_{IP} , K_{TP} .

Производится вычисление значений совокупности показателей качества прогнозирования, позволяющей получить более полную информацию о прогнозных свойствах моделей и сравнивать точности прогнозов, как по различным моделям, так и для критических параметров, имеющих разный масштаб измерений:

1. AE (*absolute error*) — абсолютная ошибка:

$$AE = |t^f - t_i|, \quad (14)$$

2. MAE (*mean absolute error*) — средняя абсолютная ошибка:

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i^f - y_i|, \quad (15)$$

где y_i^f — фактическое значение параметра x_i^f (при оценке качества модели) или t_i^f (при оценке качества метода), y_i — теоретическое значение параметра x_i или t_i , рассчитанное по модели, n — число уровней временного ряда.

2. MPE (*mean percentage error*) — средняя процентная ошибка:

$$MPE = \frac{100\%}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{y_i^f - y_i}{y_i}. \quad (16)$$

3. MSE (*mean squared error*) — среднеквадратическая ошибка:

$$MSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i^f - y_i)^2. \quad (17)$$

4. U — коэффициент несовпадения Тейла:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^f - y_i)^2}{n}}}{\sqrt{\frac{y_i^{f2}}{n} + \frac{y_i^2}{n}}}. \quad (18)$$

5. K_{IP} — коэффициент качества интервального прогноза:

$$K_{IP} = \frac{C_{IP}}{C_{IP} + H_{IP}}, \quad (19)$$

где C_{IP} — число подтвержденных ($t_p \leq t^f \leq t_o$) интервальных прогнозов, H_{IP} — число неподтвержденных ($t_p > t^f$ или $t^f > t_o$) интервальных прогнозов.

6. K_{TP} — коэффициент качества точечного прогноза:

$$K_{TP} = \frac{C_{TP}}{C_{TP} + H_{TP}}, \quad (20)$$

где C_{TP} — число подтвержденных ($AE \leq \Delta_{AE}$) точечных прогнозов, H_{TP} — число неподтвержденных ($AE > \Delta_{AE}$) точечных прогнозов.

Вычисленные значения показателей заносятся в базу статистической информации, где формируется статистическая отчетность по результатам процесса прогнозирования. Данная информация используется для анализа пользователями и последующей корректировки ИИС прогнозирования, в случае необходимости, с целью улучшения качества прогнозных оценок. Анализ показателей заключается в выделении наиболее типичных ошибок прогнозирования (высокая степень смещенности прогноза относительно фактических значений, заниженный или завышенный прогноз, малая степень схожести временных рядов, значимые отклонения в течение рассматриваемого периода и т.д.) и рассмотрении всего комплекса факторов F , влияющих на качество прогноза:

$$F = \langle F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 \rangle,$$

где F_1 — факторы, влияющие на ошибки исходной информации (погрешности при ее получении и обработке, качество выборки); F_2 — факторы, влияющие на ошибки метода прогнозирования (упрощения и несовершенства теоретических построений, неадекватность моделей прогнозируемым процессам); F_3 — факторы, влияющие на ошибки вычислительных процедур; F_4 — человеческий фактор; F_5 — факторы, связанные с возможностью появления непредсказуемых изменений в объекте и приводящие к нерегулярной составляющей ошибки.

Шаг 12. Проверка выполнения условия $Aff_{AE} \leq P_{AE}$.

Определяются антитела Ab_{Rh} всех вариантов прогноза, способные участвовать в формировании новой клетки

памяти. Если условие выполняется, то осуществляется переход к шагу 13. В противном случае переходим к шагу 15.

Шаг 13. Определение антитела Ab_{Rh} со значением аффинности

$$Aff_{AE}^* = \min_{h \in [1, N_h]} Aff_{AEh}.$$

Шаг 14. Формирование клетки памяти и корректировка показателей P_p .

Происходит формирование клетки памяти Ab_{Mn+2} из антитела со значением аффинности Aff_{AE}^* и ее запись в БКП с образованием следующей популяции клеток памяти Ab_M^2 . Коррекция (увеличение на единицу) значений показателей применимости P_p осуществляется у тех клеток памяти, чьи потомки участвовали в глобальной промежуточной рекомбинации при формировании клетки памяти Ab_{Mn+2} .

Шаг 15. Проверка выполнения условия $i < N_{kp}$.

Проверка условия окончания процедуры формирования обучающей информации осуществляется в соответствии с количеством критических параметров N_{kp} . Если номер критического параметра i меньше N_{kp} , то i увеличивается на единицу и происходит переход к шагу 1. В противном случае, означающем обработку всех антигенов, работа процедуры завершается. Таким образом, процедура позволяет создать одну или две клетки памяти, в зависимости от качества прогноза.

Следует добавить, что удаление из БИП обработанных антигенов и прогнозов, адаптация параметров, структуры и алгоритма функционирования ИИС осуществляется пользователем в режиме корректировки.

Заключение

В данной работе рассмотрен гибридный подход к решению задачи прогнозирования временного дрейфа критических параметров БАСУ ЛА, который характеризуется значительной неопределенностью и неполнотой информации для его моделирования традиционными методами. Основные особенности и новизна предлагаемого подхода заключаются в следующем:

впервые применена стратегия построения прогноза на основе комбинации следующих способов представления и обработки данных и знаний: метода правдоподобных рассуждений на основе прецедентов, иммунного алгоритма клональной селекции и метода аппроксимации кубическими сплайнами;

использован ряд идей и принципов альтернативных концепций эволюции, а также, эвристические приемы из различных областей знаний, взаимно дополняющие друг друга;

применена оригинальная стратегия построения прогноза, использующая направленный способ формирования начальной популяции антител и их соматической

гипермутации, несколько видов аффинности связи между индивидуумами, операцию трансформации, глобальной промежуточной рекомбинации и супрессии на основе трех критериев;

осуществлена возможность получения прогноза (вариантов прогноза), состоящего из двух частей: точечного и интервального;

объем БКП и размеры клеток памяти оказывают существенное влияние на горизонт и качество прогнозирования.

Предлагаемый подход является весьма перспективным направлением для реализации в прикладных приложениях ИСППР для контроля состояния сложных технических объектов. Его применение дает возможность повысить эксплуатационную надежность и эффективность процесса эксплуатации изделия и создает предпосылки для организации технического обслуживания по фактическому состоянию.

Литература

1. Федин С. С., Красюк К. А., Трищ П. М. Марковская модель прогнозирования параметрической надежности измерительно-вычислительных комплексов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2009. Т. 2. № 6. С. 22–26.
2. Смирнов В. А. Приемочный контроль бортовых систем управления с использованием средств интеллектуального анализа данных // Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 11. С. 99–103.
3. Смирнов В. А. Прецедентный подход к построению моделей процесса поиска неисправностей при диагностировании сложных технических систем // Телекоммуникации и транспорт. 2013. № 6. С. 73–78.
4. Кораблев Н. М., Иващенко Г. С. Гибридный метод краткосрочного прогнозирования временных рядов на основе модели клонального отбора // Нейроинформатика: научно-техническая конференция с международным участием: сборник научных трудов. 2014. Т. 1. С. 79–89.
5. Антух А. Э., Карпенко А. П. Глобальная оптимизация на основе гибридизации методов роя частиц, эволюции разума и клональной селекции // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». 2012. С. 379–416. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/431723.html> (дата обращения: 20.09.2017).
6. Castro L. N., Zuben F. J. V. The Clonal Selection Algorithm with Engineering Applications // Genetic and Evolutionary Computation: Intern. Conf., July 9–13 2002: proceedings. New York. 2002. Pp. 36–37.
7. Castro L. N. D., Zuben F. J. V. Learning and optimization using the clonal selection principle // IEEE Trans. Evol. Comput. 2002. Vol. 6. Pp. 239–251.
8. Квасов Б. И. Методы изометрической аппроксимации сплайнами. М.: Физматлит, 2006. 360 с.

9. *Смирнов В.А., Смирнов Д.В.* Разработка концептуальной модели системы поддержки принятия решений для приемочного контроля бортовой аппаратуры // Вестник СибГАУ. 2017. Т. 18. №. 1. С. 149–159.

10. *Частикова В.А., Картамышев Д.А.* Искусственные иммунные системы: основные подходы и особенности их реализации // Научные труды КубГТУ. 2016. № 8. С. 193–208.

11. *Aickelin U., Dasgupta D.* Artificial Immune Systems // Search Methodologies. 2005. Pp. 375–399.

12. *Dasgupta D.* Advances in Artificial Immune Systems // IEEE Computational Intelligence Magazine. 2006. No. 11. Pp. 40–49.

13. *Dasgupta D., Yu S., Nino F.* Recent Advanced in Artificial Immune Systems: Models and Applications // Applied Soft Computing. Elsevier. 2011. Pp. 1574–1587.

14. *Castro L.N.D.* Artificial Immune Systems: A Novel Paradigm to Pattern Recognition // Soft Computing. 2002. Pp. 67–84.

15. *Zekri M., Souici-Meslati L.* Artificial Immune System for Intrusion Detection // Evolutionary Computation. 2011. Vol. 13. No. 2. Pp. 145–153.

16. *Kephart J.O.* A biologically inspired immune system for computer // Artificial Life: Intern. Conf., July 6–8. 1994. Pp. 143–168.

APPROACH TO PREDICTING THE DRIFT OF CRITICAL PARAMETERS OF AN ONBOARD CONTROL SYSTEM ON THE BASIS OF THE MODIFIED IMMUNE ALGORITHM

VLADIMIR. A. SMIRNOV,

St-Peterburg, Russia, vlad.sm2010@yandex.ru

DMITRIJ. V. SMIRNOV,

St-Peterburg, Russia, Smit-90@inbox.ru

KEYWORDS: prognostication; precedent; spline approximation; antigen; antibody; affinity.

ABSTRACT

The issues of technological design of control systems for complex technical objects of one-time use are considered. The subject of the study is a hybrid approach to forecasting time series based on an artificial immune system used to solve the problem of predicting the time drift of critical parameters of on-board equipment, which is characterized by considerable uncertainty and incompleteness of information for its modeling by traditional methods. The aim of the work is the development of a hybrid approach to forecasting the time drift of the controlled parameters of an onboard automated control system based on the integrated use of the tools of the theory of artificial intelligence and the approximation spline, which makes it possible to obtain approximate estimates with a reasonable for practical applications accuracy. The study used the following theories and methods: system analysis, numerical analysis, technical control and diagnostics, artificial intelligence (reasoning based on

precedents, artificial immune systems, evolutionary computation, fuzzy sets), decision making, design of intelligent information systems. Specificity of time series and scope is determined. A modified immune algorithm for clonal selection and a step-by-step description of its work with the interpretation of the biological concepts used in terms of the subject domain are proposed. The main differences of the proposed algorithm from known evolutionary algorithms are the method of representing immune objects, the mechanisms of adaptation of the immune system, the set, content and order of execution of immune operators, in which a number of ideas and principles of various alternative concepts of evolution are used, as well as heuristic techniques from various fields of knowledge. Theoretical results that can be used in the development of applied applications of intelligent decision support systems for monitoring the state of complex technical objects at rocket and space industry enterprises are obtained. The application of the proposed approach makes it

possible to increase the operational reliability and efficiency of the operation of the product and creates the prerequisites for the organization of maintenance on the actual state.

REFERENCES

1. Fedin S.S., Krasnyuk K.A., Trishch R.M. Markovskaya model' prognozirovaniya parametricheskoy nadezhnosti izmeritel'no-vychislitel'nykh kompleksov [Markov model predicting the parametric reliability of measuring and computing systems] *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern European Journal of advanced technology]. 2009. Vol. 2. No. 6. Pp. 22-26. (In Russian)
2. Smirnov V.A. Acceptance inspection of onboard control systems with the use of data mining. *T-Comm*. 2014. Vol. 8. No. 11. Pp. 99-103. (In Russian)
3. Smirnov V.A. Precedential approach to model building process troubleshooting for diagnosing complex technical systems. *T-Comm*. 2013. No. 6. Pp. 73-78. (In Russian.)
4. Korablev N.M., Ivashchenko G.S. Gibridnyy metod kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov na osnove modeli klonal'nogo otbora [A hybrid method of short-term time series forecasting based on the model of clonal selection] *Neyroinformatika: nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: sbornik nauchnykh trudov* [Neuroinformatics: scientific-technical conference with international participation: collection of scientific works, Moscow, 2014]. 2014. Vol. 1. Pp. 79-89. (In Russian)
5. Antukh A.E., Karpenko A.P. Global optimization based on hybridization methods swarm of particles, the evolution of the mind and clonal selection. *Elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie "Nauka i obrazovanie"*. [Electronic scientific and technical publication «Science and Education»]. 2012. Pp. 379-416. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/431723.html> (date of access 20.09.2017). (In Russian)
6. Castro L.N., Zuben F.J.V. The Clonal Selection Algorithm with Engineering Applications. *Genetic and Evolutionary Computation: Intern. Conf., July 9-13 2002: proceedings*. New York. 2002. Pp. 36-37.
7. Castro L.N.D., Zuben F.J.V. Learning and optimization using the clonal selection principle. *IEEE Trans. Evolut. Comput.* 2002. Vol. 6. Pp. 239-251.
8. Kvasov B.I. *Metody izogeometricheskoy approksimatsii splaynami* [Methods of iso-geometric approximation by splines]. Moscow: Fizmatlit, 2006. 360 p. (In Russian)
9. Smirnov V.A., Smirnov D.V. Development of a conceptual model of the system of decision support for acceptance control of onboard equipment. *Vestnik SibSAU*. 2017. Vol. 18. No. 1. Pp. 149-159. (In Russian)
10. Chastikova V.A., Kartamyshev D.A. Artificial immune system: basic approaches and feature of their realization. *Scientific works of KubSTU*. 2016. No. 8. Pp. 193-208. (In Russian)
11. Aickelin U., Dasgupta D. Artificial Immune Systems. *Search Methodologies*. 2005. Pp. 375-399.
12. Dasgupta D. Advances in Artificial Immune Systems. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2006. No. 11. Pp. 40-49.
13. Dasgupta D., Yu S., Nino F. Recent Advanced in Artificial Immune Systems: Models and Applications. *Applied Soft Computing*. Elsevier. 2011. Pp. 1574-1587.
14. Castro L.N.D. Artificial Immune Systems: A Novel Paradigm to Pattern Recognition. *Soft Computing*. 2002. Pp. 67-84.
15. Zekri M., Souici-Meslati L. Artificial Immune System for Intrusion Detection. *Evolutionary Computation*. 2011. Vol. 13. No. 2. Pp. 145-153.
16. Kephart J.O. A biologically inspired immune system for computer. *Artificial Life: Intern. Conf.* July 6-8. 1994. Pp. 143-168.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Smirnov V.A., PhD, Leading Engineer-Electronic, group leader future projects of new technology department closed joint stock company "Scientific-production center "Akvamarin".
Smirnov D.V., engineer-electronic engineer 2 category of new technology Department closed joint stock company "Scientific-production center "Akvamarin".

For citation: Smirnov V.A., Smirnov D.V. Approach to predicting the drift of critical parameters of an onboard control system on the basis of the modified immune algorithm. *H&ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 1. Pp. 69-81. doi 10.24411/2409-5419-2018-10021 (In Russian)

doi 10.24411/2409-5419-2018-10022

Methods of risk assessment and forecasting of their consequences changes in the composition of activities of the Federal space program of Russia for 2016 and 2025, part of the space systems and complexes of double and socio-economic purposes

VASILEVSKY

Anatoly Vyacheslavovich¹

VELIKOIVANENKO²

Vladimir Ilyich

BANDITS

Vasily Nilovich³

TURINA

Darya Dmitrievna⁴

Information about authors:

¹PhD, Deputy head of the scientific-technical center No. 4 Federal state unitary enterprise "Central scientific research engineering Institute", Korolev, Russia, VasilevskiyAV@tsniimash.ru

²PhD, Professor, chief researcher of scientific-technical center No. 4 Federal state unitary enterprise "Central scientific research engineering Institute", Korolev, Russia, VelikoivanenkoVI@tsniimash.ru

³Lead engineer, 1112, Federal state unitary enterprise "Central scientific research engineering Institute", Korolev, Russia, ZhiganovVN@tsniimash.ru

⁴Deputy head of Department scientific and technical center No. 4 Federal state unitary enterprise "Central scientific research engineering Institute", Korolev, Russia, TyurinaDD@tsniimash.ru

ABSTRACT

In article the solution of a problem of an assessment of risks, forecasting of their consequences at creation of perspective space systems and complexes of dual and social and economic purpose within realization of actions of the Federal space program of Russia on 2016 2025 is submitted. Ways and methods of practical realization of this task are considered.

The task of the organization of process of identification of risks which has to consider the main problems which are characterizing current state of space-rocket branch and having impact as on performance of separate actions, and the Federal space program of Russia for 2016-2025 in general is in details considered.

In article the place of process of management of risks in the general structure of processes regarding information and analytical providing with management of implementation of the Federal space program of Russia for 2016-2025 is defined. The purpose of process of management of risks and the basic principles of its implementation are formulated.

The procedure of monitoring of risks providing as control of level of risks of actions, projects and the Federal space program for 2016-2025 in general, and control of plans of realization of actions for decrease in inadmissible levels of risks is stated.

The procedure of decision-making by results of an assessment of risks which is carried out by officials of State corporation on space activity "Roskosmos" and providing depending on the level of risks, implementation of the plans of measures on decrease in their level and minimization of possible damage is developed.

On the basis of an example of an assessment of risks of realization of ROC "Meteor-3M" practical recommendations about application of a complex technique of an assessment of risks and forecasting of their consequences at change of structure of actions of the Federal space program of Russia for 2016-2025 regarding space systems and complexes of dual and social and economic purpose are developed.

KEYWORDS: multi-criteria methods; evaluation and types of risks; risk event; the performance characteristics of rocket and space technology.

For citation: Vasilevsky A. V., Velikoivanenko V. I., Bandits V. N., Turina D. D. Methods of risk assessment and forecasting of their consequences changes in the composition of activities of the Federal space program of Russia for 2016 and 2025, part of the space systems and complexes of double and socio-economic purposes. *H&ES Research*. 2017. Vol. 10. No. 1. Pp. 82-99. doi 10.24411/2409-5419-2018-10022

General provisions

This methodology is a tool for the formation of risk-oriented thinking based on a systemic, process-active and continuous risk management in space activities [1–10].

To assess the magnitudes of risk events and ensure the management of risk, we first need to identify them, which should take into account the main problems characterizing the current state of the space industry and which have a significant impact on the performance of individual activities "of the Federal space program of Russia for 2016–2025" (FSP-2025) and the Program in General (hereinafter — the Program).

Risk assessment and forecasting of their consequences — the most important procedure of the risk management process, which is characterized by complexity and considerable complexity. Its main features are:

- focus on the use of information and analytical maintenance of the management Programme, taking into account different development scenarios;

- the use of multilevel additive-multiplicative model of risk assessment (phase, component, event, Program, project, and Program in General). In this case, the levels of the stage, project and overall Program aggregate assessment of the risk group determined by the additive, and the levels of part and event Programs, the final risk rating is calculated using the multiplicative convolution;

- the use of a common list of risks approved by the state Corporation "Roscosmos", which provides methodological unity of risk management at stages of formation and implementation of the Program;

- application of the methodological approach of expert assessment of risks implementation stages;

- the use of the indicator "risk of risk" as a quantitative measure of risk of implementation phases, components, activities, project and Program as a whole;

- the validity of the scale of damage from the risk occurrence on the basis of the recommendations of normative documents for the development and implementation of state programmes of the Russian Federation;

- use approved by the state Corporation "Roscosmos" graded scale assessment of the risks of implementation phases, components, activities FSP-2025, projects and Programs in General for making effective management decisions to reduce the level of risk, taking into account possible consequences and resource provision.

The procedure for adopting decisions on the results of the risk assessment Programme is carried out by appropriate officials of the state Corporation "Roscosmos" and provides, depending on the level of risk:

- the risk-taking of the implementation of the Programme activities, projects and Programs generally;

- the conditional risk — taking of the implementation of the Program, projects and the Program as a whole with the development of action plans to minimize them;

- the failure risks of the implementation of the Program, projects, Programs in General, and their early termination;

- the failure risks of the implementation of the Program, projects, Programs in General, further work on implementation and development of action plans to reduce risks.

The procedure of risk monitoring provides monitoring of level of risks of the Program activities, projects and Programmes in General and the control of implementation plans of measures to reduce unacceptable levels of risk.

This technique is developed to account for the risk events in the composition of the method of calculation of efficiency of risk management during the implementation phase of the Program and is intended for customers and companies-developers of space systems (complexes) in the justification of the adjustment measures, stages, projects under the Program. There are objective contradictions of space projects (programs) by criterion "efficiency-cost". Evolution in technology with the use of this criterion is shown in fig. 1.

The purpose of risk management is to ensure the identification, assessment and reduction of threats of failure of the Program because of the possibility of breakdown of orders, time by the developers of space rocket technology (MSE) due to wear and tear of production assets, the existing gap in technological development, the loss of several key technologies, of ties, and loss of personnel skills, etc.

The main objectives of this technique are:

- adequate identification of negative factors of external and internal threats, challenges, having a negative impact on the effectiveness of Programme implementation (cost, timing, values of target indicators and indicators);

- risk assessment of implementation phases, components, Program activities, projects and Programs as a whole to identify the most dangerous of them;

- timely scientific and technical, technological, organizational, personnel and other measures to reduce unacceptable levels of risk;

- ensuring effective monitoring of risks and implementation of action plans to reduce unacceptable levels of risk;

- implementation of process approach in activity of participants of risk management;

- providing the possibility of creating effective and efficient risk management system that meets the organizational structure and scope of activities of the state Corporation "Roscosmos" on the management of the implementation of the Program in terms of its information and analytical support.

Methodology of system design and program planning of the creation of the advanced space systems and complexes in the General case defines the following basic methodical risk management procedure (figure 2):

- identification of risks;

- risk assessment;

- the decision on the results of the risk assessment;

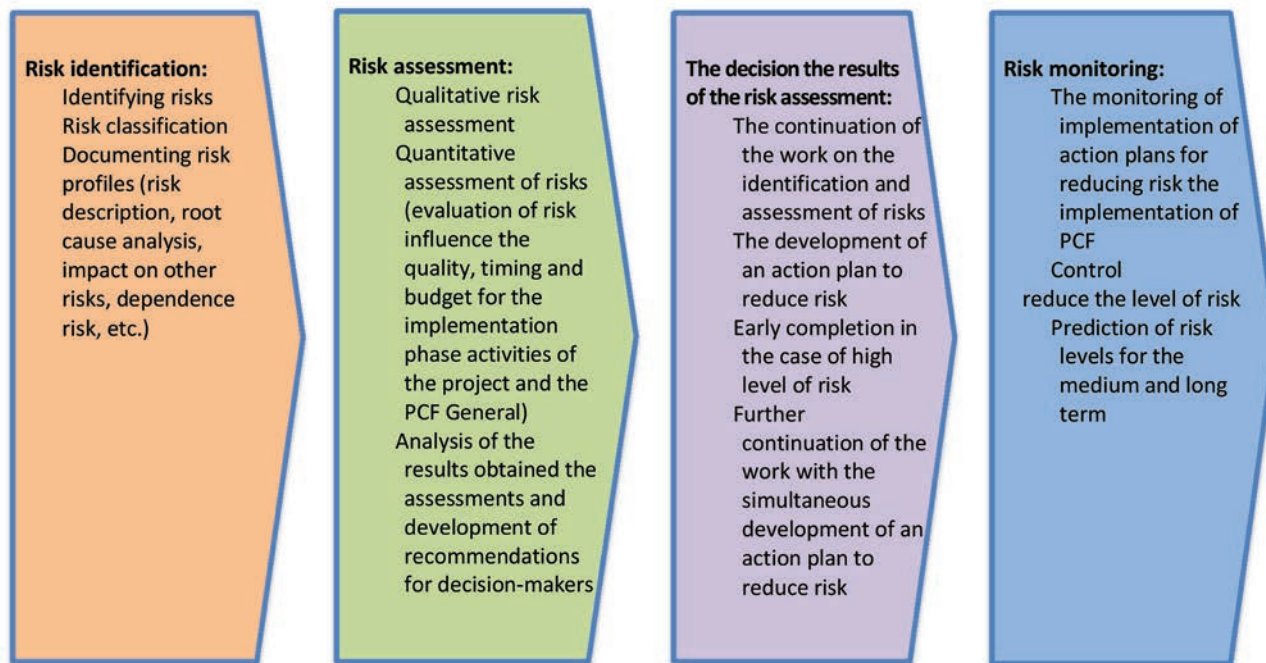


Fig. 1. Evolution in equipment

— monitoring of risks.

The classification of the main types of risks in their areas of possible occurrence (species risk) are presented in table 1. These include:

- international-legal risks;
- economic risks;
- environmental risks;
- scientific, technical and technological risks;
- human risks.

Identified and classified risks associated with the implementation of the Program activities and the Program as a whole are presented in table 1. These types of risk and associated risk events may be corrected and adjusted in coordination with the Customer and the main developers of the Program established procedures.

The classification of the main types of risks in their areas of possible occurrence (species risk) are presented in table 1. These include:

- international-legal risks;
- economic risks;
- environmental risks;
- scientific, technical and technological risks;
- human risks.

Identified and classified risks associated with the implementation of the Program activities and the Program as a whole are presented in table 1. These types of risk and associated risk events may be corrected and adjusted in coordination

with the Customer and the main developers of the Program established procedures.

Documenting risks is establishing and maintaining for each event a risk register that includes the following main fields:

- type of risk;
- risk event;
- risk ID;
- risk factor;
- the root cause;
- negative effects of a risk;
- the impact of other risks;
- dependency on other risks;
- date and time of last updating of a risk register;
- control procedures;
- assessment of the effectiveness of control procedures.

The risk ID provides an unambiguous identification of each risk event.

For each risk event identify a range of risk factors, the effects of which can lead to the risk event.

For each risk factor is analyzed and determined the root cause behind it.

Each group of "risk event and a risk factor" are formulated and described the adverse effects of a risk.

Analyzes and identifies any associated risk events (affecting other risks and dependent on other risk types).

Updating of the register of risk management with the required frequency.

Table 1

Risks of implementation of the Program and the Program in General

Type of risk	Risk event
International legal risks	1. The imposition of sanctions and bans on the sale of Russian instruments and elements of electronic component base
	2. The imposition of sanctions and bans on loans Russian Federation
	3. Sanctions and prohibitions on the possibility of implementing NASA's procurement of space technology and services in the Russian Federation to the international space station
	4. The imposition of sanctions and restrictions on data retrieval with foreign SV remote sensing
	5. The introduction of quotas for the SV launches of Russian launch vehicles
	6. The change in legislation related to space activities
	7. Error legal norms in the field of space activities
	8. Refusal or change of terms of delivery of the requested resource, because of imperfection of the legal system
Economic risks	1. The change in the volume of funds allocated for the Program
	2. The depreciation of the Russian currency
	3. The growth of prices in the domestic market for components and fuel and energy resources
	4. Irrational use of financial resources, including corruption, lobbying and other external and internal economic factors.
Environmental risks	1. Pollution impact areas separating parts of carrier rockets
	2. Environmental pollution in case of emergency launches of rocket-space technology
	3. International sanctions in response to the launches of the SV with a large number of separable fragments, leading to blockage of near-earth space, as well as the launches of the SV, not provided with the means of their de-orbit after completion of the operation
Scientific, technical and technological risks	1. Irrational choice of priorities for scientific and technological policy
	2. The exhaustion of the scientific and technological groundwork
	3. Insufficient funding for the development of new research and development work
	4. The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry
	5. Failure of terms of deliveries of material resources cooperation
	6. The imperfection and obsolescence of production technology and testing facilities required for the creation and production of new generation products MSE (with high specifications), competitive on the world market of space technology, space technologies, materials and services
	7. The loss of the technologies used in the design and manufacture of space technics, space technologies, materials and services, resulting in the development and production of a number of types or models for space products is problematic
	Lack of maintenance of levels of technological readiness (Technology Readiness Level — TLR-levels) development of advanced space systems (complexes) and a low rate of decline of the gap from the leading space powers in the main areas of space activities (remote sensing, communications, navigation, manned space flights, etc.)
Personnel risks	1. The shortage of scientific, testing and production staff
	2. Insufficient level of the necessary qualification of specialists
	3. The lack of specialists with necessary qualifications due to the inefficient system of remuneration, motivation and incentives
	4. The imbalance of specialists by age and skill level The presence or absence of a personnel reserve of the appropriate professional competence and practical experience at the enterprises and organizations of rocket-space industry

— Y_{ji}^{mlz} — the damage from the occurrence of the i -th risk event in the course of implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event m on the project;

— K_{ji}^{mlz} — normalizing the contribution factor of the i -th risk event in the overall risk assessment of the implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -th project. This factor ensures not exceeding the value of risk index equal to 1, for all possible values of the parameters Y_{ji}^{mlz} and P_{ji}^{mlz} .

Qualitative assessment W_{ji}^{mlz} of the degree of influence of the i -th risk event for the implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project is carried out by experts on a scale dwuhvalentnoe:

— $W_{ji}^{mlz} = 1$, if the i -th risk event has an impact on the implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -th project;

— $W_{ji}^{mlz} = 0$, if the i -th risk event does not affect the realization of the j -th stage of the z -th component parts of the l -th event, m -th project.

The probability of occurrence of the i -th risk event in the course of implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project (P_{ji}^{mlz}) has physical sense for the risk events for which $W_{ji}^{mlz} = 1$, and defined by experts on a scale:

— $P_{ji}^{mlz} = 0$, if the i -th risk event in the course of implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project does not occur;

— $P_{ji}^{mlz} = 0.25$, if the i -th risk event in the course of implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project is unlikely;

— $P_{ji}^{mlz} = 0.5$, if the i -th risk event in the course of implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project may come or not come;

— $P_{ji}^{mlz} = 0.75$, if the i -th risk event in the course of implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project is likely to come; $P_{ji}^{mlz} = 1$, если i -ое рисковое событие в ходе реализации j -го этапа z -ой составной части l -го мероприятия m -го проекта однозначно наступит.

The damage from the occurrence of the i -th risk event in the course of implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project (Y_{ji}^{mlz}) makes sense for risk events for which $W_{ji}^{mlz} = 1$, and determined by an expert on a four-point scale, based on the "Methodological guidelines for the development and implementation of state programmes of the Russian Federation" [13]:

— $Y_{ji}^{mlz} = 0$, if the i -th risk event does not affect the success of the j -th stage of the z -th component parts of the l -th event, m -th of the project (achieved all the planned results of the stage within the given timeframe);

— $Y_{ji}^{mlz} = 0.05$, if the i -th risk event has little effect on the success of the j -th stage of the z -th component parts of the l -th event, m -th draft (changes from the planned level of up

to 5% of the expected results of the stage and (or) dates for achieving them);

— $Y_{ji}^{mlz} = 0.1$, if the i -th risk event affect the successful implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -th draft (changes from the planned level of 5% to 10% of the expected results of the stage and (or) dates for achieving them);

— $Y_{ji}^{mlz} = X/100$, if the i -th risk event significantly affects the success of the j -th stage of the z -th component parts of the l -th event, m -th project. Here X is the percentage change from the planned level, the expected results and (or) timing for their achievement.

Normalizing the coefficient contribution of the i th risk event in the overall risk assessment of the implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project (K_{ji}^{mlz}) is as follows:

— $K_{ji}^{mlz} = 1/N_j(\epsilon)$, where $N_j(\epsilon)$ is the number of risk events affecting the j th stage, if the impact of each of the i -th risk event on the successful implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project is equivalent;

— K_{ji}^{mlz} specifies experts in charge of evaluating, if you have the original data on the nature of the influence of the i -th risk event on the indicators of the success of the j -th stage of the z -th component parts of the l -th event, m -th project.

The following methods of obtaining expert information about the impact of each of the i -th risk event on the indicators of the success of the j -th stage of the z -th component parts of the l -th event, m -project:

— to complete the formation of an expert group that includes the appropriate number (usually at least 10 people) of experts and the use of the individual opinions of the members of the specified group, the respondents independently from each other;

— the involvement of a group of informational-analytical support and use of the individual opinions of the members of the specified group, the respondents independently from each other;

— the involvement of a group of informational-analytical support and receive expert information through joint discussions by all participants of this group [10].

The first method is the most preferred but not always feasible. In the case of its use formed an expert group for the evaluation of each z -th component parts of the l -th event, m -th draft Programme.

In the implementation of the expert assessments of parameters W_{ji}^{mlz} , Y_{ji}^{mlz} and P_{ji}^{mlz} forming the Protocol of the established form, including the list of invited experts, evaluate their professional qualities, the assessment of parameter, set by each expert, the mean value for all experts, an assessment of the consistency of experts, defined by the variance and coefficient of variation of the estimated parameter.

Each parameter characterizing the probability of occurrence of a risk event is assigned the mean value for all experts, defined by the following expression:

$$\overline{P_{ji}^{mlz}} = \frac{\sum_{g=1}^G P_{ji}^{mlz}(g)}{G}, \quad (1)$$

where G is the number of experts participating in the evaluation;
 g — room expert;

$P_{ji}^{mlz}(g)$ — some g -m expert, the magnitude of the probability of occurrence of the i -th risk event in the course of implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -th project.

Then the consistency of experts' opinions is characterized by the variance of the estimate of this parameter, which is calculated by the formula:

$$D_{ji}^{mlz} = \left(\frac{1}{(G-1)} \right) \times \sum_{g=1}^G \left(P_{ji}^{mlz}(g) - \overline{P_{ji}^{mlz}} \right)^2. \quad (2)$$

To assess the consistency of experts' opinions on the value of the probability of occurrence of the i -th risk event in the course of implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project uses the value of the coefficient of variation:

$$V_{ji}^{mlz} = \frac{\sqrt{D_{ji}^{mlz}}}{\overline{P_{ji}^{mlz}}}. \quad (3)$$

If the value $V_{ji}^{mlz} < 0.2$, then I believe that the consistency of the experts is good. If $0.2 \leq V_{ji}^{mlz} < 0.3$ it is satisfactory. Otherwise, the consistency of the experts is considered to be low.

At low consistency, experts should:

- to take measures aimed at identifying and addressing differences of expert opinion (for example, by meeting with experts);
- to exclude from consideration the experts, whose opinions are radically different from the other experts;
- consider the qualifications of the experts;
- to form a new peer group and re-assess.

In the case of considering the qualifications of the experts, the value $\overline{P_{ji}^{mlz}}$ is calculated according to the formula:

$$\overline{P_{ji}^{mlz}} = \frac{\sum_{g=1}^G KE^{mlz}(g) \times P_{ji}^{mlz}(g)}{G}. \quad (4)$$

где $KE^{mlz}(g)$ — the factor that determines the skill level of the g -th expert in assessing the values of the probability of occurrence of risk events for z -th component parts of the l -th event, m -th project.

The coefficient is calculated as follows:

$$KE^{mlz}(g) = \frac{E^{mlz}(g)}{\max_1 E^{mlz}(g)}, \quad (5)$$

где $E^{mlz}(g)$ — score of professional qualities of the expert participating in the evaluation of the z -th component parts of the l -th event, m -th project;

$\max_1 E^{mlz}(g)$ — the maximum numerical score of the experts involved in the evaluation of the z -th component parts of the l -th event, m -th project.

In case of impossibility of forming a full-fledged expert group for estimation of the parameters, W_{ji}^{mlz} , Y_{ji}^{mlz} and P_{ji}^{mlz} z is-Oh compound of part l event m -th draft Programme can be brought by the group of information and analytical support and used individual assessment of the participants of this group. In this case the final grade is calculated as the median of these individual assessments.

The algorithm for computing the median consider for example the parameter "probability of occurrence of a risk event" (P_{ji}^{mlz}) is the following.

1. Ranked set $\{P_{ji}^{mlz}\}$ in descending order of its values.
2. If G is an odd number, the median corresponds to the Central value of the ranked set $\{P_{ji}^{mlz}(g)\}$, the number of which is calculated by the formula:

$$N_{Me} = (G + 1) / 2. \quad (6)$$

3. Introduced sdoodee designation for the median:

$$Me = P_{ji}^{mlz}(g)_{N_{Me}}. \quad (7)$$

4. If G is an even number, the set $\{P_{ji}^{mlz}(g)\}$, has two Central values and the median is calculated by the formula:

$$Me = P_{ji}^{mlz}(g)_{G/2} + P_{ji}^{mlz}(g)_{(G/2+1)} / 2 \quad (8)$$

In case of impossibility of obtaining individual opinions of group members of information and analytical support for evaluation of options W_{ji}^{mlz} , Y_{ji}^{mlz} and P_{ji}^{mlz} each z -th component parts of the l -th event, m -project, the necessary expert information is formed by a joint discussion of parameter values for all participants in this group.

In this case, the specialist group risk information and analytical support of the findings of the joint expert assessment of the risk events accordingly documents, coordinates with all members of the specified group and approves the group leader.

Evaluation of risks the implementation stages

In this step, an evaluation of the implementation stages of the z -th component parts of the l -th event, m -th project.

As a quantitative measure of a risk event using a private indicator "risk of risk" (O_{ji}^{mlz}) that is determined by the

product of the probability of occurrence of a risk event on the extent of damage from its occurrence:

$$O_{ji}^{mlz} = P_{ji}^{mlz} \times Y_{ji}^{mlz}. \quad (9)$$

If the value of the "danger" of any of the i -th risk event exceeds the value of 0.6, the risk of the corresponding j -th stage, and, therefore, the z -th components, l -events and m -project is considered to be unacceptable and further estimates and calculations stop. In this case, must be made a managerial decision to reduce specified risks and ensure the successful implementation of the j -th stage and z -th components, l -events and m -project.

Otherwise, the value of risk of realization of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project is calculated as the additive convolution of partial indicators of risk events of this phase:

$$R_j^{mlz} = \sum_{i=1}^{N_z} (O_{ji}^{mlz} \times K_{ji}^{mlz}), \quad (10)$$

Using approved graded scale makes a judgment about the risks of execution of each stage in the z -th component parts of the l -th event, m -th project.

If the condition $0 < R_j^{mlz} \leq 0.4$, the risk of realization of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project is assessed as low, and is accepted as valid.

If the condition of $0 < R_j^{mlz} \leq 0.6$, the risk of realization of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project is estimated as average, and accepted conditionally.

If the condition of $0 < R_j^{mlz} \leq 1.0$, then the risk of the implementation of the j -th stage z -th component parts of the l -th event, m -project is assessed as high and are considered unacceptable.

Evaluation of risks the implementation of the constituent parts

In this step, provided by risk assessment implementation of the component parts of the l -th event, m -th project.

The risk value of executing the z -th component parts of the l -th event, m -th project is calculated as the multiplicative convolution of private risks of the implementation of its stages:

$$R^{mlz} = 1 - \prod_{j=1}^{N_z} (1 - R_j^{mlz}). \quad (11)$$

Using a graded scale makes a judgment about the risks of implementing each z -th component parts of the l -th event, m -th project. If necessary, the issue is escalated to the level of decision-makers. In this case, develop recommendations for decision by the specified person.

If the condition $0 < R^{mlz} \leq 0.4$, the risk of realization of the z -th component parts of the l -th event, m -project is assessed as low, and is accepted as valid. In this case, continues the periodic implementation of the procedure "risk Assessment".

If the condition of $0.4 < R^{mlz} \leq 0.6$, the risk of realization of the z -th component parts of the l -th event, m -project is estimated as average, and accepted conditionally. In this case, identifies most dangerous risks in the component parts and the problem is escalated to the level of decision-makers (implemented procedure "the decision on the results of the risk assessment").

If the condition of $0.6 < R^{mlz} \leq 1.0$, then the risk of realization of the z -th component parts of the l -th event, m -project is assessed as high and are considered unacceptable. In this case, identifies most dangerous risks in the component parts and the problem is escalated to the level of decision-makers (implemented procedure "the decision on the results of the risk assessment").

Evaluation of risks the implementation of the Program

In this step, provided by risk assessment of the implementation of the m -th of the project.

The risk value of executing the l -th event, m -project is calculated as the multiplicative convolution of the private risks of its constituent parts:

$$R^{ml} = 1 - \prod_{j=1}^{N_l} (1 - R_j^{ml}). \quad (12)$$

Using a graded scale makes a judgment about the risks of realization of the l -th event, m -th project. If necessary, a decision is taken to escalate the problem to the level of decision-makers, and develop recommendations for decision by the specified person.

If the condition $0 < R^{ml} \leq 0.4$, the risk of realization of the l -th event, m -project is assessed as low, and is accepted as valid. In this case, continues the periodic implementation of the procedure "risk Assessment".

If the condition of $0.4 < R^{ml} \leq 0.6$, the risk of realization of the l -th event, m -project is estimated as average, and accepted conditionally. In this case, identifies most dangerous risks in the event the problem escalated to the level of decision-makers (implemented procedure "the decision on the results of the risk assessment").

If the condition of $0.6 < R^{ml} \leq 1.0$, then the risk of implementation l -activity m -project is assessed as high and are considered unacceptable. In this case, identifies most dangerous risks in the event the problem escalated to the level of decision-makers (implemented procedure "the decision on the results of the risk assessment").

Evaluation of risks of projects

The risk value run m -project program is determined by the additive convolution of private risks of the implementation of its activities:

$$R^m = \frac{\left(\sum_{l=1}^{N_m} R^{ml} \right)}{N_m}. \quad (13)$$

Using a graded scale makes a judgment about the risks of the projects, if necessary, a decision is taken to escalate the problem to the level of decision makers, and develop recommendations for decision by the specified person.

If the condition $0 < R^m \leq 0.4$, the risk for implementation of the m th project is assessed as low and is accepted as valid. In this case, continues the periodic implementation of the procedure "risk Assessment".

If the condition of $0.4 < R^m \leq 0.6$, the risk for implementation of the m th project is assessed as medium, and received probation. In this case, the identification of the most dangerous risks of the project and the problem escalated to the level of decision-makers (implemented procedure "the decision on the results of the risk assessment").

If the condition of $0.6 < R^m \leq 1.0$, then the risk of the implementation of the m -th of the project is assessed as high and considered unacceptable. In this case, the identification of the most dangerous risks of the project and the problem escalated to the level of decision-makers (implemented procedure "the decision on the results of the risk assessment").

The risk evaluation of the Programme in General

Значение риска реализации Программы в целом определяется как мультипликативная свёртка частных рисков реализации её проектов:

$$R = \left(\sum_{m=1}^N R^m \right) / N \quad (14)$$

Using a graded scale makes a judgment about the risks the implementation of the Program as a whole. If necessary, a decision is taken to escalate the problem to the level of decision-makers, and develop recommendations for decision by the specified person.

If the condition $0 < R \leq 0.4$, the risk of implementation of the Program as a whole is assessed as low and is accepted as valid. In this case, continues the periodic implementation of the procedure "risk Assessment".

If the condition of $0.4 < R \leq 0.6$, the risk of implementation of the Program as a whole is estimated as average, and accepted conditionally. In this case, the identification of the most dangerous risks of the program and the problem is escalated to the level of decision-makers (implemented procedure "the decision on the results of the risk assessment").

If the condition of $0.6 < R \leq 1.0$, then the risk of the implementation of the m -th of the project is assessed as high and considered unacceptable. In this case, the identification of the most dangerous risks of the Program and the problem is escalated to the level of decision-makers and implemented procedure "the decision on the results of the risk assessment", which includes the following basic steps: communicating current risk status of the Programme implementation, projects and

the Program as a whole to decision makers; analysis of this information; the decision on the results of the risk assessment.

Example risk assessment

The risk assessment will consider the example of implementation of design and development work "meteor-3M" — "Creation of space complex hydrometeorological and Oceanographic support and space system based on it consisting of 4 satellites," which generally is a space complex dual purpose.

1. General characteristics of design and development work "Meteor-3M"

The purpose of performing design and development work "meteor-3M" is the creation of space complex hydrometeorological and Oceanographic support and space system based on it to create, launch, and flight tests of the four spacecraft (hereafter SV) "Meteor-M" № 2-1, № 2-2, № 2-3 и № 2-4.

Design and development work "Meteor-3M" is part of the project "Meteo-SSO" and includes two parts (more — component part):

component part design and development work "Meteor-3M" (Meteor-M 2-1, 2-2) "the Creation of a space complex hydrometeorological and Oceanographic support with SV "Meteor-M" № 2-1, № 2-2»;

component part design and development work « Meteor-3M" (Meteor-M 2-3, 2-4) "the Creation of a space complex hydrometeorological and Oceanographic support with SV « Meteor-M » № 2-3, № 2-4».

Key components of a space system are:

- rocket-space complex "Meteor-M";
- ground control SV "Meteor-M";
- a ground complex for reception, processing and dissemination of information with SV "Meteor-M".

The main indicators of design and development work "meteor-3M":

- customer: the state Corporation "Roscosmos";
- deadlines: the years 2016 to 2022;
- the amount of funding design and development work by years is given in table.2;
- milestones and deadlines design and development work are presented in table. 3.

1. Assessment of risk events design and development work "Meteor-3M"

Assessment of these risk events were carried out by experts.

Assessment of risk events carried out by an expert specialist group's risk information and analytical support, the results of the examination approved by the members and leader of this group.

The list of 26 identified risk events that are approved by the state Corporation "Roscosmos" and which may provide a threat to the implementation of design and development work are presented in table 5.

Table 2

Funding design and development work "Meteor-3M"
(million rubles, in prices of respective years)

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Bcero
FSP-2025	2848.3	2103.8	2755.0	1103.2	1007.9	2806.6	415.2	13040.0
Clarification (was)	2961.3	2102.1	2365.5	972.9	327.5	373.0	80.0	9182.3

Table 3

Stages of design and development work "Meteor-3M"

№ stage	The name of the stage	The term of implementation stage
Component part design and development work "Meteor-3M" (Meteor-M №№2-1, 2-2)		
1	The completion of design documentation and engineering documentation for SV and its component parts, measuring and computing complex, checkout equipment and ground equipment to the SV and its component part	IV quarter 2016
2	The completion of manufacture of prototypes component part SV, measuring and computing complex, checkout equipment and ground process equipment to the SV and its component part, carrying out experimental ground tests	The first quarter of 2017 III quarter of 2017r.
3	Finalization of the ground control complex and ground station for reception, processing and distribution of information to work with SV "Meteor-M" №2-1 and 2-2	I quarter 2017 – III quarter of 2017
4	Fabrication, surface development test, launch and flight tests of the SV "Meteor-M" №2-1	II quarter of 2017
5	Fabrication, surface development test, launch and flight tests of the SV "Meteor-M" №2-2	IV quarter of 2017 – 2018
Component part design and development work "Meteor-3M" (Meteor-M №№2-3, 2-4)		
1	Adjustment (if necessary development) on technical tasks (additions thereto) design documentation, design documentation, and software for SV and its component parts, measuring and computing complex, checkout equipment and ground equipment and its component part, hardware and software complexes for modeling and testing	January 2016 – November 2017
2	Procurement of electronic components and of components for component part SV, measuring and computing complex, control-calibration instrumentation and hardware-software complex	January 2016 – November 2017
3	The manufacture of models and prototypes the component part SV, SV and hardware-software complex for ground testing	January 2016 – November 2017
4	The prototype (flight) SV component part samples, measuring and computing complex, checkout equipment and ground process equipment to the SV and its component part, carrying out experimental ground tests component part	January 2016 – November 2020
5	Finalization of the ground control and ground complex for reception, processing and dissemination of information	January 2016 – November 2020
6	Fabrication, surface development test, flight test, launch preparation, launch SV "Meteor-M" № 2-3	January 2016 – November 2020
7	Fabrication, surface development test, flight test, launch preparation, launch SV "Meteor-M" № 2-4	January 2016 – November 2021

At the time of the risk assessment completed the first stages of component part design and development work "Meteor-3M" (Meteor-M 2-1, 2-2) and component part design and development work "meteor-3M" (Meteor-M 2-3, 2-4). The risks of implementing the design and development work "meteor-3M" is evaluated qualitatively and quantitatively in the stages and component parts design and development work.

Qualitative assessment of risk events includes an assessment of the impact of risks from table 3 for the successful implementation of each stage of composite parts design and development work.

The success of the implementation phase is ensured achievement of deadlines of all expected results and indicators defined in the specification.

The parameter "qualitative assessment of the impact of a risk event on the stage (J)" was evaluated by bivalent scale:

- $J = 1$ if the risk event affects the phase of implementation design and development work;
- $J = 0$ if the risk event does not affect the phase of implementation design and development work.

On the results of the qualitative assessment it was established that:

- 9 of 26 risk events (34%) have an impact on the implementation of 2 the runtime component part design and development work "Meteor-3M" (Meteor-M 2-1, 2-2) and for the implementation of 2, 3 and 4 stages, component part design and development work "Meteor-3M" (Meteor-M 2-3, 2-4);
- 7 of 26 risk events (26%) have an impact on the implementation of 3, 4 and 5, the runtime component part design and development work "meteor-3M" (Meteor-M 2-1, 2-2) and the implementation of 5, 6 and 7 stages component part design and development work "Meteor-3M" (Meteor-M 2-3, 2-4).

Quantitative assessment of risk events included the evaluation of each risk for which $J = 1$, by two parameters:

- the probability of occurrence of a risk event during the implementation phase.
- the damage from realization of a risk event.

The probability of occurrence of a risk event during the implementation phase (next — P) was assessed on a scale approved by the state Corporation "Roscosmos":

- $P = 0$ if the risk event does not occur;
- $P = 0.25$, if the occurrence of the risk event is unlikely;
- $P = 0.5$, if the risk event can occur and not occur;
- $P = 0.75$, if the risk event is likely to occur;
- $P = 1$ if the risk event will definitely occur.

To assess the damage from realization of risk event (forth) used a four-point scale, based on the "Methodological guidelines for the development and implementation of state programmes of the Russian Federation" (approved by order from 16.09.2016 No. 582 Ministry of economic development of Russia):

— $Y = 0$ if the risk event does not affect the success of the implementation phase (achieved all the expected results of the stage within the given timeframe);

— $Y = 0.05$, if the risk event has little effect on the success of the implementation phase (changes from the planned level of up to 5% of the expected results of the stage and (or) dates for achieving them);

— $Y = 0.1$, if the risk event affect the success of the stage (changing from a planned level of 5% to 10% of the expected results of the stage and (or) dates for achieving them);

— $Y = X/100$ if the risk event significantly affects the success of the implementation phase. Here X is the percentage change from the planned level, the expected results and (or) timing for their achievement.

The results of quantitative assessment of risk events is given in table 4.

Risk assessment implementation of design and development work "Meteor-3M"

Risk assessment implementation component part design and development work "Meteor-3M" was carried out in accordance with the "Interim regulations of the risk management process of the Program".

Risk assessment the implementation phases of each component part design and development work "Meteor-3M" was carried out on the basis of quantitative assessment of risk events of these stages (table 5), using the normalizing coefficients of risk events and the additive convolution (table 5).

The normalizing factor risk event (next — T_0) quantifies the percentage contribution of each risk event in the integrated risk assessment of a given stage is determined assuming that all phases of each composite part design and development work equivalent. The value $K=0.11$ for stages 9 risk events and $K=0.14$ for the stages, which include 7 risk events.

The results of the risk assessment implementation and component parts design and development work "meteor-3M" is shown in table 6. As can be seen from this table, the risks of implementation of these steps vary in the range from 0.01 to 0.02, are low and are accepted as valid.

Risk assessment the implementation of each components design and development work "Meteor-3M" was carried out on the basis of the risk assessment phases using a multiplicative convolution. Risks in the implementation of integral composite parts design and development work ranges from 0.07 to 0.11, are low and are accepted as valid.

Integrated risk assessment implementation of design and development work "Meteor-3M" was based on risk assessments of its component parts, using multiplicative convolution. Integrated risk implementation design and development work "Meteor-3M" $R=0.17$, is assessed as low and is accepted as valid.

Table 4

The risks of implementing the design and development work "Meteor-3M"

International legal risks	The imposition of sanctions and bans on the sale of Russian instruments and elements of electronic component base
	The imposition of sanctions and bans on loans Russian Federation
	Sanctions and bans on the implementation of NASA's procurement of space technology and services in the Russian Federation to the international space station
	The imposition of sanctions and restrictions on data retrieval with foreign SV remote sensing
	The introduction of quotas for the SV launches of Russian launch vehicles
	The change in legislation related to space activities
	The approval of the legal mistakes in the implementation of space activities
	Refusal or change of terms of delivery of the requested resource, because of imperfection of the legal system
Economic risks	The change in the volume of funds allocated for realization of the Federal space program
	The depreciation of the Russian currency
	The growth of prices in the domestic market for parts and fuel and energy resources
	Irrational use of financial resources, including corruption, lobbying etc.
Environmental risks	Pollution impact areas separating parts of carrier rockets
	Pollution emergency runs MSE
	International sanctions in response to the launches of the SV with a large number of separable fragments, leading to blockage of near-earth space, as well as SV, is not provided with the means of their de-orbit after completion of the operation
Scientific, technical and technological risks	Irrational choice of priorities for scientific and technological policy
	The exhaustion of the scientific and technological groundwork
	Insufficient funding for the development of new scientific and technical developments
	The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry
	Failure of terms of deliveries of material resources cooperation
	The imperfection and obsolescence of production technology and testing facilities required for the creation and production of a new generation of MSE (with high specifications), competitive on the global market for space technology and services
	The loss of the technologies used in the design and manufacture of space products, resulting in development and production of a number of types or models for space products is problematic
Personnel risks	The shortage of scientific, testing and production staff
	Insufficient level of the necessary qualification of specialists
	The lack of specialists with necessary qualifications due to the inefficient system of payment and stimulation of work
	The imbalance of specialists by age

Table 5

Risk assessment the implementation phases of design and development work «meteor-3M»

Risk event	The probability (P)	Damage (Y)	Danger (O=P*Y)	The normalizing factor (K)	(O*K)
1	2	3	4	5	6
Component part design and development work « Meteor-3M » (Meteor-M №№2-1, 2-2)					
Stage 2 – Completion of prototype production component part SV, measuring and computing complex, checkout equipment and ground process equipment to the SV and its component part, carrying out experimental ground tests					
The imposition of sanctions and bans on the sale of Russian Federation of the devices and elements of electronic component base	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
Refusal or change of terms of delivery of the requested resource, because of imperfection of the legal system	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
The change in the volume of funds allocated for the implementation of experimental ground tests	0.5	0.05	0.03	0.11	0.003
The growth of prices in the domestic market for parts and fuel and energy resources	0.5	0.05	0.03	0.11	0.003
The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
Exhaustion of administrative, scientific and technological groundwork	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
The imperfection and obsolescence of production technology and testing bases	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
Failure of terms of deliveries of material resources cooperation	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
Insufficient level of the necessary qualification of specialists	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
The risk for the implementation of phase 2	$R = 0.001*3 + 0.003*6 = 0.02$				
The decision on stage 2	The risk is assessed as low and is accepted as valid				
Stage 3 – Development of ground control complex and ground station for reception, processing and distribution of information to work with SV "Meteor-M" №2-1 and №2-2					
Изменение объема финансовых средств, выделяемых на доработку наземного комплекса управления и пунктов приема информации	0.5	0.1	0.01	0.14	0.002
Рост цен на внутреннем рынке на комплектующие и топливно-энергетические ресурсы	0.5	0.05	0.05	0.14	0.007
The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
Exhaustion of administrative, scientific and technological groundwork	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
The imperfection and obsolescence of production technology and testing bases	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
Failure of terms of deliveries of material resources cooperation	0.25	0.05	0.03	0.14	0.004
Insufficient level of the necessary qualification of specialists	0.25	0.1	0.01	0.14	0.002
The risk for the implementation of phase 3	$R = 0.002*2 + 0.004*4 + 0.007 = 0.02$				
The decision on phase 3	The risk is assessed as low and is accepted as valid				

Continuation of table 5

1	2	3	4	5	6
Step 4 – Fabrication, surface development test, launch and flight tests of the SV "Meteor-M" №2-1					
The change in the volume of funds allocated for the implementation of flight tests	0.5	0.1	0.05	0.14	0.007
The growth of prices in the domestic market for parts and fuel and energy resources	0.5	0.05	0.03	0.14	0.004
Contamination of areas separating from parts of rockets	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
Environmental pollution in case of accidental launches	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
The imperfection and obsolescence of production technology and testing bases	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
Failure of terms of deliveries of material resources cooperation	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
The risk of implementation of phase 4	$R = 0.002*3 + 0.004*3 + 0.007 = 0,02$				
A decision on stage 4	The risk is assessed as low and is accepted as valid				
Stage 5 – Fabrication, surface development test, launch and flight tests of the SV "Meteor-M" №2-2					
The change in the volume of funds allocated for the implementation of flight tests	0.5	0.1	0.05	0.14	0.007
The growth of prices in the domestic market for parts and fuel and energy resources	0.5	0.05	0.03	0.14	0.004
Contamination of areas separating from parts of rockets	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
Environmental pollution in case of accidental launches	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
The imperfection and obsolescence of production technology and testing bases	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
Failure of terms of deliveries of material resources cooperation	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
The risk of implementation of phase 5	$R = 0.002*4 + 0.004*2 + 0.007 = 0.01$				
Solution for stage 5	The risk is assessed as low and is accepted as valid				
Component part design and development work "Meteor-3M" (Mmeteor-M №№2-3, 2-4)					
Stage 2 – Purchase of electronic components and of components for component part SV, measuring and computing complex, control-calibration instrumentation and hardware-software complex					
The imposition of sanctions and bans on the sale of Russian Federation of the devices and elements of electronic component base	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
Refusal or change of terms of delivery of the requested resource, because of imperfection of the legal system	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
The change in the volume of funds allocated for the implementation of experimental ground tests	0.5	0.05	0.03	0.11	0.003
The growth of prices in the domestic market for parts and fuel and energy resources	0.5	0.05	0.03	0.11	0.003
The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003

Continuation of table 5

Exhaustion of administrative, scientific and technological groundwork	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
The imperfection and obsolescence of production technology and testing bases	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
Failure of terms of deliveries of material resources cooperation	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
Insufficient level of the necessary qualification of specialists	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
The risk for the implementation of phase 2	$R = 0.001*4 + 0.003*5 = 0.02$				
The decision on stage 2	The risk is assessed as low and is accepted as valid				
Step 3 – Manufacture of models and prototypes the component part SV, SV and hardware-software complex for ground testing					
The imposition of sanctions and bans on the sale of Russian Federation of the devices and elements of electronic component base	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
Refusal or change of terms of delivery of the requested resource, because of imperfection of the legal system	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
The change in the volume of funds allocated for the implementation of experimental ground tests	0.5	0.05	0.03	0.11	0.003
The growth of prices in the domestic market for parts and fuel and energy resources	0.5	0.05	0.03	0,11	0.003
The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
Exhaustion of administrative, scientific and technological groundwork	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
The imperfection and obsolescence of production technology and testing bases	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
Failure of terms of deliveries of material resources cooperation	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
Insufficient level of the necessary qualification of specialists	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
The risk for the implementation of phase 3	$R = 0.001*4 + 0.003*5 = 0.02$				
The decision on phase 3	The risk is assessed as low and is accepted as valid				
Stage 4 – the prototype (flight) SV component part samples, measuring and computing complex, checkout equipment and ground process equipment to the SV and its component part, carrying out experimental ground tests component part					
The imposition of sanctions and bans on the sale of Russian Federation of the devices and elements of electronic component base	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
Refusal or change of terms of delivery of the requested resource, because of imperfection of the legal system	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
The change in the volume of funds allocated for the implementation of experimental ground tests	0.5	0.1	0.05	0.11	0.006
The growth of prices in the domestic market for parts and fuel and energy resources	0.5	0.05	0.03	0.11	0.003
The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
Exhaustion of administrative, scientific and technological groundwork	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
The imperfection and obsolescence of production technology and testing bases	0.25	0.1	0.03	0.11	0.003
Failure of terms of deliveries of material resources cooperation	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
Insufficient level of the necessary qualification of specialists	0.25	0.05	0.01	0.11	0.001
The risk of implementation of phase 4	$R = 0.001*4 + 0.003*4 + 0.006 = 0,02$				

Continuation of table 5

A decision on stage 4	The risk is assessed as low and is accepted as valid				
Stage 5 – Development of ground control complex and ground station for reception, processing and dissemination of information					
The change in the volume of funds allocated for revision of ground control complex	0.5	0.1	0.05	0.14	0.007
The growth of prices in the domestic market for parts and fuel and energy resources	0.5	0.05	0.03	0.14	0.004
The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
Exhaustion of administrative, scientific and technological groundwork	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
The imperfection and obsolescence of production technology and testing bases	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
Failure of terms of deliveries of material resources cooperation	0.25	0.05	0.01	0.4	0.002
Insufficient level of the necessary qualification of specialists	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
The risk of implementation of phase 5	$R = 0.002 + 0.004*5 + 0.007 = 0,02$				
Solution for stage 5	The risk is assessed as low and is accepted as valid				
Stage 6 – Production, experimental ground testing, flight testing, launch preparation, the launch of the SPACECRAFT "meteor-M" № 2-3					
The change in the volume of funds allocated for the implementation of flight tests	0.5	0.1	0.05	0.14	0.007
The growth of prices in the domestic market for parts and fuel and energy resources	0.5	0.05	0.03	0.14	0.004
Contamination of areas separating from parts of rockets	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
Environmental pollution in case of accidental launches	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
The imperfection and obsolescence of production technology and testing bases	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
Failure of terms of deliveries of material resources cooperation	0.25	0.05	0.03	0.14	0.004
The risk for the implementation of phase 6	$R = 0.002*3 + 0.004*3 + 0.007 = 0,02$				
A decision on stage 6	The risk is assessed as low and is accepted as valid				
Step 7 – Production of experimental ground testing, flight testing, launch preparation, launch SV "Meteor-M" № 2-4					
The change in the volume of funds allocated for the implementation of flight tests	0.5	0.1	0.05	0.14	0.007
The growth of prices in the domestic market for parts and fuel and energy resources	0.5	0,05	0.03	0.14	0.004
Contamination of areas separating from parts of rockets	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
Environmental pollution in case of accidental launches	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
The lack of production capacity of enterprises of space-rocket industry	0.25	0.1	0.03	0.14	0.004
The imperfection and obsolescence of production technology and testing bases	0.25	0.05	0.01	0.14	0.002
Failure of terms of deliveries of material resources cooperation	0.25	0.05	0.03	0.14	0.004
The risk of implementation of phase 7	$R = 0.002*3 + 0.004*3 + 0.007 = 0.02$				
The decision to stage 7	The risk is assessed as low and is accepted as valid				

CONCLUSION

The main results of the research is the methodology for risk assessment and predicting the effects of changes in the composition of activities of the Federal space program of Russia for 2016–2025.

In the process of analyzing the world and domestic practices of program planning revealed that at the present stage of development of program-oriented planning, are the main direct methods of expert estimations and the linear programming by determining the integral of the weighted sum of the normalized evaluations of the indicators have a number of inherent disadvantages. Namely, the lack of guarantees of reliability of the obtained results because of the subjectivity of opinions and professional according to experts, a great complexity in the collection and processing of survey results, a relatively small forecast horizon, the complexity of the integral evaluation due to the narrow specialization of experts and others.

During the preliminary studies identified ways of improving the forecast values of the indicators of program planning and improvement of methods of calculation of efficiency of target programs on the basis of multi-criteria methods of optimization and decision-making.

Developed practical recommendations on the application of the integrated technique of justification, program-oriented planning in the selection of options for the creation and use of space complexes socio-economic and dual-use goods.

REFERENCES

1. Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii «Kosmicheskaya deyatel'nost' Rossii na 2013–2020 gody» [State program of the Russian Federation "Space activities of Russia in 2013–2020"]. Spravochnaya pravovaya sistema Konsul'tantPlyus [Reference legal system Consultant plus]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_148920/8badd-3a243c37b75188656d54dc68dc409eb93ba/ (date of access 13.11.2017) (In Russian)
2. Federal'naya kosmicheskaya programma na 2016–2025 gody [Federal space program for 2016–2025]. Spravochnaya pravovaya sistema Konsul'tantPlyus [Reference legal system Consultant plus]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_284360/af376d0fb3595073c07e5fe35435f-69c49760fad/ (date of access 13.11.2017) (In Russian)

cons_doc_LAW_284360/af376d0fb3595073c07e5fe35435f-69c49760fad/ (date of access 13.11.2017) (In Russian)

3. Metodicheskie rekomendatsii po vnedreniyu proektnogo upravleniya v organy ispolnitel'noy vlasti [Methodical recommendations for the implementation of project management in the Executive authorities Spravochnaya pravovaya sistema Kodeks [Reference legal system Kodeks]. 2014. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499091150> (date of access 13.11.2017) (In Russian)

4. Polozhenie ob organizatsii proektnoy deyatel'nosti v Pravitel'stve RF. [Regulations on the organization of project activities in the government of the Russian Federation]. Spravochnaya pravovaya sistema Konsul'tantPlyus [Reference legal system Consultant plus]. 2016. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_206009/f42335354a124cb371c784f-1cd74ce7f8de122a7/ (date of access 13.11.2017) (In Russian)

5. Metodicheskie ukazaniya po razrabotke i realizatsii gosudarstvennykh programm RF [Guidelines for the development and implementation of state programs of the Russian Federation] Spravochnaya pravovaya sistema Kodeks [Reference legal system Kodeks]. 2017. URL: <http://docs.cntd.ru/document/420377385> (date of access 13.11.2017) (In Russian)

6. Kovaleva L.N. Mnogofaktornoe prognozirovanie na osnove ryadov dinamiki [Multivariate forecasting based on time series]. Moscow.: Statistica, 1980. 102 p. (In Russian)

7. Borisov A.N., Alekseev A.V., Merkuriev G.V. Obrabotka nechetkoy informatsii v sistemakh prinyatiya resheniy [Processing fuzzy information in decision-making systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1989. 304 p. (In Russian)

8. Eskindarov M.A. (Ed.) Raketno-kosmicheskaya promyshlennost' Rossii: institutsional'noe i ekonomicheskoe razvitie: monografiya [Rocket-space industry of Russia: institutional and economic development: monograph]. Moscow: INFRA-M, 2016. 309 p. (In Russian)

9. AIAA S-117A-2016. Space System Verification Program and Management Process.

10. Sokolov V.A., Senatorov, M. Yu., Nagibin S. Y. Proektnoe upravlenie v sfere informatizatsii Banka Rossii [Project management in the field of Informatization of the Bank of Russia]. Moscow: Ayaks-Press, 2013. 253 c. (In Russian)

Методика оценки рисков и прогнозирования их последствий при изменении состава мероприятий Федеральной космической программы России на 2016–2025 годы в части космических систем и комплексов двойного и социально-экономического назначения

ВАСИЛЕВСКИЙ Анатолий Вячеславович,
г. Королёв, Россия, VasilevskiyAV@tsniimash.ru

ВЕЛИКОИВАНЕНКО Владимир Ильич,
г. Королёв, Россия, VelikoivanenkoVI@tsniimash.ru

ЖИГАНОВ Василий Нилович,
г. Королёв, Россия, ZhiganovVN@tsniimash.ru

ТЮРИНА Дарья Дмитриевна,
г. Королёв, Россия, TyurinaDD@tsniimash.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многокритериальные методы; оценка и виды рисков; рисковое событие; показатели характеристик ракетно-космической техники.

АННОТАЦИЯ

В статье представляется решение задачи оценки рисков, прогнозирования их последствий при создании перспективных космических систем и комплексов двойного и социально-экономического назначения в рамках реализации мероприятий Федеральной космической программы России на 2016-2025. Рассматриваются пути и методы практической реализации данной задачи.

Детально рассматривается задача организации процесса идентификации рисков, который должен учитывать основные проблемы, характеризующие текущее состояние ракетно-космической отрасли и оказывающие влияние, как на выполнение отдельных мероприятий, так и Федеральной космической программы России на 2016-2025 годы в целом.

В статье определено место процесса управления рисками в общей структуре процессов в части информационно-аналитического обеспечения управлением реализацией Федеральной космической программы России на 2016-2025 годы. Сформулированы цель процесса управления рисками и основные принципы его осуществления.

Изложена процедура мониторинга рисков обеспечивающая, как контроль уровня рисков мероприятий, проектов и Федеральной космической программы на 2016-2025 годы в целом, так и контроль планов реализации мероприятий по снижению недопустимых уровней рисков.

Разработана процедура принятия решения по результатам оценки рисков, осуществляемая должностными лицами Госкор-

порации по космической деятельности «Роскосмос» и обеспечивающая, в зависимости от уровня рисков, реализацию планов мероприятий по снижению их уровня и минимизации возможного ущерба.

На основе примера оценки рисков реализации ОКР «Метеор-3М» разработаны практические рекомендации по применению комплексной методики оценки рисков и прогнозирования их последствий при изменении состава мероприятий Федеральной космической программы России на 2016-2025 годы в части космических систем и комплексов двойного и социально-экономического назначения.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Василевский А. В., к.т.н., зам. начальника НТЦ-4 Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»;

Великоиваненко В. И., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник НТЦ-4 Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»;

Жиганов В. Н., ведущий инженер отдела 1112, Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»;

Тюрина Д. Д., зам. начальника отдела НТЦ-4 Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения».

Для цитирования: Василевский А. В., Великоиваненко В. И., Жиганов В. Н., Тюрина Д. Д. Методика оценки рисков и прогнозирования их последствий при изменении состава мероприятий Федеральной космической программы России на 2016–2025 годы в части космических систем и комплексов двойного и социально-экономического назначения // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 1 С. 82–99. doi 10.24411/2409-5419-2018-10022

doi 10.24411/2409-5419-2018-10023

THE TRACKING STROBE FORMATION ALGORITHM ON THE MANEUVERING AIRCRAFTS ON THE BASIS OF AN FUZZY LOGICAL CONCLUSION

PROROK

Valery Yaroslavovich¹

KHALIKOV

Eldar Mavlyutovich²

OKHOTNIKOV

Yury Yurievich³

SHAYMUKHAMEDOV

Shamil Ildusovich⁴

Information about authors:

¹PhD, Full Professor, Professor of the Military Space Academy, St.Petersburg, Russia, val_prorok@mail.ru;

²PhD, Head of the Department of the Military Institute (Research) of the Military Space Academy, St.Petersburg, Russia, hell_2@mail.ru;

³Lecturer of the Military Space Academy, St.Petersburg, Russia, Georgy_03@mail.ru;

⁴Postgraduate student of the Military Space Academy, St.Petersburg, Russia, 28_172@mail.ru.

ABSTRACT

The process of maneuvering aircraft tracking with radar equipment is a difficult task, because it is carried out under conditions of uncertainty about the nature of a possible maneuver, which leads to considerable errors in calculating the size of the strobe. One of the most perspective ways to overcome this uncertainty task is the use of fuzzy logical conclusion.

The aim of the work is the lowering of the possibilities of skipping marks and the formation of false trajectories by using correction expansion factor of the strobe when it is accompanied with maneuvering aircraft.

Recently, active introduction of new methods and models into industry and military affairs began, which were developed on the basis of fuzzy logic. The use of "fuzzy systems" allows to reduce resource and energy costs and provides a higher resistance to the influence of interfering factors than traditional automatic control systems can provide.

Fuzzy control is especially relevant when the processes under investigation are too complicated to be analyzed by conventional methods or when available sources of information are interpreted poorly, inaccurately or indefinitely. Fuzzy logic is closer to human thinking and natural languages than traditional logical system and it could provide effective means of displaying uncertainty and inaccuracies of the real world.

The machine of fuzzy sets and fuzzy logic is successfully used to solve the problems in which the initial data are unreliable and weakly formalized.

This work presents an algorithm of forming of the tracking strobe, in which the calculation of the required strobe size is carried out by using of linguistic variables for the variance of measurement and extrapolation errors, changes in speed and in estimated time before the start of maneuver and which increases the probability of sustained support for maneuvering aircraft.

KEYWORDS: maneuvering aircraft's; strobing; fuzzy logical conclusion; linguistic variable.

For citation: Prorok V. Y., Khalikov E. M., Okhotnikov Y. Y., Shaymukhametov S. I. The tracking strobe formation algorithm on the maneuvering aircrafts on the basis of an fuzzy logical conclusion. *H&ES Research*. 2017. Vol. 10. No. 1. Pp. 100-107. doi 10.24411/2409-5419-2018-10023

INTRODUCTION

It is quite difficult to solve the task of the sustainable support of maneuvering aircrafts (MA) by radar stations (RS) at the moment [1]. This is due to the uncertainty of conduct of this type of target in the area of the RS, which leads to an increase of the number of measurement and extrapolation errors in the processing of treatment of radar information. The visual target does not fall into the next strobe and is dropped from the accompanying as a result [2].

Strobe is a preselected area of the RS field of view, which coordinates of the center is the same with the coordinates of the extrapolated mark. The type and size of the strobe are determined on the basis of statistical data about the accuracy characteristics of information sources, errors in information processing and maneuverable capabilities of targets [3]. At the same time, the required values of the quality of the support should be provided (for example, the reliability of the tracking, the resolution of the tracking system, the probability of correct selection) [4].

We will consider structure of the operations which are carried out at stages of processing of radar information (RI):

- 1) stage of the tying the trajectory: strobing, rough estimation of parameters;
- 2) stage of the tracking: extrapolation, strobing, selection of the marks, parameter's estimation [5].

The process of detecting and tying a trajectory is presented on the fig. 1.

In the first period of overview received a mark from the target Z_1 with the coordinates $r = 576,2$ km, $\beta = 43^\circ$, $\varepsilon = 3,53^\circ$. The strobe of capture is exposed around her. The strobe of capture is based on the known maximum speed capabilities of the target. In the next period of overview, the mark Z_2 ($r = 575$ km, $\beta = 42^\circ$, $\varepsilon = 3,52^\circ$) was caught in the strobe. A rough estimate of the speed is made by using two marks, and the coordinates of the second (last) mark are taken as the estimated coordinate values, after that the transition to the accompaniment phase is carried out [6].

The extrapolated parameters of the first strobe are calculated by formulas:

$$\begin{aligned} r_e &= r_i + T_0 \dot{r}, \\ \beta_e &= \beta_i + T_0 \dot{\beta}, \\ \varepsilon_e &= \varepsilon_i + T_0 \dot{\varepsilon}, \end{aligned}$$

where $r_e, \beta_e, \varepsilon_e$ — extrapolated range values, bearing angle and angle of elevation;

T_0 — RS overview period;

$\dot{r}, \dot{\beta}, \dot{\varepsilon}$ — measured values radial, azimuthal and angular speeds [7].

The strobe is exposed around the extrapolated value, which was calculated with allowance of the measurement and extrapolation errors. In this case, the strobe sizes are calculated by formulas:

$$\begin{aligned} \Delta r &= 2 \cdot n \cdot \sqrt{D_r}, \\ \Delta \alpha_{azim} &= 2 \cdot n \cdot \sqrt{D_{\alpha_{azim}}}, \\ \Delta \alpha_{pla} &= 2 \cdot n \cdot \sqrt{D_{\alpha_{pla}}}, \end{aligned}$$

where $\Delta r, \Delta \alpha_{azim}, \Delta \alpha_{pla}$ — the size of the strobe in azimuth, elevation angle and range;

$D_r, D_{\alpha_{azim}}, D_{\alpha_{pla}}$ — dispersion of extrapolated azimuth, elevation angle and range;

n — expansion coefficient of strobe [8].

The accuracy of the coordinates and speed is determined when the next mark from the target hits this strobe. Let us consider the reasons for the appearance of false trajectories in the secondary radar processing system. Let's say that two marks hit the strobe of capture. In accordance with the criteria of the string, trajectories will be formed for both of them and sent for confirmation [9]. At the confirmation stage, extrapolated coordinates are calculated around which confirmation strobe are exposed. In the strobe of the true trajectory a mark has fallen in the current review period, but the false one has not. That's why the coordinates are smoothed out and transmitted to the tracking along the true trajectory, and a decision about the dump from processing is taken on the false trajectory (fig. 2)

If mark Z is not get into the strobe of the true trajectory (maneuver, malfunction, gross measurement error, etc.), then the extrapolated values on this trajectory are taken as estimat-

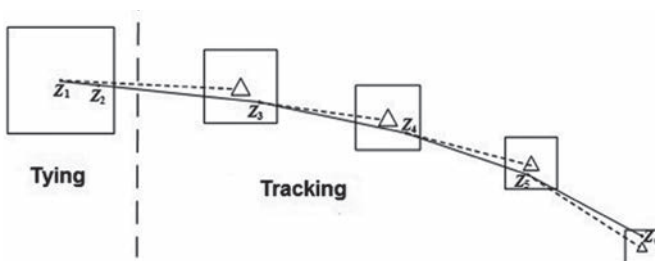


Fig. 1. The process of detecting and tying a trajectory along a target

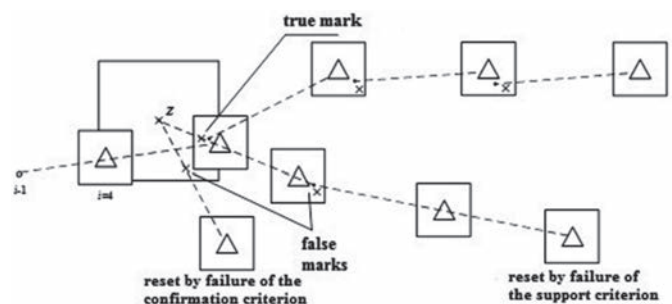


Fig.2. The formation of the false trajectories

ed values of the coordinates and extrapolation is carried out for the next (fourth) review period.

The strobe of capture is exposed around the mark Z and the size of the strobe of capture much bigger than the size of the strobe of tracking. And that's the reason why the true mark can get into the strobe of capture and the strobe of tracking at the same time with a high possibility (fig. 2). The false trajectory is forming as a result.

The errors in the extrapolation of coordinates sharply increase while tracking the maneuvering target and to achieve a high possibility of hit the target in the strobe it is necessary to increase its size, which depends on the intensity of the maneuver and the smoothing ability of the extrapolation algorithm in that case. If in the tracking algorithm only two hypotheses are taken into account - whether there is a maneuver or not, then for maneuvering targets the strobe should be calculated on the basis of the intensity of the maneuver [10].

THE FORMING OF THE TRACKING STROBE ON THE BASIS OF FUZZY LOGIC

This work presents a strobing algorithm based on fuzzy logic, which is used to increase the sustained track for maneuvering aircraft and allows to reduce the possibility of skipping marks and the formation of false trajectories by improving the coefficient of expansion of the strobe n . The scheme of the algorithm is given on fig.3.

The description of the solution of a problem of determination of the sizes of tracking strobe is submitted further. The size of dispersion of errors of measurement and extrapolation is defined and it is given to an fuzzy look, then the functions of

belonging are forming to determine the degree of truth of the next preconditions of each rule [11–12].

The value of the dispersion of measurement errors and extrapolations D is proposed to be estimated by a linguistic variable with terms: LOW (LOW), MEDIUM (MED), HIGH (HIGH). The functions of affiliation to a linguistic variable are determined by using the fuzzy classification algorithm. The training sample for constructing the affiliation functions of characteristic D is exposed in tab.1.

The results of calculating the class centers of the classification scale for characteristic D are given in table 2. The type of the proposed characteristics of affiliation functions is given on fig.4.

Table 1

A training sample for constructing affiliation functions of the characteristic D

Characteristic values $D, \text{ km}^2$	Function of affiliation $\mu_i(D)$		
	Low	Medium	High
0.09	1.00	0.00	0.00
0.10	0.98	0.02	0.00
0.13	0.66	0.34	0.00
0.17	0.23	0.77	0.00
0.20	0.01	0.98	0.01
0.23	0.00	0.73	0.27
0.27	0.00	0.31	0.69
0.30	0.00	0.01	0.99
0.31	0.00	0.00	1.00

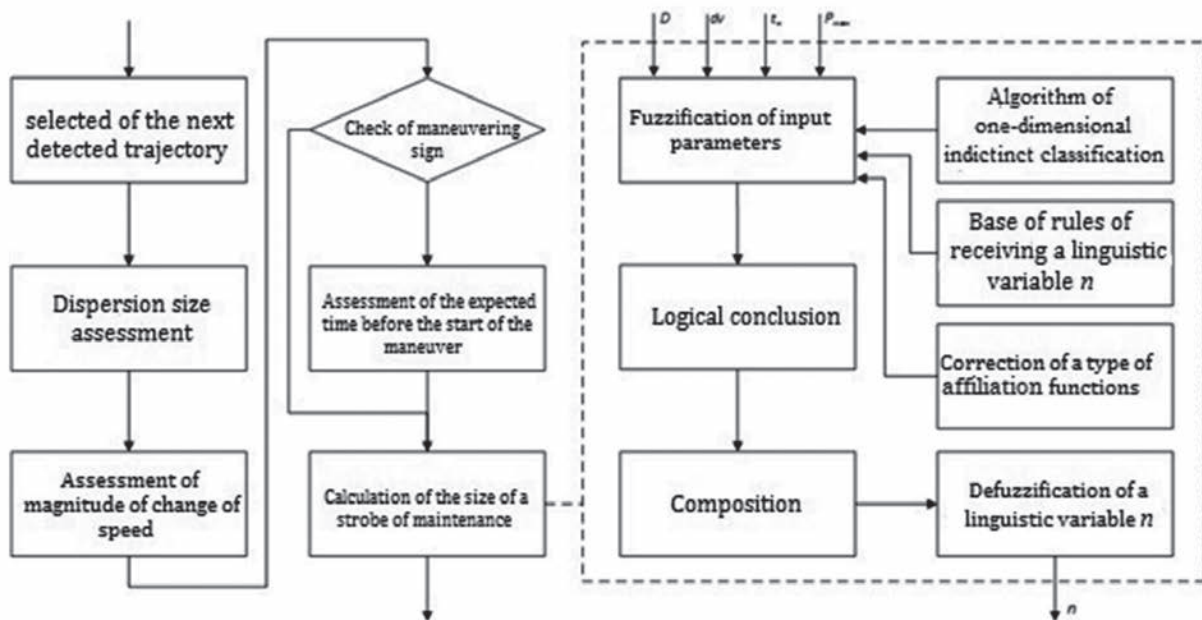


Fig.3. The scheme of an algorithm of formation of a tracking strobe on the basis of an fuzzy logical conclusion

Table 2

The results of calculation of class centers

Characteristic D , km ²		
Low	Medium	High
0.093	0.201	0.308

The procedure of a fuzzification is carried out according to expression:

$$D_f = \max(\mu_1(D) \wedge \mu_2(D) \wedge \dots \wedge \mu_l(D)), \forall D \in \mathfrak{D},$$

where D_f — fuzzy value of the dispersion,
 l — total number of affiliation functions ($l = 3$ for fig.4),
 \mathfrak{D} — domain of definition D ($\mathfrak{D} = [0.09, 0.31]$).

Next, the value of the change in speed dv is calculated for each of the coordinates between the previous and the current step and is reduced to an fuzzy form, then the affiliation functions are formed.

The value of dv is suggested to be estimated by a linguistic variable with terms: LOW (LOW), MEDIUM (MED), HIGH (HIGH). The functions of affiliation to a linguistic variable are determined by using the fuzzy classification algorithm [13]. A training sample for constructing the affiliation functions of the characteristic dv is presented in table 3.

Table 3

A training sample for constructing affiliation functions of the characteristic dv

Characteristic values dv , km/s	Function of affiliation $m(dv)$		
	Low	Medium	High
0.00	0.95	0.05	0.00
0.05	0.30	0.40	0.00
0.10	0.04	0.90	0.06
0.15	0.00	0.40	0.50
0.20	0.00	0.05	0.95

The results of calculating the class centers of the classification scale for the dv characteristic are presented in table 4. The type of proposed affiliation functions is presented on fig.5.

Table 4

The results of calculation of class centers

Characteristic dv , km/s		
Low	Medium	High
0.002	0.101	0.198

The procedure of a fuzzification is carried out according to the expression:

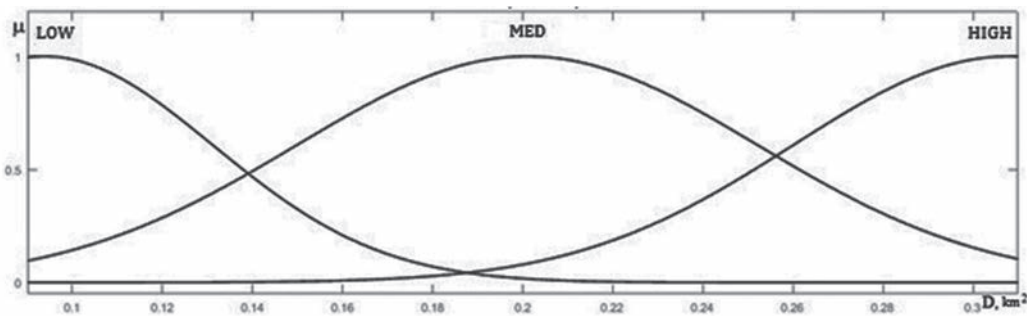


Fig. 4. The functions of affiliation of a linguistic variable D

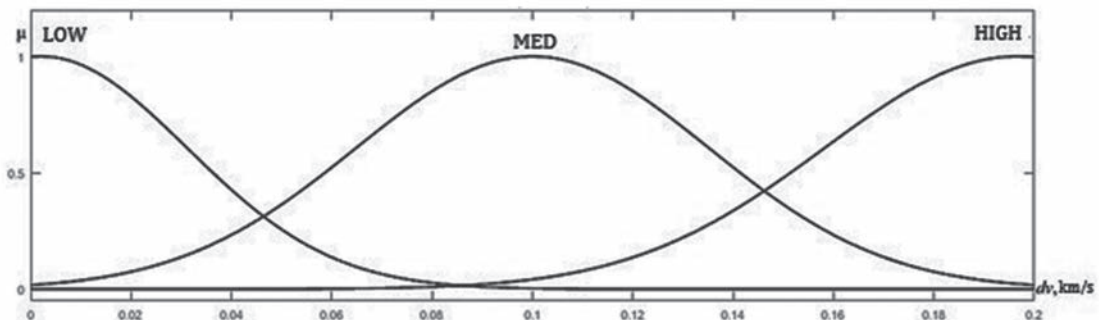


Fig. 5. The affiliation functions of the linguistic variable dv

$$dv_f = \max(\mu_1(dv) \wedge \mu_2(dv) \wedge \dots \wedge \mu_m(dv)), \forall dv \in \Omega,$$

where dv_f – fuzzy value of speed change,
 m – total number of affiliation functions ($m = 3$ for fig.5),
 Ω – domain of definition dv ($\Omega = [0,0.2]$).

Further, the estimated time t_{man} is determined before the start of the target maneuver in the radar field of view (when the execution is found to be the target of a maneuver, the algorithm generates the sign of P_{man} , the value t_{man} is not taken into account in this case (table 7)), fuzzificating and the affiliation function is forming.

The value of t_{man} is suggested to be estimated by a linguistic variable with terms: LOW (LOW), MEDIUM (MED), HIGH (HIGH). The functions of affiliation to a linguistic variable are determined by using the fuzzy classification algorithm. The training sample for constructing the affiliation functions of the characteristic t_{man} is presented in table 5.

Table 5

Training sampling for constructing the affiliation functions of the characteristic t_{man}

Characteristic values t_{man} , sec	Function of affiliation $m(t_{man})$		
	Low	Medium	High
0	0.95	0.05	0.00
3	0.70	0.30	0.00
5	0.30	0.70	0.00
7	0.05	0.90	0.05
10	0.00	0.85	0.15
12	0.00	0.50	0.35
15	0.00	0.05	0.95

In table 6 the results of the calculation of the class centers classification scale for the characteristic of t_{man} are given. The membership functions presented in fig.6.

The procedure of fuzzification in accordance with the expression is carried out:

$$t_f = \max(\mu_1(t_{man}) \wedge \mu_2(t_{man}) \wedge \dots \wedge \mu_k(t_{man})), \forall t_{man} \in \mathfrak{Z},$$

where t_f — the fuzzy value of the time amount before the maneuver,

k — the total number of membership functions ($k = 3$ for fig.6),

\mathfrak{Z} — a domain of definition t_{man} ($\mathfrak{Z} = [0,15]$).

Table 6

The results of the calculation of the class centers

Characteristic of t_{man} , seconds		
Low	Medium	High
0.000	7.521	14.993

By obtaining the linguistic values of the strobe expansion coefficient n which is the key in determining the size of the strobe to implement the fuzzy inference rules were developed [14]. According to the following template based on the table 7 rules are formulated:

IF the dispersion value D is **LOW AND** the value of dv is **HIGH AND** the value of t_{man} is **MED, THEN** the value of n is **MED**.

In fig 7 the dependence of coefficient n from the input value of dispersion, value of velocity changes and value of the time before the start of maneuver is shown. The intensity of the black color reflects the value of n (the darker the color, the smaller the n value).

To perform defuzzification (conversion to definition) of value n the method of center of gravity is used. The ratio for modification to a definite view looks like:

$$\hat{n} = \frac{\int_n n \mu(n) dn}{\int_n \mu(n) dn},$$

where \hat{n} — is a estimation of definite value of n obtained by selecting method of the center of gravity [15].

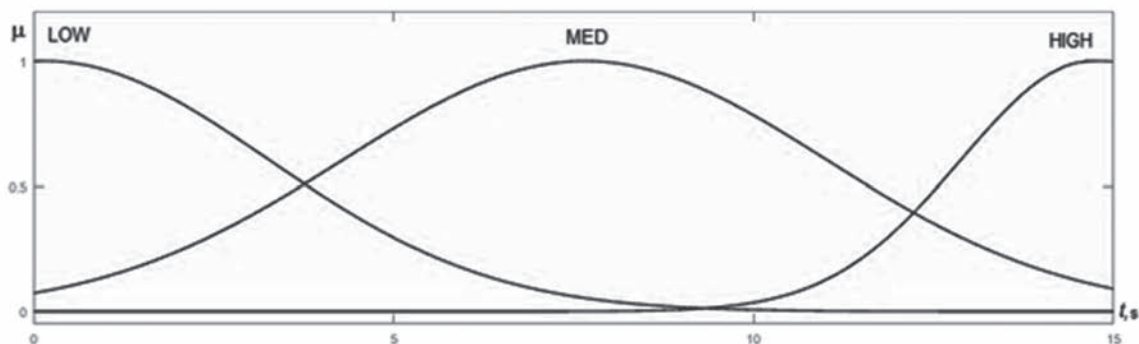
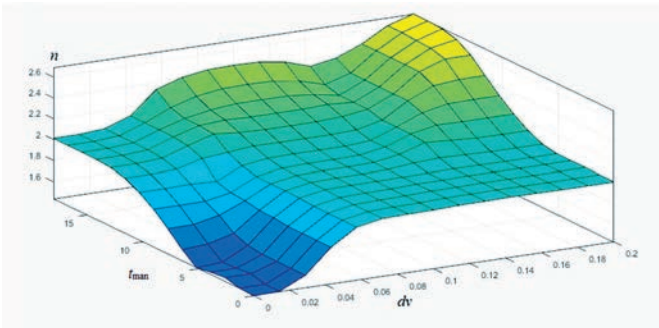


Fig. 6. The membership function of the linguistic variable t_{man}

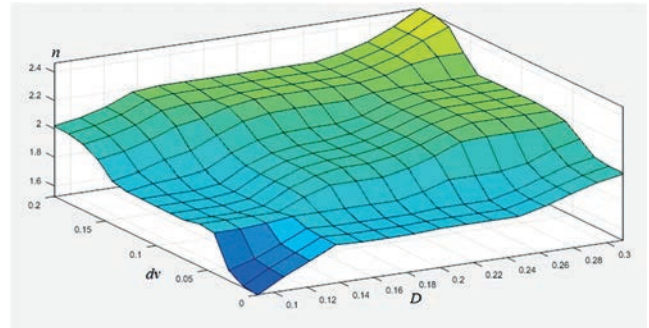
Table 7

The rule base to obtain the value of n

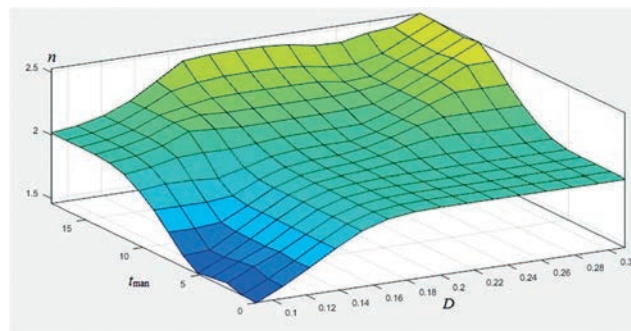
The value of t_{man} , sec	The value of D , km ²								
	LOW			MED			HIGH		
	The value of dv , km/s								
	LOW	MED	HIIGH	LOW	MED	HIIGH	LOW	MED	HIIGH
LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	MED	MED	MED	MED	HIIGH
MED	LOW	LOW	MED	LOW	MED	MED	MED	MED	HIIGH
HIIGH	LOW	MED	MED	MED	MED	HIIGH	MED	HIIGH	HIIGH
P_{man}	MED	MED	MED	MED	HIIGH	HIIGH	HIIGH	HIIGH	HIIGH



a)



b)



c)

Fig. 7. a) the dependence of n on input values of time before the start of the maneuver and the value of the velocity changes;
b) the dependence of n on input values of dispersion and the value of the velocity changes;
c) the dependence of n on input values of time before the start of the maneuver and dispersion

ANALYSIS OF THE ALGORITHM STROBING PERFORMANCE RESULTS

For illustration of the proposed algorithm based on fuzzy logic, consider the results of the operation of the strobing on target. In fig.8 are graphs of the dependency of the probability of missing the mark P_{miss} (fig.8 a) and the probability of ties of false trajectories P_{ft} (fig.8 b) by the intensity of the maneuvering target $\lambda = dv/g$, where dv is the acceleration of the target in the coordinate, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$. In the figures red curves — correspond to an existing algorithm, blue curves — using an algorithm based on fuzzy logic is obtained.

Analysis of the graphs shows that using the proposed algorithm based on fuzzy logic, when accompanied maneuvering target allows to reduce the probability of missing the mark P_{miss} and tie false trajectory P_{ft} of 5–10% compared to existing algorithm.

CONCLUSION

Thus, we can conclude that the solution of the problem of MA tracking in conditions of uncertainty of its behavior in the coverage of the radar with existing methods and algorithms is carried out with significant errors, which leads to entanglement of the trajectories or the tie of a new, and in the worst case, reset the targets with tracking. The algorithm of strobe formation on the basis of fuzzy logical conclusion allows to increase the stability of tracking of the MA and reduce the probability of mark missing and the false trajectories tie.

REFERENCES

1. Kuz'min S.Z. *Osnovy teorii cifrovoj obrabotki radiolokacionnoj informacii* [Basic theory of digital processing radiolocational information]. Moscow: Sovetskoe radio, 1974. 432 p. (In Russian)
2. Vasin V.A., Vlasov I.B., Dmitriev D.D. Fedorova I.B. (Ed.). *Fedorova Informacionnye tehnologii v radiotekhnicheskikh sistemah* [Information technology in radio engineering systems]. Moscow: Moskovskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskij Universitet imeni N.E.Baumana Publ., 2011. 846 p. (In Russian)
3. Bakut P.A., Zhulina Ju.V., Ivanchuk N.A. Bakuta P.A. (Ed.). *Obnaruzhenie dvizhushhihsja ob'ektov* [Detection of moving objects]. Moscow: Sovetskoe radio, 1980. 288 p. (In Russian)
4. Blackman S., Papoli R. *Design and Analysis of Modem Tracking System*. Norwood, MA: Anech House, 1999. 481 p.
5. Leonov A.I., Vasenkov V.I., Leonova A.I. *Modelirovanie v radiolokacii* [Simulation in radiolocation]. Moscow: Sovetskoe radio, 1979. (In Russian).
6. Bar-Shalom Y. Tracking methods in a multitarget environment. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1978. Vol. AC-23. No. 4. Pp. 618-626.
7. Kostoglotov A.A., Lazarenko S.V. Optimal'naja obrabotka radiolokacionnoj informacii pri soprovozhdenii manevrirujushhih celej [Optimal processing of radar data

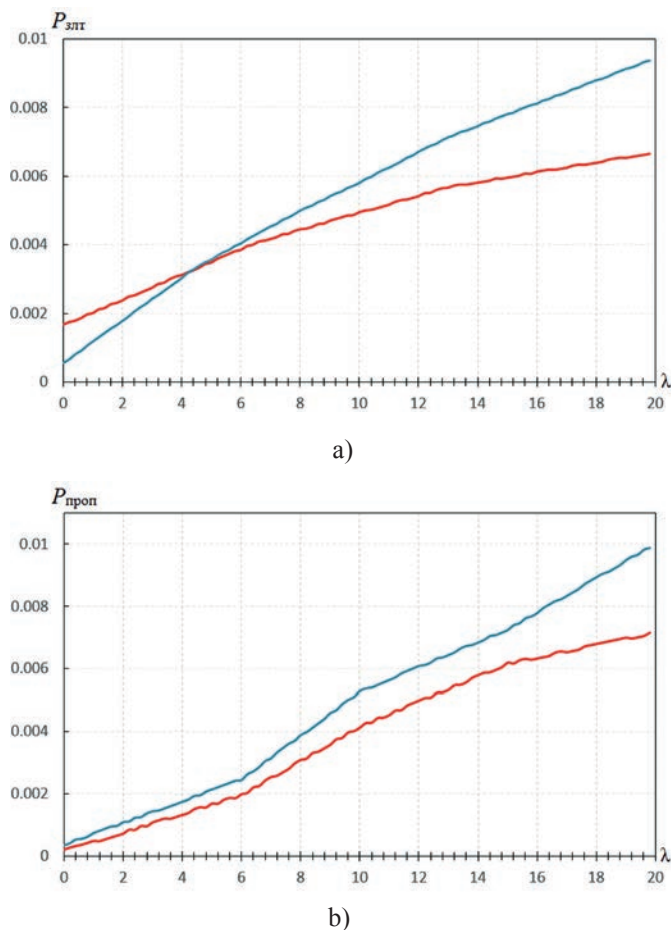


Fig.8. a) A graph of the probability of missing marks from the intensity of the maneuver; b) A graph of the probability of ties false trajectories from the intensity of the maneuver

when tracking maneuvering targets]. *Nauchno-tehnicheskij sbornik «Obshhie voprosy radioelektroniki» (FGUP RNIIRS)*, 2008. No. 1. Pp. 134-145. (In Russian)

8. Savrasov Y.S. *Algoritmy i programmy v radiolokatsii* [Algorithms and programs in radiolocation]. Moscow: Radio i svyaz', 1985. 216 p. (In Russian)
9. Bar-Shalom Y., Li X.R. *Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques*. Storrs, YBS Publishing, 1995. 640 p.
10. Kuz'min S.Z. *Cifrovaja obrabotka radiolokacionnoj informacii* [Digital processing of radiolocation information]. Moscow: Sovetskoe radio, 1967. 398 p. (In Russian)
11. Berg J., Kaymak U., Bergh W.-M. Fuzzy classification using probability-based rule weighting. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE '02* (Honolulu, HI, 12-17 May). 2002. Vol. 2. Pp. 991-996.
12. Meier A., Schinder, G., Werro, N. Fuzzy classification on relational databases. *Handbook of research on fuzzy information processing in databases*. Hershey, New York, 2008. Vol. II. Pp. 586-614.

13. Zadeh L.A. Calculus of fuzzy restrictions. *Fuzzy sets and its application to cognitive and decision processes*. In eds. L.A. Zadeh, K.S. Fu, K. Tanaka, M. Shimura. New York, 1975. Pp. 1-39.

14. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and

its application to approximate reasoning. *Information Sciences*. 1975. Part I. No. 8. Pp. 199-249.

15. Tatumov A.L. *Nejronnye seti v zadachah radiolokacii* [Neural networks in radiolocation problems]. Moscow: Radiotekhnika, 2009. 432 p. (In Russian)

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ СТРОБА СОПРОВОЖДЕНИЯ ПО МАНЕВРИРУЮЩИМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

ПРОРОК Валерий Ярославович,

г. Санкт-Петербург, Россия, val_prorok@mail.ru

ХАЛИКОВ Эльдар Мавлютович,

г. Санкт-Петербург, Россия, hell_2@mail.ru

ОХОТНИКОВ Юрий Юрьевич,

г. Санкт-Петербург, Россия, Georgy_03@mail.ru

ШАЙМУХАМЕТОВ Шамиль Ильдусович,

г. Санкт-Петербург, Россия, 28_172@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: маневрирующие летательные аппараты; стробирование; нечеткий логический вывод; лингвистическая переменная.

АННОТАЦИЯ

Процесс сопровождения маневрирующих летательных аппаратов радиолокационными средствами является сложной задачей, так как осуществляется в условиях неопределенности о характере возможного маневра, что приводит к значительным погрешностям при расчете размера стробов сопровождения. Одним из перспективных направлений преодоления такой неопределенности является использование нечеткого логического вывода.

Целью работы является понижение вероятностей пропуска отметок и завязки ложных траекторий при сопровождении маневрирующих летательных аппаратов с помощью коррекции коэффициента расширения строба.

В последнее время началось активное внедрение новых методов и моделей разработанных на основе нечеткой логики в промышленность и в военное дело. Использование «нечетких систем» позволяет уменьшить ресурсо- и энергозатраты и обеспечивает более высокую устойчивость к воздействию мешающих факторов по сравнению с традиционными системами автоматического управления. Нечеткое управление оказывается особенно актуальным, когда исследуемые процессы являются слишком сложными для анализа с помощью общепринятых методов или когда доступные источники информации интерпретируются некачественно, неточно или неопределенно. Нечеткая логика, предоставляющая эффективные средства отображения неопределенностей и неточно-

стей реального мира, и на которой основано нечеткое явление, ближе к человеческому мышлению и естественным языкам, чем традиционные логические системы.

Аппарат нечетких множеств и нечеткой логики уже давно с успехом применяется для решения задач, в которых исходные данные являются ненадежными и слабо формализованными.

В работе представлен алгоритм формирования строба сопровождения, в котором с использованием лингвистических переменных величин дисперсии ошибок измерения и экстраполяции, изменения скорости движения и предполагаемого времени до начала маневра осуществляется расчет необходимого размера строба повышая вероятность устойчивого сопровождения маневрирующих летательных аппаратов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Пророк В. Я., д.т.н., профессор, профессор Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского;

Халиков Э. М., к.т.н., начальник отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского;

Охотников Ю. Ю., преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского;

Шаймухаметов Ш. И., адъюнкт Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.

Для цитирования: Пророк В. Я., Халиков Э. М., Охотников Ю. Ю., Шаймухаметов Ш. И. Алгоритм формирования строба сопровождения по маневрирующим летательным аппаратам на основе нечеткого логического вывода // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 1 С. 100-107. doi 10.24411/2409-5419-2018-10023



VI федеральная конференция

CRITICAL COMMUNICATIONS RUSSIA 2018

Инновационные цифровые технологии
для обеспечения безопасности государства,
общества, бизнеса

5 апреля 2018

отель «Марриотт Новый Арбат»
Москва, ул. Новый Арбат, д. 32

Организатор:



При поддержке:



Генеральный экспонент:



ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Инновационные цифровые технологии и сервисы на службе государства, общества, бизнеса
- Централизация критических коммуникаций между спецслужбами как драйвер развития цифровой экосистемы
- Интеллектуальное видеонаблюдение и системы распознавания образов в интересах безопасности граждан и бизнеса
- Система распределенных ситуационных центров как основа цифровой трансформации государственного управления
- Системы оповещения: интеграция и взаимодействие систем оповещения различных уровней, перспективы развития КСИОН
- Развитие систем аппаратно-программного комплекса технических средств «Безопасный город» до 2020 г.
- От системы 112 к безопасному региону, оптимизация процессов создания и развития комплексных систем безопасности
- Ситуационный центр как универсальный инструмент для управления и контроля жизнедеятельности субъектов РФ
- Цифровые решения ПМР в интересах служб общественной безопасности и промышленности
- Спутниковые системы на службе систем экстренного реагирования и для организации связи в местах чрезвычайных ситуаций и техногенных катастроф
- Перспективы внедрения в России и мире технологий LTE для решения задач критических коммуникаций

ДОКЛАДЧИКИ



Александр Бучко,
технический директор,
АО «ИТ-Индустрия»



Младен Вратонич,
председатель правления,
TETRA and Critical
Communications
Association (TCCA)



Николай Ильин,
заместитель начальника
управления информационных
систем Спецсвязи,
Федеральная служба
охраны Российской
Федерации: заслуженный
деятель науки РФ,
д.т.н., проф.



Сергей Киреев,
начальник отдела связи
управления инкассации
центра управления наличным
денежным обращением,
ПАО «Сбербанк России»



Валентин Масановец,
заместитель директора НТЦ
«Трансвязьбезопасность»,
АО «Федеральный центр науки
и высоких технологий
«Специальное
научно-производственное
объединение «Элерон»,
заведующий кафедры «Защита
информации», Институт
комплексной безопасности
и специального
приборостроения МИРЭА



Павел Погребинский,
директор департамента
информационных
технологий
и инфраструктуры,
АНО «Оргкомитет
«Россия - 2018»



Игорь Цикорин,
главный
специалист – инженер
электросвязи,
ОАО «Международный
аэропорт Шереметьево»



Юрий Чулюков,
советник управления
отраслевых проектов,
Департамент
информационных
технологий города
Москвы



Людмила Шаталова,
первый заместитель
председателя,
Комитет региональной
безопасности Курской
области



Игорь Шилкин,
начальник Центра
управления в кризисных
ситуациях,
ФГБУ «Всероссийский
центр медицины
катастроф «Защита»
Минздрава России»