

ISSN 2713-3192
DOI 10.15622/ia.2021.20.2
<http://ia.spcras.ru>

ТОМ 20 № 2
60 лет
первого
полета
человека
в КОСМОС

ИНФОРМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ

INFORMATICS AND AUTOMATION



СПб ФИЦ РАН

Санкт-Петербург
2021



INFORMATICS AND AUTOMATION

Volume 20 № 2, 2021

Scientific and educational journal primarily specialized in computer science, automation, robotics, applied mathematics, interdisciplinary research

Founded in 2002

Founder and Publisher

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)

Editor-in-Chief

R. M. Yusupov, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia

Editorial Council

A. A. Ashimov	Prof., Dr. Sci., Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan
N. P. Veselkin	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
I. A. Kalyaev	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Taganrog, Russia
Yu. A. Merkur'yev	Prof., Dr. Sci., Academician of the Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia
A. I. Rudskoi	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia
V. Sgurev	Prof., Dr. Sci., Academician of the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
B. Ya. Sovetov	Prof., Dr. Sci., Academician of RAE, St. Petersburg, Russia
V. A. Soyfer	Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, Samara, Russia

Editorial Board

O. Yu. Gusikhin	Ph. D., Dearborn, USA
V. Delic	Prof., Dr. Sci., Novi Sad, Serbia
A. Dolgui	Prof., Dr. Sci., St. Etienne, France
M. N. Favorskaya	Prof., Dr. Sci., Krasnoyarsk, Russia
M. Zelezny	Assoc. Prof., Ph.D., Plzen, Czech Republic
H. Kaya	Assoc. Prof., Ph.D., Utrecht, Netherlands
A. A. Karpov	Assoc. Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
S. V. Kuleshov	Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
A. D. Khomonenko	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
D. A. Ivanov	Prof., Dr. Habil., Berlin, Germany
K. P. Markov	Assoc. Prof., Ph.D., Aizu, Japan
R. V. Meshcheryakov	Prof., Dr. Sci., Moscow, Russia
N. A. Moldovian	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
V. Yu. Osipov	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
V. K. Pshikhopov	Prof., Dr. Sci., Taganrog, Russia
A. L. Ronzhin	Prof., Dr. Sci., Deputy Editor-in-Chief, St. Petersburg, Russia
H. Samani	Assoc. Prof., Ph.D., Plymouth, UK
V. Skormin	Prof., Ph.D., Binghamton, USA
A. V. Smirnov	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
B. V. Sokolov	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
L. V. Utkin	Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia
L. B. Sheremetov	Assoc. Prof., Dr. Sci., Mexico, Mexico

Editor: I. O. Novikova

Technical editor: M. S. Avstriyskaya

Interpreter: E. N. Mesheryakova

Art editor: N. A. Dormidontova

Editorial office address

14-th line V.O., 39, SPIIRAS, St. Petersburg, 199178, Russia,

e-mail: ia@spcras.ru, web: <http://ia.spcras.ru>

The journal is indexed in Scopus

The journal is published under the scientific-methodological supervision of Department for Nanotechnology and Information Technology of the Russian Academy of Sciences
© St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2021

ИНФОРМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Том 20 № 2, 2021

Научный, научно-образовательный журнал с базовой специализацией в области информатики, автоматизации, робототехники, прикладной математики и междисциплинарных исследований.

Журнал основан в 2002 году

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук»
(СПб ФИЦ РАН)

Главный редактор

Р. М. Юсупов, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Редакционный совет

А. А. Ашимов	академик Национальной академии наук Республики Казахстан, д-р техн. наук, проф., Алматы, Казахстан
Н. П. Веселкин	академик РАН, д-р мед. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
И. А. Каляев	академик РАН, д-р техн. наук, проф., Таганрог, РФ
Ю. А. Меркурьев	академик Латвийской академии наук, д-р, проф., Рига, Латвия
А. И. Рудской	академик РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
В. Сгурев	академик Болгарской академии наук, д-р техн. наук, проф., София, Болгария
Б. Я. Советов	академик РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
В. А. Сойфер	академик РАН, д-р техн. наук, проф., Самара, РФ

Редакционная коллегия

О. Ю. Гусихин	д-р наук, Диаборн, США
В. Делич	д-р техн. наук, проф., Нови-Сад, Сербия
А. Б. Долгий	д-р наук, проф. Сент-Этьен, Франция
М. Железны	д-р наук, доцент, Пльзень, Чешская республика
Д. А. Иванов	д-р экон. наук, проф., Берлин, Германия
Х. Кайя	д-р наук, доцент, Утрехт, Нидерланды
А. А. Карпов	д-р техн. наук, доцент, Санкт-Петербург, РФ
С. В. Кулешов	д-р техн. наук, Санкт-Петербург, РФ
К. П. Марков	д-р наук, доцент, Аизу, Япония
Р. В. Мещеряков	д-р техн. наук, проф., Москва, РФ
Н. А. Молдовян	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
В.Ю. Осипов	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
В. Х. Пшихолов	д-р техн. наук, проф., Таганрог, РФ
А. Л. Ронжин	д-р техн. наук, проф., зам. главного редактора, Санкт-Петербург, РФ
Х. Самани	д-р наук, доцент, Плимут, Соединённое Королевство
В. А. Скормин	д-р наук, проф., Бингемптон, США
А. В. Смирнов	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
Б. В. Соколов	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
Л. В. Уткин	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
М. Н. Фаворская	д-р техн. наук, проф., Красноярск, РФ
А. Д. Хомоненко	д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
Л. Б. Шереметов	д-р техн. наук, Мехико, Мексика

Выпускающий редактор: И. О. Новикова
Технический редактор: М. С. Австрийская

Переводчик: Е. Н. Мещерякова
Художественный редактор: Н. А. Дормидонтова

Адрес редакции

199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д. 39
e-mail: ia@spcras.ru, сайт: <http://ia.spcras.ru>

Журнал индексируется в международной базе данных Scopus

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

Журнал выпускается при научно-методическом руководстве Отделения нанотехнологий и информационных технологий Российской академии наук

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», 2021
Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфир или по кабелю опубликованных в составе печатного периодического издания - журнала «ИНФОРМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ» статей по текущим экономическим, политическим, социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием имени автора статьи и печатного периодического издания журнала «ИНФОРМАТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ»

CONTENTS

Digital Information Telecommunication Technologies

- V. Kalinin, A. Kulakov, A. Pavlov, S. Potryasaev, B. Sokolov
METHODS AND ALGORITHMS FOR THE SYNTHESIS OF TECHNOLOGIES AND
PROGRAMS FOR CONTROLLING THE RECONFIGURATION OF ON-BOARD SYSTEMS OF
SMALL-SIZED SPACECRAFTS 236
- V. Prorok, A. Karytko, A. Goryanskiy, E. Emelyanova
ASSESSMENT OF THE CAPABILITIES OF ORBITAL OPTICAL DEVICES FOR OBTAINING
INFORMATION ABOUT SPACE OBJECTS 270
- V. Nenashev, I. Khanykov
FORMATION OF A FUSED IMAGE OF THE LAND SURFACE BASED ON PIXEL CLUSTERING
OF LOCATION IMAGES IN A MULTI-POSITION ONBOARD SYSTEM 302
- V. Yakimov
PERIODOGRAM ESTIMATING THE SPECTRAL POWER DENSITY BASED UPON SIGNALS'
BINARY-SIGN STOCHASTIC QUANTIZATION USING WINDOW FUNCTIONS 341
- A. Batenkov, K. Batenkov, A. Fokin
FORMING THE TELECOMMUNICATION NETWORKS' CROSS-SECTIONS TO ANALYZE THE
LATTER STABILITY WITH DIFFERENT CONNECTIVITY MEASURES 371

Artificial Intelligence, Knowledge and Data Engineering

- M. Bobyr, A. Arkhipov, A. Yakushev
SHADE RECOGNITION OF THE COLOR LABEL BASED ON THE FUZZY CLUSTERING 407
- Y. Grushko, R. Parovik
FAST PUPIL TRACKING BASED ON THE STUDY OF A BOUNDARY-STEPPED IMAGE
MODEL AND MULTIDIMENSIONAL OPTIMIZATION HOOK-JIVES METHOD 435
- A. Golubinskiy, A. Tolstykh
HYBRID METHOD OF CONVENTIONAL NEURAL NETWORK TRAINING 463

СОДЕРЖАНИЕ

Цифровые информационно-телекоммуникационные технологии

- В.Н. Калинин, А.Ю. Кулаков, А.Н. Павлов, С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов
МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОГРАММ УПРАВЛЕНИЯ
РЕКОНФИГУРАЦИЕЙ БОРТОВЫХ СИСТЕМ МАЛОМАССОРАЗМЕРНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ 236
- В.Я. Пророк, А.А. Карытко, А.С. Горянский, Е.С. Емельянова
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРБИТАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПО ПОЛУЧЕНИЮ
ИНФОРМАЦИИ О КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ 270
- В.А. Ненашев, И.Г. Ханьков
ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА
ОСНОВЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПИКСЕЛЕЙ ЛОКАЦИОННЫХ СНИМКОВ В
МНОГОПОЗИЦИОННОЙ БОРТОВОЙ СИСТЕМЕ 302
- В.Н. Якимов
ПЕРИОДОГРАММНАЯ ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ НА
ОСНОВЕ БИНАРНО-ЗНАКОВОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО КВАНТОВАНИЯ СИГНАЛОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОКОННЫХ ФУНКЦИЙ 341
- А.А. Батенков, К.А. Батенков, А.Б. Фокин
ФОРМИРОВАНИЕ СЕЧЕНИЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ИХ
УСТОЙЧИВОСТИ С РАЗЛИЧНЫМИ МЕРАМИ СВЯЗНОСТИ 371

Искусственный интеллект, инженерия данных и знаний

- М.В. Бобырь, А.Е. Архипов, А.С. Якушев
РАСПОЗНАВАНИЕ ОТТЕНКА ЦВЕТОВОЙ МЕТКИ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ
КЛАСТЕРИЗАЦИИ 407
- Ю.В. Грушко, Р.И. Паровик
БЫСТРЫЙ ТРЕКИНГ ЗРАЧКА, ОСНОВАННЫЙ НА ИССЛЕДОВАНИИ ГРАНИЧНО-
СТУПЕНЧАТОЙ МОДЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ И МНОГОМЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
МЕТОДОМ ХУКА-ДЖИВСА 435
- А.Н. Голубинский, А.А. Толстых
ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ОБУЧЕНИЯ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 463

**60-летнему юбилею первого
космического полета,
совершенного Ю.А. Гагариным,
посвящается**

Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов, А.Л. Ронжин

СПИИРАН И КОСМОНАВТИКА

В современных условиях одними из важнейших направлений научно-технической революции являются информатизация и автоматизация деятельности людей в различных предметных областях. К настоящему времени в рамках указанных направлений особо впечатляющих результатов удалось достичь в такой наукоемкой области исследований, как космонавтика. 12 апреля 2021 года исполняется 60-лет с того дня, когда наш соотечественник, Герой Советского Союза летчик-космонавт Юрий Алексеевич Гагарин впервые в мире совершил пилотируемый полет в космос. Это поистине выдающееся событие, которое позволило открыть эру пилотируемой космонавтики, успешное развитие которой мы наблюдаем каждодневно, получая информацию о деятельности российских и зарубежных космонавтов на Международной космической станции (МКС), используемой как многоцелевой космический исследовательский комплекс. МКС эксплуатируется с конца 1998 года по настоящее время и является совместным международным проектом, в котором участвуют 14 стран: Россия, США, Япония, Канада и входящие в Европейское космическое агентство Бельгия, Германия, Дания, Испания, Италия, Нидерланды, Норвегия, Франция, Швейцария, Швеция.

За прошедшие шесть десятилетий как в нашей стране, так и за рубежом созданы многоотраслевые космические индустрии и соответствующие инфраструктуры, позволяющие на практике с высокой эффективностью использовать широкие и многогранные возможности космических систем и технологий.

Со дня своего образования (19 декабря 1977 г.) Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), на базе которого в 2020 г. был образован Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН, директор д.т.н., профессор Ронжин А.Л.), принимает активное участие в широкомасштабных исследованиях фундаментальных и прикладных

проблем, связанных, прежде всего, с *космической отраслью научных знаний* и с *космическими информационными технологиями и системами*. Данному факту есть несколько объяснений, одно из которых связано с кадровым составом сотрудников института, которые занимались и продолжают заниматься проведением исследований по указанным направлениям.

Сотрудники института являлись военными учеными, прослужившими в течение долгого времени как в Воздушно-Космических Силах РФ, так и в Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, и которые, после окончания службы в Вооруженных силах СССР и РФ, поступили на работу в ЛИИАН (СПИИРАН). Среди них необходимо, в первую очередь, сказать о докторе технических наук, профессоре Пономареве В.М. и члене-корреспонденте РАН, Заслуженном деятеле науки и техники РФ РАН Юсупове Р.М. Они оба были выпускниками ВКА им. А.Ф. Можайского и впоследствии стали директорами соответственно ЛИИАН и СПИИРАН.

Доктор технических наук, профессор В.М. Пономарев был директором ЛИИАН с 1985г. по 1991 г. Под его руководством и с его участием в ВКА им. А.Ф. Можайского и в ЛИИАН было выполнено, в том числе по постановлениям Правительства СССР, более 80 комплексных научно-исследовательских работ и проектов по вопросам создания и повышения эффективности систем управления крылатыми и баллистическими ракетами, ракет-носителями космических аппаратов (КА) и маневрирующих головных частей, а также систем управления как отдельными автоматическими КА (АКА), так и их группировками. По результатам этих работ в 1956–1991 гг. В.М. Пономаревым опубликовано лично и в соавторстве с учениками и коллегами более 30 монографий и учебников для высшей школы, посвященной космическо-управленческой тематике.

Вторым директором СПИИРАН в период с 1991 по 2018 гг. был член-корреспондент РАН Юсупов Р.М., который так же, как профессор Пономарев В.М., был выпускником Военной академии имени А.Ф. Можайского. Юсупов Р.М. является известным ученым в области информатики, информационных технологий и теории управления, основателем и руководителем научных школ по теоретическим основам информатизации общества и по теории чувствительности сложных информационно-управляющих систем. Благодаря работам Юсупова Р.М. анализ чувствительности стал обязательным этапом проектирования информационных систем, систем управления и высокоточных устройств. С его именем и

трудами связано также развитие таких новых научных направлений, как геофизическая кибернетика, квалиметрия моделей, информационная безопасность. Под его научным руководством и при его непосредственном участии с 1991 по 2018 г. был выполнен большой комплекс исследований, связанных с космической тематикой по следующим направлениям:

- разработка новых архитектур аппаратно-программных средств обработки информации, получаемой с космических средств (КСр);

- разработка специального программно-математического и информационного обеспечения (СПМО) автоматизированных систем управления (АСУ) КСр, в том числе – СПМО оценивания, анализа и прогнозирования космической обстановки, СПМО поддержки принятия решений по управлению КСр, моделированию функционирования КСр в различных условиях обстановки;

- разработка технологий космического экологического мониторинга окружающей среды, технологий космической робототехники и трибологии.

В таблице 1 представлены основные НИР и ОКР, связанные с космической тематикой, которые были выполнены сотрудниками СПИИРАН под руководством члена-корреспондента РАН Юсупова Р.М. в период с 1999 г. по 2015 г. Среди данных сотрудников можно, первую очередь, выделить таких ученых, как д.т.н., профессор Городецкий В.И., д.т.н., профессор Лысенко И.В., к.т.н. Гейда А.С., к.т.н. Карсаев О.В., д.т.н. Сорокин Л.Н., д.ф.-м.н., профессор Солдатенко С.А., д.т.н., профессор Зеленцов В.А., д.т.н., профессор Миронов В.И., д.т.н., профессор Соколов Б.В., д.т.н., профессор Охтилев М.Ю, д.т.н., профессор Соколов Б.В., д.т.н., профессор Миронов В.И., д.ф.-м.н. Тараканов А.О. (все перечисленные ученые являются выпускниками ВКА им. А.Ф. Можайского), д.т.н., профессор Павлов А.Н., д.э.н., профессор Верзилин Д.Н. (данные офицеры проходили службу в ВКС и ВКА), д.т.н., профессор Кулаков Ф.М., д.т.н., профессор Тимофеев А.В., д.ф.-м.н., профессор Смоктий О.И., д.т.н., профессор Полонников Р.И.

Последнее время институт активно занимается исследованиями и практическими разработками в направлении создания информационных систем и сервисов для интеграции разнородных информационных ресурсов и программных модулей при мониторинге природных и природно-технологических объектов (ППО) с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). За последние 5 лет институт успешно выполнил более 20 проектов по аналогичной тематике, включая международные проекты, проекты в

интересах федеральных и региональных заказчиков, гранты РФФИ, Российского научного фонда, опытно-конструкторские работы. В таблице 1 приведены названия и тематика некоторых из ранее выполненных СПИИРАН работ по данной космической тематике.

В частности, были выполнены следующие разработки, имеющие отношение к космическим информационным технологиям и системам:

1. При выполнении серии НИР по тематике «Системные исследования по обоснованию приоритетных направлений развития отечественных космических средств и технологий для поэтапного формирования космической системы глобального мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций с учётом интеграции с зарубежными космическими системами» в 2011-2015 г.г. (заказчик – Роскосмос), разработаны:

– концептуальные основы построения интеллектуальной информационной технологии и систем мониторинга и управления природно-технологическими объектами и процессами на основе интегрированного использования наземных и аэрокосмических данных;

– принципы построения и структура комплекса модельно-алгоритмического обеспечения интегрированной обработки разнородных данных и знаний о состоянии природно-технологических объектов и процессов в региональных и международных ситуационных центрах.

2. В 2012-2014 г.г. выполнен международный проект Project ESTLATRUS 2.1/ELRI -184/2011/14 «Integrated Intelligent Platform for Monitoring the Cross-Border Natural-Technological Systems» по Программе приграничного сотрудничества «Estonia-Latvia-Russia cross border cooperation Programme within European Neighborhood and Partnership instrument 2007-2013». В ходе проекта впервые практически апробирована интеллектуальная информационная технология создания распределенных систем мониторинга природно-технологических объектов с визуализацией результатов мониторинга состояния объектов на геоинформационной платформе.

3. В июне 2012 г. на базе СПИИРАН совместно с Федеральным космическим агентством открыт Инновационно-образовательный центр космических услуг. Аппаратно-программная инфраструктура и методическое обеспечение центра позволяют проводить комплексные исследования проблем мониторинга природно-технологических объектов с использованием данных из различных источников, в том числе поступающих от аэрокосмических средств ДЗЗ.

4. С 2013 г. по 2018 г.г. выполнены проекты по грантам РФФИ 13-08-00702, 16-08-00510, в рамках которых разработаны: методология создания интеллектуальных информационных технологий и систем

мониторинга состояния растительного покрова Крайнего Севера, а также программный прототип такой системы с реализацией соответствующих моделей формирования границ зон и подзон растительности выделенных участков территории. Тем самым сформированы методический и технологический задел для выполнения исследований по созданию информационной автоматизированной системы оценивания состояния ППТО и сформированы предпосылки для реализации интегрированной обработки более широкого спектра исходных данных, в том числе материалов гиперспектральной съемки с авиационных и космических носителей.

5. В июне 2015 г СПИИРАН совместно с чешской компанией ChechGlob впервые в отечественной и мировой практике провел эксперименты по выполнению синхронной наземной, авиационной и космической (с отечественного КА «Ресурс-П») гиперспектральной съемки лесного покрова выделенного участка территории и интегрированной обработке полученных данных. Результаты эксперимента свидетельствуют о больших потенциальных возможностях использования новых источников данных и результатов их интегрированной обработки при решении задач мониторинга состояния ППТО.

6. Существенный задел сформирован в рамках работ, направленных на обеспечение экологической безопасности космодрома «Восточный». Основным предметом исследований являлся растительный покров. Оценивались вопросы устойчивости экологической системы в целом. В качестве исходных данных использовались материалы наземных и аэрокосмических измерений спектральных отражательных характеристик растительности и элементов ландшафта в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Разработана технология комплексной обработки материалов мульти-и гиперспектральной аэрокосмической съемки. Технология предусматривает автоматизированный расчет числовых значений индикаторов, описывающих состояние лесного покрова.

7. В проектах, выполненных в 2017-2019 г.г. в интересах Роскосмоса (НИИ ТП) и органов власти субъектов РФ (Санкт-Петербург, Ленинградская и Новгородская области), разработаны методическое обеспечение и программно-технологические решения по каталогизации и заказу материалов космической съемки, созданию и предоставлению тематических сервисов в автоматическом и автоматизированном режимах, интерпретации и визуализации результатов на ГИС – платформе собственной разработки. Создан первый прототип мультивременного анализа разнородных данных в автоматизированном режиме.

Таблица. Проекты СПИИРАН по космической тематике

№	Наименования проектов	Заказчик	Сроки выполнения
1	НИР Разработка программных средств оптимизации планирования наблюдений космической системой.	ФГУП ЦНИИ «Комета»	1999-2003
2	НИР Разработка методов, алгоритмов и программ определения вектора состояния наблюдаемых объектов по угловым измерениям с помощью бортовых средств ИСЗ.	ФГУП «НПО «Полет»	2001-2003
3	ОКР «Прогресс» Разработка модели и программы расчета локальных уровней ионизирующих излучений космического пространства, Воздействующих на бортовую аппаратуру в месте ее установки, с учетом реальной конструкции КА и компоновки КА». Госконтракт №28/2002 от 01.01.2002	ЦГУП ГНЦ РКЦ «ЦСКБ «Прогресс»	2002-2003
4	Проект: ОКР «Формирование данных о текущем и прогнозируемом состоянии космической среды» Договор №26/10 от 02.08.2004 г.	ФГУП ЦНИИ «Комета»	2004-2005
5	Составная часть ОКР «Разработка программного обеспечения для расчёта поглощённых доз методом Монте-Карло при прохождении ионизирующего излучения через материалы КА. Договор № 14Ф141ТЗ 250-2208-08 от 15.10.2008г.	ОАО «ИСС им. академика М.Ф. Решетнева»	2008-2009
6	ОКР: «Оценка стойкости аппаратуры 14В18 и 14В120 к воздействию заряженных частиц космического пространства по одиночным сбоям и отказам и обоснование рекомендаций по её обеспечению» Договор № 14Ф138/145Д3211-1-09 от 01.01.2009 г.	ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И.Берга»	2009

Продолжение таблицы

7	Создание программного комплекса для анализа и обоснования планов и графиков пусков на СК 8П882К и 8П882-4Ф. Договор №РН-114/09 от 26.05.2009 г.	ФГУП «ЦЭНКИ»	2009
8	Составная часть ОКР «Моделирование мощных радиоимпульсных воздействий и оценка стойкости произвольного радиоприёмного устройства методом «стандартного приёмника» Договор №14Ф 138/145 ДЗ211-3-10 От 01.02.2010	ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И.Берга»	2010
9	Составная часть ОКР «Разработка программного комплекса для анализа и обоснования планов и графиков пусков на СК 8П882К и 8П882К-4Ф по итогам опытной эксплуатации»	ФГУП «ЦЭНКИ»	2010
10	Составная часть ОКР «Разработка и создание программного комплекса для автоматизации планирования работ на заправочной станции 11Г12 космодрома Байконур»	ФГУП «ЦЭНКИ»	2010
11	Составная часть ОКР Разработка и создание программного комплекса для поддержки планирования процессов подготовки и запуска космических аппаратов»	ФГУП «ЦЭНКИ»	2011
12	ОКР «Разработка программно–математического обеспечения и нормативно–отраслевых документов для управления жизненным циклом оборудования комплекса стендов экспериментальной базы РКП»	ФГУП ЦНИИМАШ	2011
13	ОКР «Разработка программно–математического обеспечения для управления жизненным циклом оборудования комплекса стендов экспериментальной базы ракетно–космической промышленности». Договор №2105-18-2011 от 26.02.2011	ФГУП ЦНИИМАШ	2011
14	НИР Разработка концепции и базовых компонент интегрированного программного комплекса поддержки планирования запусков КА и процессов подготовки и пуска РКН с отечественных космодромов	ФГУП ЦНИИМАШ	2011

Продолжение таблицы

15	Составная часть ОКР Разработка программного обеспечения для расчета поглощенных доз электронов и протонов ионизирующих излучений космического пространства в приборах разработки ОАО «НПП КП «Квант» с учетом реального расположения в космическом аппарате»	ОАО «НПП КП «Квант»	2012
16	СЧ НИР «Роса» «Разработка принципов построения перспективных архитектур и программно-технических средств получения и обработки данных от орбитальных группировок МКА в режиме непосредственного обеспечения ТВД для комплексов информационной поддержки и автоматизации функциональной деятельности командного состава с использованием концепции сетцентрического управления войсками». Договор № 5-12/РЭТ от 11.02.2012 г.	МГТУ им. Н.Э. Баумана	2012-2013
17	СЧ НИР «Эстафета» «Прогнозные исследования в области проблем развития когнитивной геопрограммной информационной поддержки процессов принятия решений для систем управления перспективных робототехнических комплексов вооружения различного базирования». Контракт № 64/СМ/2012 от 05.12.2012 г.	ФГБУ РАРАН	2012-2013
18	СЧ ОКР «Росанка» «Обеспечение информационно-технического взаимодействия единой информационно-аналитической системы ВС РФ с программно-аппаратным комплексом функциональной системы освещения обстановки ВМФ. Шифр «Алеврит». Контракт № 850/12-РАН от 10.05.2012 г.	ОАО НИИ ТП	2012-2013

Продолжение таблицы

19	Составная часть НИР «Разработка методического и программного обеспечения расчета и анализа надежностных характеристик бортовой аппаратуры маломассогабаритных космических аппаратов на различных этапах жизненного цикла» в рамках Программы Союзного государства «Разработка космических и наземных средств обеспечения потребителей России и Беларуси информацией дистанционного зондирования Земли» ШИФР («Мониторинг-СГ»)	ФГУП ГКНПЦ имени М.В. Хруничева	2013-2017
20	ОКР Разработка комплекса методик и прототипа программного обеспечения для решения задач расчета, анализа и оптимизации показателей качества функционирования АСУ КА в нормальных условиях, а также при различных сценариях деградации ее структур.	ФГУП ЦНИРТИ им. академ ика А.И. Берга.	2012-2014
21	Международный проект приграничного сотрудничества Россия-Латвия-Эстония. Интегрированная интеллектуальная платформа мониторинга трансграничных природно-технологических комплексов на основе наземно-космического мониторинга	Программа ЕС ELRI- 184	2013-2017
22	Разработка и исследование интеллектуальной информационной технологии проактивного мониторинга и управления сложными объектами с использованием наземных и космических средств контроля их состояния»	Грант РФФИ	2013– 2015
23	Интеллектуальная информационная технология оперативного мониторинга и упреждающего моделирования наводнений с использованием космической съемки и с доступом к результатам через геопорталы	Грант РФФИ	2014
24	Разработка и исследование методологии построения и прототипа информационной автоматизированной системы интегрированного наземно-космического мониторинга динамики растительного покрова Крайнего Севера	Грант РФФИ	2014

8. В проекте, финансируемом Российским научным фондом, в 2017-2019 г.г. разработана система мониторинга и оперативного прогнозирования речных наводнений с использованием данных ДЗЗ и комплексного моделирования. Действующий прототип системы успешно протестирован на реке Северная Двина с предоставлением результатов службам МЧС, Росгидромета, ИОГВ Архангельской и Вологодской областей.

9. В 2018 г. Минкомсвязи России зарегистрировало в реестре отечественного ПО разработанную участниками проекта геоинформационную платформу «Регион-В», которую предполагается использовать в качестве базового решения при создании Веб-ГИС для автоматизированного формирования и предоставления тематических продуктов и сервисов потребителям РФ и РБ. Разработка данной платформы вошла в число лучших результатов Отделения информационных технологий и нанотехнологий РАН за 2018 г.

10. В течение последних 15 лет участниками проекта активно развиваются фундаментальные положения теории управления структурной динамикой сложных систем и квалиметрии моделей и полимодельных комплексов, которые предполагается использовать и развивать в проекте в качестве базовой методологии для создания технологий автоматизации интеграции разнородных моделей и программных модулей обработки данных и оценивания состояния ППТО. Основные положения по данным направлениям отражены более чем в 100 научных трудах и монографиях, опубликованных, в том числе, в высокорейтинговых российских и зарубежных журналах. В 2018 г. вышла монография (Микони С.В., Соколов Б.В. Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. – М.: РАН, 2018, 314 с.), обобщающая разработки в данном направлении. Участники проекта неоднократно выезжали с докладами на международные конференции и совещания по проблемам разработки информационных технологий и сервисов с использованием данных ДЗЗ (IGARSS 2012, 2015, 2018, LPS 2016, ISPRS 2016, ИЗМ 2012-2018; HMS 2012-2018; ЕСMS 2013-2018, и др.) и владеют знаниями состояния мирового уровня разработок по предлагаемой тематике. В целом, к числу основных полученных фундаментальных результатов по предлагаемой тематике относятся методология, методы и модельно-алгоритмическое обеспечение мониторинга и проактивного управления состоянием природных и природно-технологических объектов с использованием данных ДЗЗ, базирующиеся на разрабатываемом сотрудниками СПИИРАН новом научном направлении – квалиметрии моделей и полимодельных комплексов. Основным практическим результатом,

который может найти применение и развитие в проекте, является разработка программно-технологических решений и первых прототипов интеллектуальной информационной платформы создания и предоставления тематических сервисов на основе интегрированной обработки наземно-космических данных. Платформа обеспечивает совместное функционирование модулей заказа, получения и обработки необходимых наземно-космических данных; тематических модулей расчета показателей состояния ППТО; интерпретации и визуализации результатов. Основные принципы функционирования платформы – максимальная автоматизация, территориальная распределенность используемых информационных ресурсов и отдельных программных модулей, а также простота для пользователя.

В качестве данных ДЗЗ используются материалы авиационных (в т.ч. с БПЛА, коптеров) и космических съемок, в том числе данные:

- с отечественных КА «Ресурс П -1,2,3», «Канопус – В», включая имеющийся уникальный опыт обработки материалов гиперспектральной съемки для мониторинга лесных территорий, апробированный при проведении международных экспериментов;

- с зарубежных КА типа Sentinel, LandSat (оптических и радарных), а также коммерческие данные высокого пространственного разрешения, и др.

При выполнении работ по космической тематике в СПИИРАН неоднократно приглашались руководители космической отрасли и космонавты для консультаций и оценки качества выполненных работ. На рисунках 1-5 представлен ряд фотографий, на которых изображены моменты таких встреч. На рисунке 6 показана фотография участников Заседания Ученого совета СПИИРАН, посвященного 50-летию космонавтики (14 апреля 2011 г.). На рисунке 7 представлено фото сотрудников СПИИРАН на Байконуре (2008 г.).

В настоящее время в РФ широким фронтом ведутся работы по внедрению результатов космической деятельности (РКД) во все сферы жизнедеятельности. Главное направление работ по использованию РКД – максимальная интеграция результатов космической деятельности с реальными социально-экономическими процессами, протекающими в регионах, создание качественно новой региональной навигационно-информационной инфраструктуры, обеспечивающей объективный и комплексный мониторинг основных отраслей экономики – сельское, водное, лесное хозяйство, транспорт, строительство, природопользование, территориальное планирование,

градостроительство, жилищно-коммунальный и топливно-энергетический комплекс и другие.

Вклад космических систем в развитие различных отраслей может составлять от 50% (мониторинг сельского хозяйства, лесного хозяйства) до 95% (при использовании единого навигационного поля, системы единого времени в таких отраслях хозяйства; как транспортные интермодальные перевозки, управление в чрезвычайной обстановке).

Использование РКД в общем случае включает: использование данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ); использование спутниковой навигации; использование систем космической связи; использование космической инфраструктуры.

Эффективная реализация РКД предполагает переход от внедрения отдельных космических информационных технологий, продуктов и услуг к их интеграции не только между собой, но и с существующими наземными системами мониторинга СОТО. Данное направление деятельности является весьма перспективным, и после образования СПб ФИЦ РАН на базе СПИИРАН вопросы использования РКД применительно к различным областям сельского хозяйства и проблем экологии и экологической безопасности приобретают особую актуальность и научную значимость. У СПИИРАН уже есть положительный опыт решения таких междисциплинарных проблем, приобретенный в ходе совместных работ в рамках Северо-Западного Центра аэрокосмического мониторинга, который был сформирован по инициативе руководства ГУАП и СПИИРАН в 2010-2012 годах. На рисунке 8 представлена структура данного Центра.

В заключение отметим, что даже здание, где сегодня размещается СПИИРАН, имеет свою уникальную предысторию. В свое время в здании института находились школы: с 1856 до 1918 г. известная школа К. Мая, с 1918 г. до 1977 – средняя общеобразовательная школа. В школе в свое время учились два космонавта (рис.9): дважды Герой Советского Союза Гречко Г.М. (1947-1948) и Герой России Борисенко А.И. (1971-1979). В связи с этим событием в институте установлена мемориальная доска (рис. 9).

В шестидесятилетний юбилей космонавтики СПб ФИЦ РАН активно развивает свою деятельность в области космических информационных систем и создает аппаратно-программную инфраструктуру для проведения междисциплинарных проектов по мониторингу, прогнозированию и поддержке принятия решений по управлению развитием территорий, предоставления информационных сервисов по моделированию природных и антропогенных процессов с применением многослойных пространственных данных от наземных и аэрокосмических источников.



Рис. 1. Встреча Юсупова Р.М. и летчиком-космонавтом Афанасьевым В.М. (2007 г.)



Рис. 2. Встреча с лётчиком-космонавтом Г.М. Гречко СПИИРАН 2009 г.



Рис. 3. Космонавт Елисеев А.С. на 25-лети SPIIRAN (январь 2003 г.)



Рис. 4. Космонавт, чл.-кор. РАН Батурин Ю.М. в Музее истории SPIIRAN и школы К. Мая (2011 г.)



Рис. 5. Юсупов Р.М. с руководителем Федерального космического агентства
Остапенко О.Н.



Рис. 6. Заседание Ученого совета СПИИРАН, посвященное 50-летию
космонавтики (14 апреля 2011 г.). Первый ряд слева направо: Попович В.В.,
Петров П., академик БАН Сгурев В. (Болгария), Юсупов Р.М., Мухин О.П.,
Ковалев А.П., Ткач А.Ф.



Рис. 7. Сотрудники СПИИРАН (Карсаев О.В., Коноуший В.Г., Козлов В.В.), участники работ по автоматизации технологических процессов подготовки и пуска ракеты-носителя «Протон» на Байконуре (2008 г.)



Рис. 8. Обобщенная структура Северо-Западного Центра аэрокосмического мониторинга



Рис. 9. Мемориальная доска и фотографии космонавтов

В.Н. Калинин, А.Ю. Кулаков, А.Н. Павлов, С.А. Потрясаев,
Б.В. Соколов

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОГРАММ УПРАВЛЕНИЯ РЕКОНФИГУРАЦИЕЙ БОРТОВЫХ СИСТЕМ МАЛОМАССОРАЗМЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Калинин В.Н., Кулаков А.Ю., Павлов А.Н., Потрясаев С.А., Соколов Б.В. Методы и алгоритмы синтеза технологий и программ управления реконfigurацией бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов.

Аннотация. В современных условиях в сфере создания и применения существующих и перспективных космических средств (КСр) приобретают особую актуальность вопросы автономности и живучести при разработке и эксплуатации маломассоразмерных космических аппаратов (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Специфика МКА заключается в том, что к процессу их создания трудно напрямую применить стандартную практику использования системы обеспечения надежности, принятую в ракетно-космической промышленности, из-за отсутствия возможности обеспечить полное структурное резервирование его бортовых систем (БС), связанное с массового-габаритными и другими ограничениями. В этом случае особую актуальность приобретают задачи разработки модельно-алгоритмических способов и подходов к обеспечению требуемого уровня показателей структурной надежности, живучести и, в целом, эффективности функционирования БС МКА. Проблема повышения уровня показателей автономности, живучести, эффективности функционирования сложных технических объектов (СТО), к которым, в частности, относятся МКА, в научной литературе рассматривается в совокупности с решением задач контроля, оценивания и технического диагностирования состояния СТО, проведения реконfigurации (структурной, функциональной, структурно-функциональной) структур СТО, управления ее резервами, альтернативного и многорежимного управления, анализа отказоустойчивости и катастрофоустойчивости СТО. Однако, все перечисленные исследования носят разрозненный и разобщенный характер как на методологическом, так и методическом и технологическом уровнях.

В статье приводится обобщенное описание разработанных авторами комбинированных методов и алгоритмов решения задач синтеза технологий и программ управления реконfigurацией БС для повышения живучести МКА. При этом данные задачи и решаются не изолированно, а комплексно в рамках общей проблемы проактивного управления структурной динамикой МКА с использованием, либо без использования средств НКУ, что обеспечивает оперативность, обоснованность, полноту, замкнутость и непротиворечивость синтезируемых управленческих решений. Новизна предложенного в статье подхода состоит в том, что ее авторы, базируясь на сформулированных ими концепциях комплексного (системного) моделирования, проактивного управления структурной динамикой БС МКА, а также интеллектуализации процессов проактивного управления БС МКА, разработали методы и алгоритмы синтеза технологий и программ управления реконfigurацией БС МКА, обеспечивающие, во-первых, ситуационный выбор оптимальной последовательности выполнения операций и распределения ресурсов МКА с использованием и без использования средств НКУ, и, во-вторых, эффективное парирование не только расчетных, но и нерасчетных аварийных полетных ситуаций (АПС), а также оперативное восстановление работоспособности его БС. Конструктивность предложенного подхода иллюстрируется на примере решения задачи гибкого перераспределения задач обработки информации между БС МКА и НКУ МКА.

Ключевые слова: синтез технологий управления, проактивное управление реконfigurацией, показатели живучести и эффективности функционирования маломассоразмерного космического аппарата

1. Введение. Одной из основных особенностей таких сложных технических объектов (СТО), как космические аппараты (КА), является то, что их параметры и структуры на различных этапах жизненного цикла изменяются под действием объективных и субъективных, внутренних и внешних причин, или их комбинаций. Другими словами, на практике приходится постоянно сталкиваться со структурной динамикой КА в целом и его бортовой аппаратуры (БА), в частности. В этих условиях для повышения (сохранения, восстановления) уровня работоспособности и возможностей КА необходимо осуществлять управление их структурами. Широкое распространение на практике получил такой вариант управления структурами КА, как реконфигурация [1-4].

Реконфигурация бортовых систем (БС) КА – это, в общем случае, процесс изменения их структуры, параметров, технологий функционирования в целях сохранения, восстановления (повышения) до требуемого уровня значений показателей работоспособности и эффективности КА, либо обеспечения минимального снижения уровня значений указанных показателей при деградации функций, соответствующих БС и в целом КА. При этом в общем случае должны рассматриваться следующие типы структур: структура целей, функций и задач, решаемых БС КА; их техническая и топологическая структура; структура программно-математического и информационного обеспечения БС КА; структура технологии управления БС КА [5-7].

Для определенности в статье в качестве основного объекта исследования рассматриваются не вообще абстрактные КА, а класс маломасштабных КА (МКА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Специфика МКА заключается в том, что к процессу их создания трудно напрямую применить практику использования системы обеспечения надежности, принятую в ракетно-космической промышленности и состоящую в проведении тщательной полноразмерной наземной экспериментальной отработки МКА и его систем, использовании систем выборочного производственного контроля и управления качеством продукции крупного серийного производства, в применении полного структурного резервирования, исключающего полный отказ МКА при отказе любого электрорадиоизделия и даже отдельного прибора. В этом случае особую актуальность приобретают задачи разработки модельно-алгоритмических способов и подходов к обеспечению требуемого уровня показателей структурно-функциональной надежности, живучести и, в целом, эффективности функционирования БС МКА [8]. В широком смысле под *структурно-функциональной живучестью* МКА понимается такое свойство рассматриваемого объекта, которое позволяет ему в условиях непредска-

зуюемого воздействия возмущающих факторов (например, факторов космического пространства) сохранять в определенных пределах качество своего целевого функционирования (или восстанавливать такую способность) путем изменения (формирования) соответствующих параметров и структур(конфигураций). Важным и неотъемлемым условием изучения возможностей МКА является проведение анализа и оценивания архитектуры его структурно-функциональных состояний, описывающих как технические, так и технологические особенности управления МКА.

Далее под показателями живучести и эффективности функционирования МКА будем понимать, как структурно-функциональные, так и структурно-технологические показатели, а также показатели качества и эффективности распределения функции управления между БС МКА при их конфигурации (реконфигурации) и выполнения поставленных перед МКА целевых задач. В отчете [8] приведены примеры конкретных показателей структурно-функциональной живучести БС МКА, в качестве которых рассматривались коэффициенты структурной живучести и структурной деградации БС МКА, интегральные показатели структурно-функциональной живучести и деградации БС МКА, для расчета которых использовалась предложенная профессором Павловым А.Н. концепция генома структуры БС МКА.

Цель написания данной статьи состоит в обобщенном описании разработанных авторами новых методов и алгоритмов синтеза технологий и программ управления реконфигурацией БС МКА, обеспечивающих (в отличие от существующих подходов), во-первых, исходя из поставленных целей программы полета, оперативный ситуационный выбор оптимальной последовательности выполнения операций и распределения ресурсов МКА с использованием и без использования средств наземного комплекса управления (НКУ), и, во-вторых, эффективное парирование не только расчетных, но и нерасчетных аварийных полетных ситуаций (АПС), а также оперативное гарантированное восстановление работоспособности его БС.

2. Современное состояние исследований задач управления реконфигурацией сложных технических объектов. В данном подразделе проведем критический анализ существующих подходов к решению проблем управления реконфигурацией сложных технических объектов, одновременно предполагая, что МКА и его БС относятся к указанному классу объектов. Известно, что при решении проблемы повышения сроков активного функционирования и эффективности применения СТО в условиях воздействий возмущающих факторов естественного и искусственного происхождения с использованием концепции проактивной компенсации деструктивных воздействий внешней среды должны рас-

смагиваться следующие этапы управления СТО: учёт и анализ особенностей и специфики функционирования СТО; мониторинг текущего состояния; оперативное оценивание количественных и качественных показателей целевых и информационно-технических возможностей СТО для выбора обоснованного плана реконфигурации его основных структур. В самом общем случае реконфигурация СТО – это процесс изменения структурно-параметрических характеристик объекта в целях сохранения, исправления (или повышения) до требуемого уровня значений показателей эффективности СТО, либо обеспечения наименьшего снижения уровня значений указанных показателей при ухудшении функций, соответствующих ЭП СТО [1-5,8].

Переходя от СТО уже конкретно к БС МКА, следует указать, что в последние десятилетия в широком спектре задач современной космической кибернетики [3] сформировалось новое направление исследований, связанное не с традиционным формированием управляющих воздействий на элементы космического аппарата (КА) при выполнении им целевых задач информационного взаимодействия с элементами окружающей физической среды, а с управлением структурой бортовых и наземных аппаратно-программных комплексов в условиях различных возмущающих воздействий в интересах эффективного решения поставленных целевых задач функционирования КА.

При этом под современной космической кибернетикой будем понимать междисциплинарную науку о проактивном (упреждающем) управлении разнотипными группировками КА как сложными подвижными системами, предназначенными для информационного, вещественного и энергетического взаимодействия с окружающей средой и/или другими подобными системами [3].

При этом важное место среди данных задач занимают задачи реконфигурации бортовых систем КА [5].

Как правило, при решении задач реконфигурации БС МКА применяют технологию «слепой» реконфигурации, в рамках проведения которой при нарушениях функционирования соответствующих элементов и подсистем (ЭП) БС МКА с целью сохранения наиболее существенных функций БС МКА или допустимых условий, влияющих на работоспособность, отказываются от других функций или части работоспособных элементов. Среди технологий «слепой» реконфигурации [3-8] принято выделять три варианта.

Вариант 1. Множество задач, которые выполняют ЭП БС МКА, [5] разбивается на классы с равными характеристиками. Каждый класс задач решается на одном ЭП. В случае отказа ЭП выполняемый им класс задач передается на ЭП, где решаются задачи с наиболее низкими предпочтениями. В случае невозможности решения задач

объединенных классов, задачи класса с низким предпочтением снимаются с решения.

Вариант II. В отличие от рассмотренного варианта I ЭП осуществляют информационный обмен посредством некоторой сети передачи данных [3,8]. Каждый ЭП имеет аппаратно-программные средства, а БС МКА – общие ресурсы для решения заданного множества целевых задач программы полета. Причем ЭП могут быть специализированными (выполнять некоторую функцию) или универсальными (несколько функций БС). Для выполнения задач программы полета имеется набор процедур. В данных условиях обобщенный вариант реконфигурации БС МКА [3,8] можно представить следующим образом.

С учетом технологических, технических и ресурсных ограничений в начальный момент времени задачи и потоки информационного обмена, называемые собственными, закрепляются за ЭП БС МКА [4,5,8]. В случае отказа некоторого множества ЭП БС МКА объект переходит в другое макроструктурное состояние. При этом предлагаются два алгоритма реконфигурации.

Алгоритм 1 – собственные задачи и связанные с ними информационные потоки отказавших ЭП перераспределяются между работоспособными ЭП.

Алгоритм 2 - в новом макроструктурном состоянии осуществляется перепланирование всех решаемых БС МКА задач.

Для повышения **живучести** БС МКА по результатам координационного планирования осуществляется итоговое размещение в различных ЭП резервных копий процедур выполняемых функций. При переходе БС МКА в другое макросостояние в соответствии с координационным планом осуществляется активизация резервных копий процедур работоспособными ЭП.

Вариант III. Предлагается задачу реконфигурации БС МКА в условиях действия деструктивных воздействий решать с применением методов в рамках многоэтапного стохастического программирования [5,8]. При этом выбор начальных планов распределения задач осуществлять таким образом, чтобы последующие результаты координационного планирования позволили рационально использовать ресурсы БС МКА, необходимые для компенсации неблагоприятных деструктивных воздействий.

В последнее время появился целый ряд исследований, базирующийся на байпасном подходе. Идея данного подхода состоит в том, чтобы при возникновении аномальной полетной ситуации (АПС) использовать обходные (альтернативные, возможные) пути реализации

основных функций БС МКА. В основе байпасного подхода лежит методология адаптивно-компенсаторной регенерации функций управления БС МКА, представленная в работах [1-2], либо методология адаптивно-вариабельного управления полётом МКА, представленная в работах [9,10]. В рамках первой из указанных методологий основная управленческая задача состоит в том, чтобы осуществить нейтрализацию последствий, вызванных отказами ЭП, для обеспечения живучести БС МКА с возможностью реанимации целевого функционирования [1-2]. При этом живучесть БС МКА может обеспечиваться за счёт байпасов, формируемых на основе структурных, функциональных, информационных, временных ресурсов объектов. Вместе с тем, при формировании байпасов можно задействовать естественные ресурсы, присущие некоторым системам по определению, или возникающие при целенаправленном взаимодействии различных подсистем (синергетического типа). В самом общем случае в качестве байпасов могут выступать: байпасные каналы в подсистемах объектов, байпасные контуры в составе объекта, резервные БС МКА как байпасы для выполнения целевых задач космической системы наблюдения.

В ряде зарубежных работ предлагаются подходы по своему содержанию близкие к описанному байпасному подходу [11-16]. В настоящее время там особой популярностью пользуется концепция FDIR (Fault Detection (Обнаружение (отказов)), Isolation (Локализация) and Recovery (Восстановление)). Исследования и разработки данной концепции сконцентрированы на системном уровне беспилотных космических аппаратов: внедрение инновационных механизмов наряду с апробированными методами стандартного FDIR, которые позволили бы снизить количество переходов в безопасные режимы и увеличить время работы МКА по назначению [11,15]. В иностранной литературе дается много определений механизмов FDIR, но, как правило, современные FDIR системы выполняют следующие задачи [11, 15]: обнаружение неисправностей, то есть определение присутствия ошибок в системе и времени их возникновения; локализация неисправности (и ее классификация, то есть определение типа, критичности и местонахождения неисправности); устранение неисправности, то есть выбор наилучших действий по восстановлению с учётом критичности неисправности и возможных последствий.

Исходя из особенностей проектирования МКА, традиционные функции FDIR системы организованы по иерархическому принципу. Большинство исследований, связанных с FDIR системами, концентрируются на работе по обнаружению отказов на уровне составных частей или бортовых систем (БС) (уровень 0 – 3), например, определения неисправного рулевого двигателя или двигателей-маховиков. На уровне БС

в исследованиях уделяют основное внимание подсистеме энергопитания или системе управления движением. Исследования лишь немногих авторов выходят за пределы задач обнаружения и локализации отказов на уровне БС с учетом её восстановления.

Новый импульс в развитии концепция FDIR системы получила в настоящее время за счет обогащения ее технологиями киберфизических систем и промышленного Интернета вещей, основные элементы которых представлены в работах [17-19]. Для того, чтобы данные технологии можно было реализовать в ракетно-космической сфере они должны быть также дополнены новыми технологиями решения задач планирования и составления расписания работы бортовых систем КА и других классов летательных аппаратов (ЛА), о которых речь идет в работах [20-25].

Методика вариабельного управления сложным процессом – это способ, заключающийся в проведении ситуационной адаптации управления полётом МКА, обнаружением синергетических явлений, определением влияния закономерностей их самоорганизации и саморазвития в процессах для равномерности и уменьшения интенсивности расхода ресурсов, а также получения новых дополнительных ресурсов. При этом ситуационная адаптация - это проактивное управление путём выбора с учётом текущего состояния БС одного из заранее разработанных вариантов развития бортовых процессов с целью наиболее эффективного ресурсного обеспечения полёта.

Завершая анализ существующих подходов, требуется указать, что все они носят достаточно несогласованный бессистемный характер. Это выражается, прежде всего в том, что авторам представленных подходов не удалось с единых позиций подойти к решению базовых проблем динамического многокритериального структурно-функционального синтеза как технологий, так и программ управления конфигурации и реконфигурации БС МКА с использованием и без использования средств НКУ, а также проблем проактивного управления реализацией указанных программ.

Второй недостаток рассмотренных подходов состоит в том, что все они ориентированы на парирование расчетных АПС, т.е. тех ситуаций, которые наблюдались ранее, или которые были сгенерированы (смоделированы) заранее и для которых были разработаны соответствующие ситуационные программы выхода из них с целью восстановления требуемого уровня работоспособности. В случае нерасчетных АПС в рамках данных подходов (при отсутствии какого-либо резерва) в большинстве случаев осуществлялся переход в заранее предусмотренные устойчивые состояния (например, состояние ориентированного дежурного полета (ОДП), либо неориентированного полета (НП)).

3. Формальное описание решаемой проблемы. Проведенные авторами статьи исследования возможных путей решения рассматриваемой проблемы динамического многокритериального структурно-функционального синтеза как технологий, так и программ управления реконфигурацией БС МКА с использованием и без использования средств НКУ показали, что трудности ее решения связаны с тем, что необходимо одновременно учитывать, во-первых, большое число пространственно-временных, технических и технологических ограничений, объективно изменяющихся под действием внешних и внутренних причин, во-вторых, требуется постоянно согласовывать результаты решения задач структурного и функционального синтеза перечисленных выше технологий и программ управления БС МКА и средств НКУ в рамках разработанного полимодельного комплекса, о котором речь пойдет далее [4-8].

Для формального описания рассматриваемой проблемы в ряде работ авторов были введены следующие векторы и множества [6-7]:

$$\mathbf{x}(t) = \left\| \mathbf{x}^{(д)T}, \mathbf{x}^{(о)T}, \mathbf{x}^{(к)T}, \mathbf{x}^{(р)T}, \mathbf{x}^{(н)T}, \mathbf{x}^{(е)T}, \mathbf{x}^{(с)T}, \mathbf{x}^{(в)T} \right\|^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \left\| \mathbf{y}^{(д)T}, \mathbf{y}^{(о)T}, \mathbf{y}^{(к)T}, \mathbf{y}^{(р)T}, \mathbf{y}^{(н)T}, \mathbf{y}^{(е)T}, \mathbf{y}^{(с)T}, \mathbf{y}^{(в)T} \right\|^T; \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_{пр}(t) = \left\| \mathbf{u}_{пр}^{(д)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(о)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(к)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(р)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(н)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(е)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(с)T}, \mathbf{u}_{пр}^{(в)T} \right\|^T; \quad (3)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t) = \left\| \mathbf{v}^{(д)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(о)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(к)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(р)T}(\mathbf{x}(t), t), \right. \\ \left. \mathbf{v}^{(н)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(е)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(с)T}(\mathbf{x}(t), t), \mathbf{v}^{(в)T}(\mathbf{x}(t), t) \right\|^T; \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\xi}(t) = \left\| \boldsymbol{\xi}^{(д)T}, \boldsymbol{\xi}^{(о)T}, \boldsymbol{\xi}^{(к)T}, \boldsymbol{\xi}^{(р)T}, \boldsymbol{\xi}^{(н)T}, \boldsymbol{\xi}^{(е)T}, \boldsymbol{\xi}^{(с)T}, \boldsymbol{\xi}^{(в)T} \right\|^T; \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\beta}(t) = \left\| \boldsymbol{\beta}^{(д)T}, \boldsymbol{\beta}^{(о)T}, \boldsymbol{\beta}^{(к)T}, \boldsymbol{\beta}^{(р)T}, \boldsymbol{\beta}^{(н)T}, \boldsymbol{\beta}^{(е)T}, \boldsymbol{\beta}^{(с)T}, \boldsymbol{\beta}^{(в)T} \right\|^T, \quad (6)$$

где $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{y}(t)$, $\mathbf{u}_{пр}(t)$, $\mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t)$, $\boldsymbol{\xi}(t)$, $\boldsymbol{\beta}(t)$ соответственно обобщённые векторы состояния, выходных характеристик логико-динамической системы, описывающей процессы управления структурной динамикой БС МКА без и с использованием НКУ; обобщённые векторы программных управлений БС МКА без и с использованием НКУ; вектор возмущающих воздействий, имеющих как целенаправленный, так и нецеленаправленный характер; вектор структурных параметров (характеристик) БС МКА, определяющих её облик.

Все указанные векторы должны принадлежать заданным областям [6]:

$$u_{np}(t) \hat{I} Q^{(np)}(x(t), t), v(x(t), t) \hat{I} V(x(t), t), \quad (7)$$

$$\xi(t) \hat{I} \Xi(x(t), t), \beta \hat{I} B, \quad (8)$$

$$x(t) \in X^{(np)}(t), \quad (9)$$

где $Q^{(np)}(x(t), t)$, $V(x(t), t)$, $\Xi(x(t), t)$, $BX^{(np)}(t)$ соответственно заданная область допустимых программных управлений (планов конфигурации и реконфигурации БС МКА); область допустимых управляющих воздействий, реализуемых в реальном масштабе времени (РМВ) и связанных с выполнением ранее составленных планов конфигурации и реконфигурации БС МКА в интересах повышения их живучести; область допустимых возмущающих воздействий, задаваемых с помощью тех или сценариев; область допустимых значений структурных параметров; – область допустимых текущих значений вектора состояния структурной динамики БС МКА.

В этом случае управляемая структурная динамика БС МКА без и с использованием НКУ может быть задана как в аналитическом, так и в алгоритмическом виде (возможен комбинированный вариант). В общем виде данную управляемую структурную динамику зададим в виде следующих соотношений:

$$x(t) = \varphi(x(T_0), u_{np(t_0, t]}, v_{(t_0, t]}, \xi_{(t_0, t]}, \beta, t), \quad (10)$$

$$y(t) = y(x(t), u_{np(t_0, t]}, n_{(t_0, t]}, x_{(t_0, t]}, b, t). \quad (11)$$

Ограничения на значения обобщенного фазового вектора, описывающего состояние рассматриваемой сложной организационно-технической системы в начальный – T_0 и конечный – T_f моменты времени, запишем в следующем виде:

$$x(T_0) \hat{I} X_0(\beta), \quad x(T_f) \hat{I} X_f(\beta), \quad (12)$$

С помощью данных ограничений при возникновении АПС задается, во-первых, то состояние, в которое попадают БС МКА в результате появления расчетной (нерасчетной) АПС. Сведения об этом состоянии БС МКА поступает как результат работы модельно-алгоритмического

обеспечения решения задач контроля, оценивания и диагностики состояния БС МКА. Второе крайнее условие в выражении (12) задает то состояние БС МКА, в которое надо (либо возможно) перевести БС МКА в результате выполнения их операций по конфигурации (реконфигурации) соответствующих структур.

Проведенный анализ показывает, что соотношения (7)-(12) задают множество стратегий $\Delta_{\text{эф}}$ – (допустимых альтернатив, способов применения, управляющих воздействий, в нашем случае – технологий и программ конфигурации и реконфигурации БС МКА с использованием или без использования средств НКУ и т.п.).

Для оценивания качества процессов управления структурной динамикой БС МКА на этапе применения целесообразно ввести **частные (внутренние)** показатели качества, из которых может быть образован следующий вектор показателей качества синтеза технологий и программ управления реконфигурацией БС МКА:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \xi(t), t) = \left\| \mathbf{J}^{(д)г}, \mathbf{J}^{(о)г}, \mathbf{J}^{(к)г}, \mathbf{J}^{(р)г}, \mathbf{J}^{(н)г}, \mathbf{J}^{(е)г}, \mathbf{J}^{(с)г}, \mathbf{J}^{(в)г} \right\|^T, \quad (13)$$

где $\mathbf{J}^{(д)г}, \mathbf{J}^{(о)г}, \mathbf{J}^{(к)г}, \mathbf{J}^{(р)г}, \mathbf{J}^{(н)г}, \mathbf{J}^{(е)г}, \mathbf{J}^{(с)г}, \mathbf{J}^{(в)г}$ – соответственно векторы показателей качества управления движением, операциями взаимодействия, каналами, ресурсами, потоками, параметрами операций, структурами, вспомогательными операциями в БС МКА и НКУ.

В работах [4,5,7,8] разработан подход к вычислению значений обобщенных показателей *структурно-функциональной живучести* БС МКА в виде нечетких треугольных чисел, в основе которого положен анализ оптимистических, пессимистических или случайных (произвольных) траекторий структурно-функциональной реконфигурации объекта, вызванных отказами (восстановлением) БС МКА. Для определения значений показателей *структурно-технологической живучести* БС МКА была использована методика, подразумевающая описание вариантов участия ЭП БС МКА в технологических циклах управления объектом в виде гиперграфов, проведения операции их дифференцирования и вычисления структурно-топологических показателей нечеткого графа (производной) технологической независимости БС МКА [8,31].

Проведенный анализ показывает, что показатели живучести МКА могут принимать четкие, интервальные, нечеткие значения и, в самом общем случае, могут быть представлены как лингвистические переменные. В этом случае задача анализа и оценивания показателей живучести конфигурации БС МКА относится к задачам многокритериального оценивания с лингвистическими переменными. Для разрешения критериальной неопределенности в указанной ситуации разработана новая методика построения и оптимизации обобщенного показателя

живучести конфигурации БС МКА [8, 31]. Суть предлагаемой методики состоит в совместном использовании идей вербального анализа решений (простые и сложные опорные ситуации опроса) и процедур сведения качественных показателей к количественным, основанных на применении математического аппарата теории нечетких множеств, отношений, мер и теории планирования эксперимента.

На основе вышеизложенного формально проблема синтеза технологий и программ управления реконfigurацией БС МКА с использованием или без использования средств может быть описана следующим образом.

Дано: (7)-(9), (10), (11), (12), (13), $t \in (T_0, T_f]$.

Для заданной ситуационно складывающейся обстановки необходимо найти: $\mathbf{u}_{\text{пр}}(t)$, $\mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t)$, β , при которых выполняются ограничения (7)-(9), (10), (11), (12), а обобщенный показатель качества $J_{\text{об}} = J_{\text{об}}(\mathbf{J}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}_{\text{пр}}(t), \mathbf{v}(\mathbf{x}(t), t), \xi(t)))$ принимает оптимальное (минимальное) значение. Предполагается, что все частные показатели качества управления реконfigurацией БС МКА также необходимо минимизировать. К указанным показателям относятся, например, коэффициент снижения эффективности целевого применения МКА, вызванной реконfigurацией его БС, показатели затрат ресурсов, длительности времени на проведения реконfigurации, показатель объема невыполненных технологических операций и т.п.).

Предложенное новое системно-кибернетическое описание проблемы синтеза технологий и программ управления реконfigurацией БС МКА (которое традиционно представляется в дискретно-событийной форме [1-2,9-19]) позволило привлечь для ее конструктивного решения математический аппарат прикладной теории проактивного управления структурной динамикой сложных технических объектов, разработанный авторами статьи и представленной в работах [3-5,24,31].

4. Методологические и методические основы решения исследуемой проблемы. При разработке общей методологии решения задач синтеза технологий и программ управления реконfigurацией БС МКА предлагается базироваться на трех основополагающих концепциях проведения современных системно-кибернетических исследований, а именно- *концепциях комплексного моделирования, проактивного и интеллектуального управления* рассматриваемыми космическими средствами [4,6,7,25]. Место данных концепций в общей структуре методологических и методических основ, разработанных к настоящему времени авторами статьи, показано на рисунке 1.

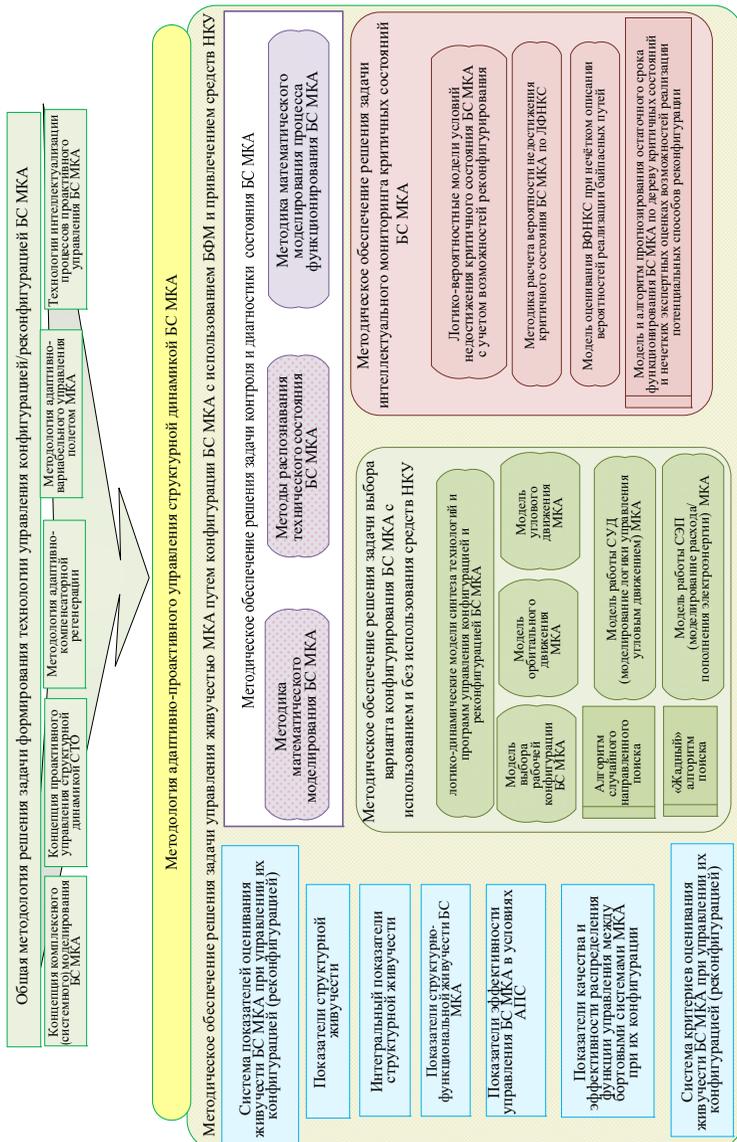


Рис. 1. Разработанный научно-методический аппарат решения проблемы синтеза технологий и программ управления БС МКА для повышения их живучести

На рисунке 1 приняты следующие сокращения- БФМ-бортовой функциональный модуль, ЛФНКС-логическая функция недостижения критичного состояния, ВФНКС- вероятностная функция недостижения критичного состояния, СЭП-система энергопитания, СУД- система управления движением.

Для того, чтобы описать содержание разработанного методического обеспечения решения рассматриваемой проблемы целесообразно задать некоторый наиболее общий сценарий, в рамках которого может быть продемонстрирована работоспособность разработанного специального модельно-алгоритмического обеспечения. Пусть у нас есть орбитальная группировка (ОГ) МКА, решающих на плановой основе задачи обзорного наблюдения за заданной совокупностью объектов (ОБО).

Будем рассматривать некоторый МКА (в общем случае входящий в ОГ МКА), имеющий свою собственную программу полета (ПП), в рамках которой им выполняется плановый объем работ, реализуемый на борту МКА за счет согласованного функционирования бортовых обеспечивающих систем (таких, например, как система управления движением (СУД), система терморегулирования (СТР), система энергопитания (СЭП)) и модуля полезной нагрузки (МПН), или, по-другому, модуля целевой аппаратуры. Предполагается, что у каждой БС МКА имеется свой аппаратно-программный резерв (структурный, информационный, временной), также заранее сформирован функциональный резерв в виде возможных обходных путей (байпасов, контуров управления). Кроме того, имеется иерархический набор алгоритмов реконфигурации и конфигурации БС МКА, а также технологий их использования. Имеется также НКУ МКА, который рассматривается как дополнительный контур управления БС МКА для обеспечения его живучести. Пусть в некоторый заранее не заданный момент времени происходит аварийная полетная ситуация (АПС). Она может быть расчетной и нерасчетной.

Остановимся в начале на **I ветви обобщенной процедуры выхода из расчетной АПС** (расчетной нештатной ситуации) и на соответствующих последовательно выполняемых шагах реализации данной процедуры.

Шаг 1.1. Моделирование процессов контроля, оценивания и диагностики состояния БС МКА. В соответствии с заранее введенным сценарием появления АПС, определяется факт появления расчетной нештатной ситуации, а также определяется (моделируется в обратном времени) длительность нахождения БС МКА в скрытом состоянии (в состоянии АПС).

Шаг 1.2. Происходит расчет времени перехода БС (или ее прибора) в невозвратное состояние (о расчете данного времени можно прочитать в отчете [8]) и сравнение его с текущим временем, а также расчет времени на выключение отказавшего прибора, анализ наличия

резервного прибора в БС (если нет резервного прибора, то переход на Шаг 1.4), времени на подготовку и конфигурирование резервного прибора. Если указанное время (выключение прибора и анализ наличия резерва) превышает время на переход в невозвратное состояние, то уход на Шаг 1.3. Если времени на переход на резервный прибор нет, то переход на Шаг 1.3. Если времени достаточно, то включается алгоритм восстановления работоспособности БС МКА и осуществляется возврат на плановую траекторию функционирования МКА (переход на Шаг 1.6).

Шаг 1.3. Включается алгоритм перевода МКА в режимы «Дежурный ориентированный полет (ОП)», либо «Неориентированный полет (НП)», с борта МКА подается сигнал «Вызов НКУ», после чего осуществляется переход в режим централизованного управления МКА из центра управления полетом (ЦУП) данным МКА.

Шаг 1.4. На данном шаге формируются и реализуются программы реконфигурации БС МКА. При этом в начале осуществляется проверка наличия соответствующего времени на проведение стандартных реконфигураций, либо разработку (синтез) и реализацию новых программ реконфигурации.

На рисунке 2 приведена обобщенная схема ситуационного выбора алгоритма реконфигурации БС МКА для существующей и используемой на практике технологии эвристической реконфигурации, которая на данном рисунке названа “стандартной” реконфигурацией, и предлагаемой структурно-функциональной реконфигурации (СФР), базирующейся на разработанном новом научно-методическом аппарате, о котором речь идет в данной статье.

Из анализа содержания данного рисунка видно, что каждой АПС и каждому текущему состоянию БС МКА, а также каждой программе полета на каждом конкретном этапе полета можно поставить свою программу выхода (технологии и программы реконфигурации) из расчетной и нерасчетной АПС.

При выборе конкретной последовательности операций, связанных с выключением отказавшего прибора, поиском нового прибора, его включением, проведением конкретных действий по восстановлению работоспособности соответствующей БС, главным параметром, определяющим какую технологию и какой соответствующей ей алгоритм нужно использовать для выполнения выбранной программы реконфигурации, является параметр, характеризующий общее время на расчет и реализацию указанной программы (см. таблицу 1). В данной таблице этот параметр обозначен как t_i .

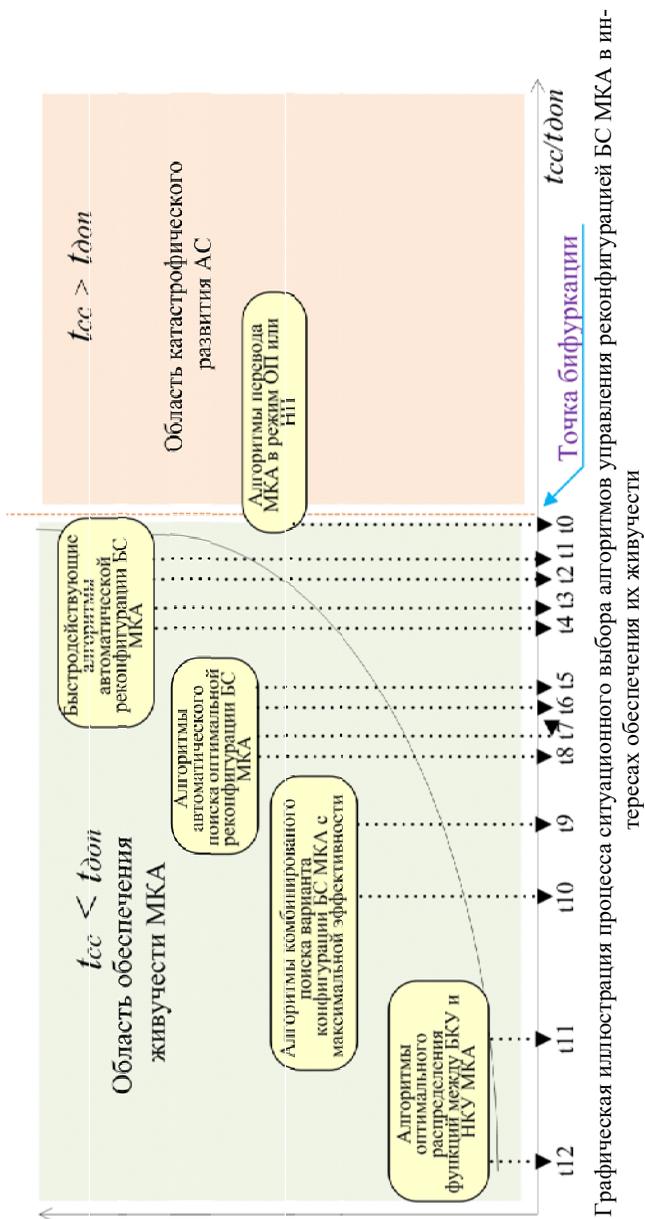


Рис. 2. Графическая иллюстрация процесса ситуационного выбора алгоритмов управления реконфигурацией БС МКА в ин-терсах обеспечения их живучести

Таблица 1. Сведения о характеристиках разработанных алгоритмов реконфигурации БС МКА

Критичность возникновения АПС	Время на «стандартную» реконфигурацию	Время на структурно-функциональную реконфигурацию	
	Усложнение модели и алгоритма <div style="text-align: center;">  </div>		
	Реконфигурация без оптимизации	Реконфигурация с оптимизацией	
Без прерывания операции	t_1	t_5	t_9
Без прерывания режима	t_2	t_6	t_{10}
Без снижения работоспособности БС МКА	t_3	t_7	t_{11}
Без перехода в НП	t_4	t_8	t_{12}
<i>Примечание:</i> 1. t_i – время на проведение реконфигурации БС МКА при заданной критичности возникновения АПС и требуемом алгоритме реконфигурации; 2. $t_i \leq t_{i+1}$; 3. t_{cc} – время выявления скрытого состояния; 4. t_0 – время перехода в режим ОП или НП			

В правой части данной таблицы, где речь идет о временах, затрачиваемых на структурно-функциональную реконфигурацию, введены два столбца. В левом столбце представлены времена на проведение структурно-функциональной реконфигурации с однокритериальной оптимизацией, в правом столбце речь идет о временах, полученных в результате решения задач многокритериальной структурно-функциональной реконфигурации.

Сравнивая данное время с прогнозируемым временем возможного попадания в невозвратное состояние (в точку бифуркации), можно найти наиболее предпочтительные в складывающейся обстановке технологию и реализующей ее алгоритм реконфигурации.

В рамках исследований, выполненных к настоящему моменту времени авторами статьи, предложены, реализованы (в виде соответствующих программных комплексов) и проанализированы следующие методы и алгоритмы реконфигурации БС МКА в зависимости от критичности прерываемых операций, режимов и имеющегося временного ресурса на проведение реконфигурации [4-8,10].

1) Методы и алгоритмы реконфигурации, выполняющие парирование АПС, без прерывания выполнения текущей операции:

- «стандартная» реконфигурация, использующая структурный резерв, то есть замену отказавшей БА на аналогичную (резервную) аппаратуру;

- структурно-функциональная реконфигурация (СФР), при которой кроме структурного используется также и функциональный резерв. Может проводиться в целях оптимизации расхода бортового ресурса и/или с учётом ограничений на его потребление. Задача выбора рабочей конфигурации производится на основе «жадного» алгоритма или алгоритма случайного направленного поиска.

2) Методы и алгоритмы реконфигурации, выполняющие парирование АПС, с прерыванием выполнения текущей операции в рамках реализуемого режима работы БС или режима функционирования МКА:

- «стандартная» реконфигурация;
- СФР: «жадный» алгоритм или алгоритм случайного направленного поиска.

3) Методы и алгоритмы реконфигурации, выполняющие парирование АПС, со сменой реализуемого режима работы БС или режима функционирования МКА, но без снижения уровня работоспособности:

- «стандартная» реконфигурация;
- СФР: «жадный» алгоритм или алгоритм случайного направленного поиска.

4) Методы и алгоритмы реконфигурации, выполняющие парирование АПС, со снижением уровня работоспособности, т.е. перевод в дежурные (или в аварийные) режимы:

- «стандартная» реконфигурация;
- СФР: «жадный» алгоритм или алгоритм случайного направленного поиска.

Если нет возможности поддерживать работоспособность МКА или время, отводимое на парирование АПС, крайне мало, то МКА переводится в аварийный режим неориентированного полёта (НП) (переход на Шаг 1.3) с минимальным составом используемой бортовой аппаратуры (БА). Вывод из НП осуществляется с помощью НКУ.

Если известно состояние БС МКА, в которое она попала в результате расчётной АПС и то состояние, в которое ее необходимо перевести (для фиксированной технологии функционирования БС МКА на данном этапе выполнения программы полета (ПП)), то в этом случае комбинированный метод и алгоритм оптимального программного управления БС МКА обеспечивают реконфигурацию оставшихся БС МКА и перевод их в наиболее предпочтительное частично-работоспособное состояние. Далее осуществляется переход на Шаг 1.5.

Шаг 1.5. С использованием моделей, описывающих процессы целевого применения МКА, для выбранной технологии и синтезированной (либо тоже выбранной из заранее рассчитанных) программы реконфигурации БС МКА определяется уровень падения значений показателей целевой эффективности (ЦПЭ) МКА и в целом ОГ МКА, вызванный деградацией БС МКА и ее компенсацией за счет реконфигурации. Если уровень падения значений ЦПЭ является допустимым, то уход на Шаг 1.6 в противоположном случае, повторно уход на Шаг 1.4. Если времени не хватает на повторный расчет программ реконфигурации, то уход на Шаг 1.3.

Шаг 1.6. Восстановление штатных функции БС МКА, перезапуск БС МКА, переход в режим плановой работы по программе полета (ПП).

Схематично алгоритм решения задачи управления конфигурацией (реконфигурации) БС МКА в интересах повышения его живучести при расчётных АПС представлен на рисунке 3.

На данном рисунке приняты следующие сокращения T_0 - длительность нахождения бортовой системы МКА в скрытом аварийном состоянии, T_1 - время перехода БС в невозвратное состояние, T_2 – время выключения отказавшего прибора, T_3 – время конфигурирования резервного прибора, ЦПЭ – показатель внешней эффективности применения МКА (целевой показатель эффективности (ЦПЭ)).

Для расчета ЦПЭ использовались аналитико-имитационные модели в рамках соответствующей имитационной системы. В качестве показателя внешней эффективности применения МКА рассматривались такие показатели как статистическая оценка вероятности слежения за объектом наблюдения; доля площади района, накрываемого полосой обзора МКА в текущем пролете; коэффициент снижения эффективности целевого применения; коэффициент функциональной готовности на сохранение (исключение) исходных номеров пролетов МКА из первичного графика пролетов и ряд других. В основе методики расчета перечисленных показателей лежит имитация функционирования МКА на основе искусственного формирования неопределенности положения и состояния объекта наблюдения посредством моделирования множества объектов или сценариев возможных их маневров в заданной области между пролетами МКА и определения координат и состояния каждого объекта в каждом пролете МКА. При этом в качестве исходных данных наряду пространственно-временными, техническими и технологическими ограничениями задавались синтезированные варианты реконфигурации БС МКА. Подробно результаты проведения соответствующих аналитико-имитационных экспериментов, представлены в работах [8,10].

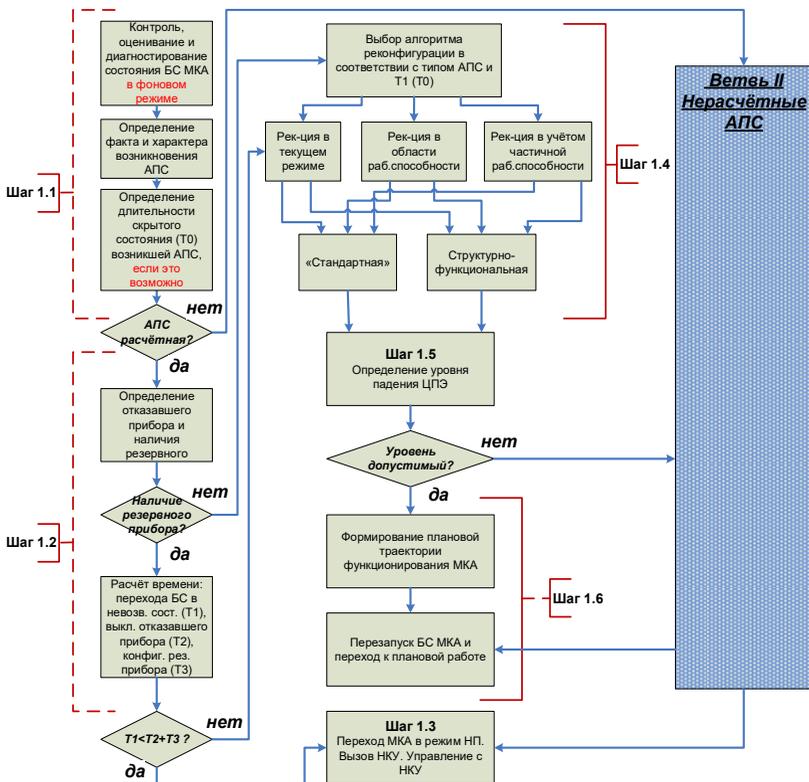


Рис. 3. Алгоритм решения задачи управления реконфигурацией БС МКА при расчётных АПС

Говоря о **II ветви реализации представленной обобщенной процедуры, связанной с выходом БС МКА из нерасчётной АПС**, необходимо, прежде всего отметить следующее. В этом случае, если есть запас соответствующего времени, необходимо на Шаге 1.4. решать не только задачи синтеза и реализации программ конфигурации и реконфигурации БС МКА, но, что важно, задачи многокритериального структурно-функционального синтеза самих технологий конфигурации и реконфигурации БС МКА для обеспечения требуемого уровня их живучести, а также эффективности применения. Данный класс задач на порядок сложнее тех задач, предложения по решению которых рассматривались кем-либо ранее [8].

Пусть при возникновении нерасчетной аварийной полетной ситуации (АПС) соответствующая БС МКА (либо ее подсистема или прибор) попадает в общем случае в нерасчетное частично неработоспособное многоструктурное макросостояние. При этом, как показано [8], в качестве таковых структур рассматриваются функционально взаимосвязанные топологическая, программно-техническая структуры (определяющая какие аппаратно-программные средства, обеспечивают функционирование узлов и связей топологической структуры) и технологическая (функциональная) структура, содержащая многовариантные последовательности выполнения заданной совокупности операций, связанных с БС МКА и определенных в программе полета.

В этом случае для ликвидации нерасчетной АПС требуется, во-первых, найти новое работоспособное многоструктурное макросостояние БС МКА (либо частично работоспособное состояние, но более высокое по уровню работоспособности чем то, в котором БС оказалась в результате нерасчетной АПС), обеспечивающее требуемый уровень значения показателя эффективности функционирования МКА в складывающейся обстановке и, во-вторых, требуется синтезировать такие программы управления структурной динамикой (программы управления конфигурацией (если хватает ресурсов), либо реконфигурацией (если не хватает ресурсов)) БС МКА, обеспечивающие наилучший (оптимальный) перевод БС МКА из заданного в найденное многоструктурное макросостояние.

Если времени и бортовых вычислительных ресурсов на расчет и реализацию соответствующих состояний и программ недостаточно (см. рис. 4), то осуществляется перевод МКА в следующие режимы: «Дежурный ориентированный полет», либо «Неориентированный полет». В этом случае с борта МКА подается сигнал «Вызов НКУ». После чего осуществляется переход в режим централизованного управления МКА из ЦУП (уход на Шаг 1.3).

Основное достоинство разработанного метода синтеза оптимальной технологии и программы реконфигурации БС МКА (или, по-другому, программ управления структурной динамикой БС МКА) заключается в том, что в результате синтеза вектора $\mathbf{u}_{\text{пр}}(t)$ (комплексного плана реконфигурации БС МКА) в момент времени $t = T_f$ (в момент завершения очередного суточного цикла управления БС МКА) мы, наряду с оптимальным планом реконфигурации БС МКА, одновременно получаем новую технологию управления реконфигурацией БС МКА, а также то искомое работоспособное (частично работоспособное) многоструктурное макросостояние $\mathbf{x}(T_f) \in X_f(\beta)$, находясь в котором БС МКА сможет

выполнять поставленные перед ней задачи в динамически изменяющейся (прогнозируемой) обстановке с требуемой степенью устойчивости (робастности).

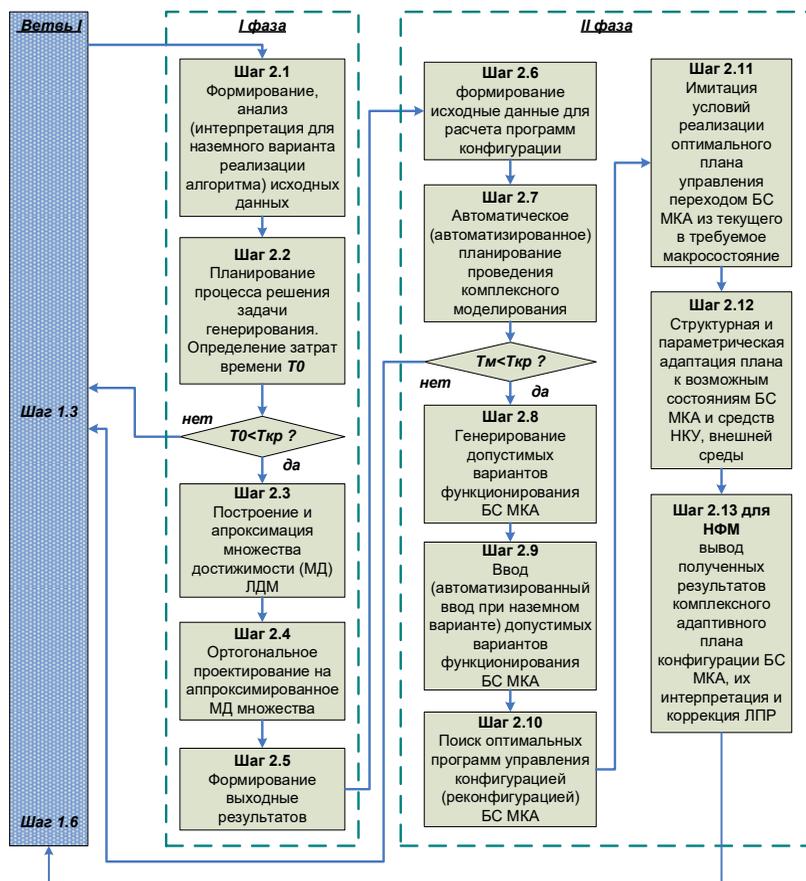


Рис. 4. Алгоритм решения задачи управления конфигурацией (реконfigurацией) БС МКА при парировании нерасчётной АПС

Схематично алгоритм решения задачи управления конфигурацией (реконfigurацией) БС МКА в интересах повышения его живучести при нерасчётных АПС представлен на рисунке 4. На рисунке 4 приняты следующие сокращения – ЛДМ-логико-динамическая модель, МД – множество достижимости, ЛПП- лицо, принимающее решение. К

настоящему времени разработанные методологические и методические основы решения рассматриваемой проблемы были практически реализованы при выполнении ряда научно-исследовательских работ в ракетно-космической и промышленно-производственной сферах [8, 26-28].

5. Пример решения задачи. Постановка задачи синтеза технологий и программ управления конфигурацией и реконфигурацией (если не хватает ресурсов) БС МКА состоит в следующем. В качестве исходных данных предполагается известными пространственно-временные, технические и технологические ограничения, связанные с решением задач управления МКА ДЗЗ, а также технологическая, топологическая и функциональные структуры бортового комплекса управления (БКУ) и НКУ МКА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). На рисунке 5 приведены варианты графического задания технологии сбора, обработки информации и формирования управляющих воздействий в АСУ МКА ДЗЗ. На данном рисунке каждому блоку соответствует своя функция обработки информации и управления, а также соответствующий программный модуль.

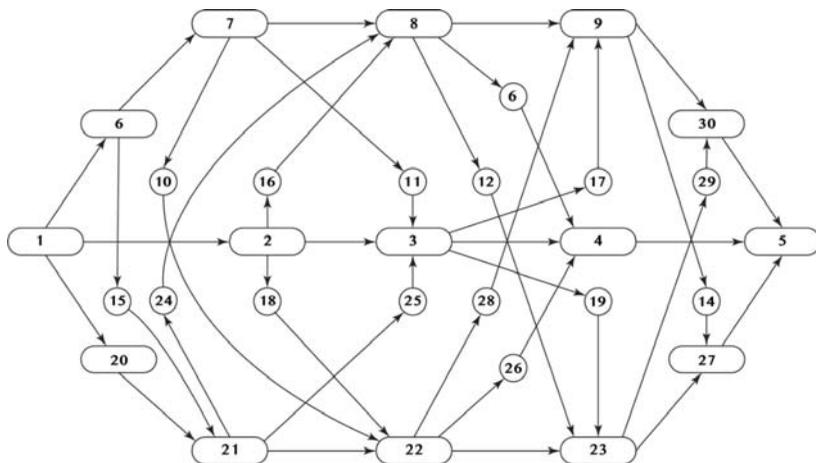


Рис. 5. Граф обобщенной технологии сбора, обработки данных и формирования управляющих воздействий в АСУ МКА ДЗЗ

На рисунке 5 приняты следующие условные обозначения: 1 – сбор данных, осуществляемый с помощью специальной бортовой аппаратуры МКА; 2, 7, 21 – первичная обработка полученных данных на радиотехнических станциях (РТС) командно-измерительного комплекса (КИК), на борту МКА, в центре управления полетом МКА (ЦУП МКА; 3, 8, 22 –

основная (вторичная) обработка данных на РТС КИК, МКА, ЦУП МКА; 4, 9, 23 – формирование управляющих воздействий (программ управления) для бортовых систем (БС МКА); 6 – передача данных на радиотехнические станции РТС КИК; 10, 12, 14, 15 – передача информации с РТС КИК в центр управления полетом (ЦУП) МКА; 11, 13 – передача данных с РТС КИК на МКА; 16, 17 – передача данных с МКА на РТС КИК; 18, 19 – передача данных с МКА в ЦУП МКА; 20 – передача данных с МКА в ЦУП МКА; 24 – передача данных и ЦУП МКА на РТС КИК; 25, 26 – передача данных и ЦУП МКА на МКА; 27 – передача информации из ЦУП МКА на МКА; 28, 29 – передача информации из ЦУП МКА на РТС КИК; 30 – передача информации из РТС КИК на МКА; 5 – завершающая операция, состоящая в реализации сформированной программы управления бортовыми системами МКА. Операции 7, 8, 9 выполняются в КИК на вычислительных средствах РТС, 2, 3, 4 – операции выполняются на борту МКА, 21,22,23 – операции выполняются на вычислительных средствах ЦУП МКА.

Формулировка решаемой задачи: необходимо найти оптимальный вариант распределения функций обработки получаемых данных и управления (с точки зрения показателей затрат ресурсов и времени на проведение реконфигурации БС МКА), а также соответствующих программных модулей в АСУ МКА ДЗЗ в зависимости от текущего состояния БС МКА, а также от текущего потока данных, поступающих в рассматриваемую АСУ. Другими словами, в данном случае должна быть решена, во-первых, задача многокритериального структурно-функционального синтеза технологии обработки получаемых данных и управления основными элементами и подсистемами АСУ МКА ДЗЗ, и, во-вторых, должен быть построен конкретный план работы бортовых систем МКА и средств НКУ МКА, реализующий данную технологию. Более подробная информация о составе и структуре исходных данных, необходимых для решения подобного рода задач, представлена в работах [8,29,30]. В работах авторов данной статьи показано [4,8,24] как с помощью разработанного полимодельного комплекса удалось свести перечисленные прикладные задачи к задаче оптимального программного управления сложным динамическим объектом (АСУ МКА ДЗЗ), а ее, в свою очередь, к двухточечной краевой задаче.

В таблице 2 приведены результаты машинных экспериментов с разработанным комплексом программ для двух сценариев распределения функций управления и программных модулей в АСУ МКА ДЗЗ. Планирование реконфигурации БС МКА и синтез соответствующей технологии управления реконфигурации проводится для интервала времени, равном 1440 минут (1 сутки).

В рамках первого сценария синтезировалась программа конфигурирования программных модулей и соответствующих операций технологического цикла управления (ТЦУ) МКА, для 30 программных модулей. Для второго сценария рассматривались два МКА ДЗЗ (общее число программных модулей, которые должны быть распределены, равнялось 60). Показателями качества программного управления были показатель затрат времени на сбор, обработку, анализ информации и формирование управляющих воздействий, а также показатель затрат ресурсов (энергетики) при реализации соответствующих планов распределения функций (программных модулей).

Таблица 2. Результаты планирования реконфигурации БС МКА

Показатель	Программные модули																														Итого
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Сценарий 1	Алгоритм: FIFO																														
	Время	2			2			2													1	4	4					2	5	22	
	Энергия	20			20			30												30	120	120					60	75	475		
	Алгоритм: Оптимизация																														
	Время	2	4	4	2	4	4			3																				23	
	Энергия	20	40	40	20	40	60			45																				265	
Сценарий 2	Алгоритм: FIFO																														
	Время	4	8		4	8	8			6									12			8				8			66		
	Энергия	40	80		40	80	120			90									120			240				240			1050		
	Алгоритм: Оптимизация																														
	Время	4	5		4	4			6	2			4			4				1	4				3				5	46	
	Энергия	40	50		40	40			90	30			60			40				30	120				90				75	705	

На рисунках 6-9 в графическом виде представлены (эвристические) и оптимальные варианты распределения функций управления (программных модулей) для рассматриваемых сценариев изменения внешней обстановки. Из анализа результатов машинных экспериментов следует, что за счет оптимизации могут быть улучшены значения соответствующих показателей на 25-30%.

Основное отличие и достоинство предложенного подхода к многокритериальному синтезу технологии обработки данных, получаемых МКА, и управления основными элементами и подсистемами АСУ МКА ДЗЗ, а также плана работы бортовых систем МКА и средств НКУ МКА, состоит в том, что задачи моделирования, планирования и управления конфигурацией и реконфигурацией БС для повышения живучести МКА решаются не изолированно, а комплексно в рамках общей проблемы проактивного управления структурной динамикой МКА с использованием, либо без использования средств НКУ, что обеспечивает оперативность, обоснованность, полноту, замкнутость и непротиворечивость синтезируемых управленческих решений, базирующихся на фундаментальных и прикладных научных результатах, полученных к настоящему времени в междисциплинарной отрасли системных знаний.

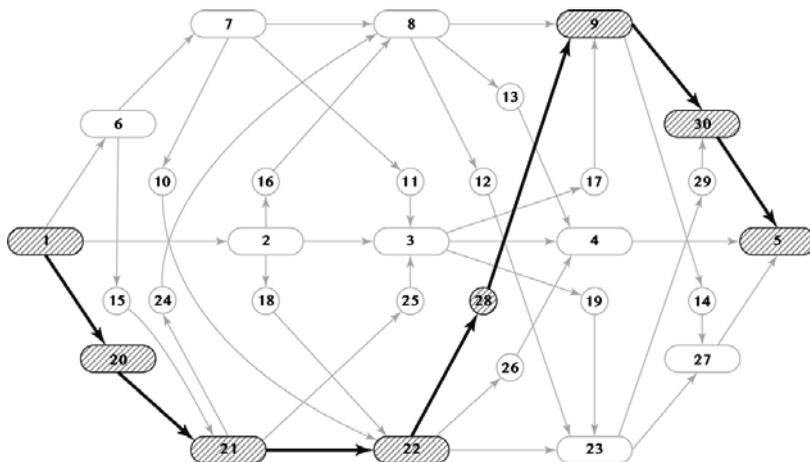


Рис. 6. Результаты эвристического синтеза технологий конфигурирования программных модулей в рамках первого сценария

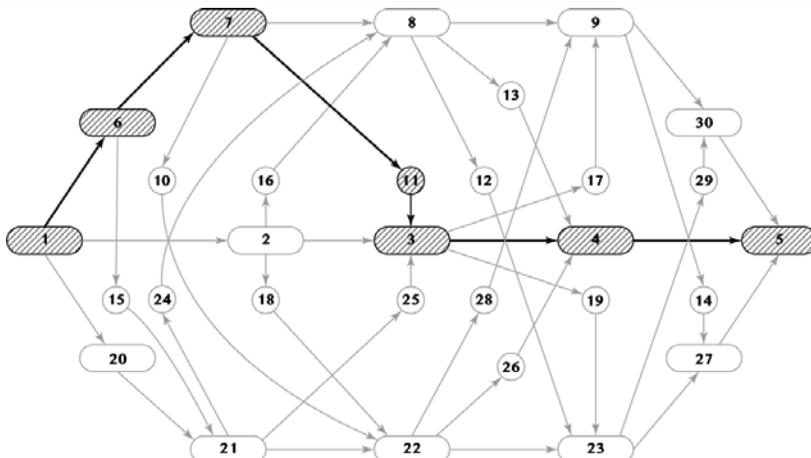


Рис. 7. Результаты оптимального синтеза технологий конфигурирования программных модулей в рамках первого сценария

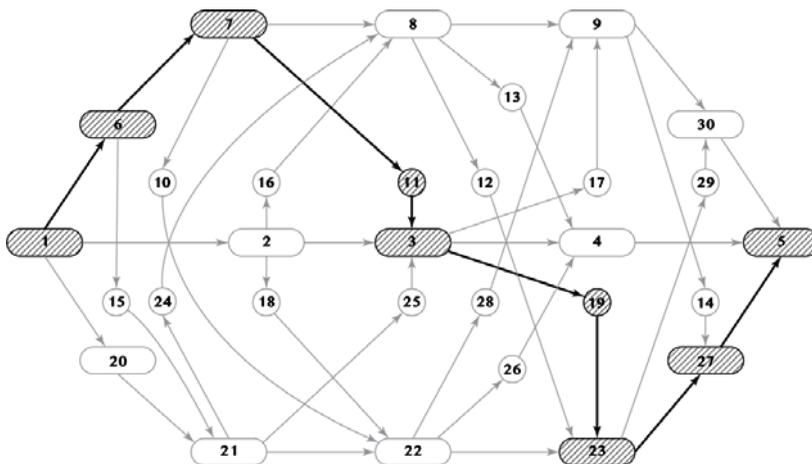


Рис. 8. Результаты эвристического синтеза технологий конфигурирования программных модулей в рамках второго сценария

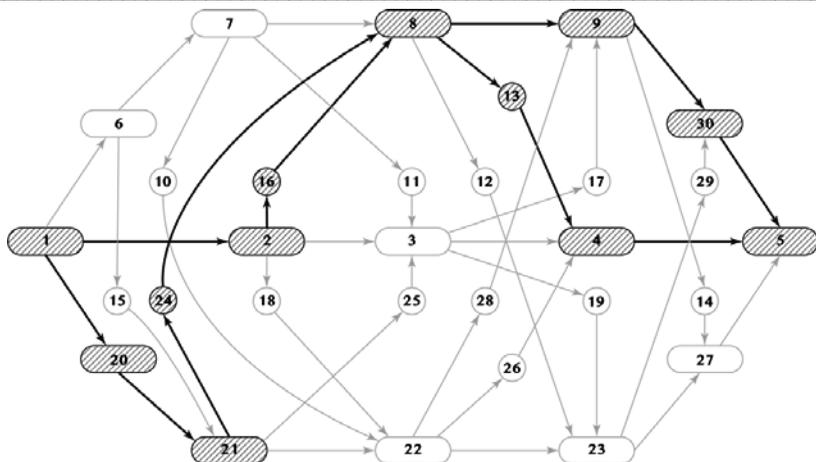


Рис. 9. Результаты оптимального синтеза технологий конфигурирования программных модулей в рамках второго сценария

6. Заключение. В целом, подводя итог вышеизложенному материалу, можно сказать, что в результате выполненных исследований был разработан новый научно-методический аппарат (см. рис. 1) эффективного решения задач одновременного (параллельного) многокритериального синтеза как технологий, так и программ управления конфигурацией и реконфигурацией БС МКА в интересах повышения их живучести. При этом каждая конкретная синтезированная технология управления представляет собой новую ситуационно выбираемую последовательность выполнения операций и распределения ресурсов МКА с использованием и без использования средств НКУ, обеспечивающую эффективное парирование расчетных и нерасчетных аварийных полетных ситуаций (АПС) и оперативное восстановление работоспособности его БС. Для подтверждения эффективности синтезированной технологии управления был разработан взаимосвязанный программный комплекс, включающий в себя экспериментальные образцы бортового и наземного функционального модулей синтеза технологий и программ управления реконфигурации БС МКА.

В отличие от существующей технологии управления реконфигурацией БС МКА, сводящейся к простому переключению отказавшего прибора на резервный комплект, в рамках предлагаемой новой технологии управления в ходе ее реализации происходит учет и анализ текущих характеристик задач, решаемых в БС МКА, анализ состояния ресурсов БС и выполняемых ими функций, анализ и оценивание текущего состо-

нения БС МКА в целом, оперативный расчет, анализ и оптимизация целевых и информационно-технологических возможностей и ресурсов БС МКА, для обоснованного распределения, либо перераспределения функций обработки информации и управления МКА между его элементами и подсистемами, а также средствами НКУ.

Таким образом синтезируемые с помощью предлагаемого нового научно-методического аппарата технологии управления реконфигурацией БС МКА следует рассматривать не только как технологии управления структурами БС МКА для компенсации отказов, но и как технологии управления, направленные на повышение эффективности функционирования БС МКА в динамически изменяющейся обстановке.

Литература

1. *Ахметов Р.Н., Макаров В.П., Соллоуб А.В.* Байпасность как атрибут живучести автоматических космических аппаратов в аномальных полётных ситуациях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. № 4(44). С. 17–37.
2. *Кирилин А.Н., Ахметов Р.П., Макаров В.П., Соллоуб А.В.* Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии // М.: Машиностроение, 2010. 384 с.
3. *Калинин В.Н.* Современная космическая кибернетика – методологические основы и направления исследований // Информация и космос. 2007. № 3. С. 7–16.
4. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов // М.: Наука. 2006. 410 с.
5. *Павлов А.Н., Кулаков А.Ю., Потрясаев С.А., Соколов Б.В.* Методы, алгоритмы и технологии реконфигурации бортовых систем маломассогабаритных космических аппаратов // Известия Вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 7. С. 596–603.
6. *Kalinin V.N., Sokolov B.V.* Multiple-model description of control processes for airspace crafts // Journal Computer System Science International. 1996. no.6. pp. 192–199.
7. *Kalinin V.N., Sokolov B.V.* Optimal planning of the process of interaction of moving operating objects // Int. J. Differ. Equ. 1985. vol. 21. pp. 502–506.
8. Научно-технический отчет (промежуточный) по теме “Разработка технологии и создание экспериментальных программных комплексов управления конфигурацией бортовых систем маломассогабаритных КА в интересах повышения их живучести” (шифр “Технология-СГ-3.3.3.1”). СПИИРАН. 2018. 450 с.
9. *Ковтун В.С.* Применение методик варибельного управления полётом автоматических космических аппаратов для рационального использования ресурсов бортовых систем // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 4(97). С. 143–157.
10. *Ковтун В.С., Почукаев В.Н.* Методы образно-символического управления автоматическими космическими аппаратами в условиях аномальных ситуаций // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 6(99). С. 1–14.
11. *Mikaelyan L., Müller S., Gerndt A., Noll T.* Synthesizing and Optimizing FDIR Recovery Strategies from Fault Trees // Formal Techniques for Safety-Critical Systems. FTSCS 2018. pp. 37–54.
12. *Tipaldi M., Glielmo L.* A Survey on Model-Based Mission Planning and Execution for Autonomous Spacecraft // IEEE Systems Journal. 2018. vol. 12. no. 4. pp. 3893–3905.

13. *Lianxiang J., Peipei X., Xuyang F.* Software Reconfiguration Technology for Serviceable Satellite OBDH System // Proceedings of the Second International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE). 2017. pp. 100–104.
14. *Amigoni F. et al.* Aggregating Models for Anomaly Detection in Space Systems: Results from the FCTMAS Study // International Conference on Intelligent Autonomous Systems. 2018. pp. 142–160.
15. *Wang D.-Y. et al.* Connotation and Research of Reconfigurability for Spacecraft Control Systems: A Review // Acta Automatica Sinica. 2017. vol. 43(10). pp. 1687–1702.
16. *Mehdi J.* Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system // Aerospace Science and Technology. 2015. vol. 47. pp. 467–472.
17. *Nayak A., Reyes L.R., Lee S., Nof S.Y.* Resource sharing in cyber-physical systems: modelling framework and case studies // International Journal of Production Research. 2016. vol. 54(23). pp. 6969–6983.
18. *Theorin A. et al.* An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0 // International Journal of Production Research. 2016. pp. 1297–1311.
19. *Oesterreich T.D., Teuteberg F.* Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry // Computers in Industry. 2016. vol. 83. pp. 121–139.
20. *Božek A., Wysocki M.* Flexible Job Shop with Continuous Material Flow // Int. J. Prod. Res. 2015. 53. pp. 1273–1290.
21. *Pinha D., Ahluwalia R., Carvalho A.* Parallel Mode Schedule Generation Scheme // Parallel mode schedule generation scheme // IFAC-PapersOnLine. 2015. vol. 48. no. 3. pp. 794–799.
22. *Battaia O., Dolgui A., Guschinsky N.* Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production // International Journal of Production Research. 2017. vol. 55(5). pp. 1368–1385.
23. *Blazewicz J., Pesch E., Trystam D., Zhang G.* New Perspectives in Scheduling Theory // Journal of Scheduling. 2015. vol. 18. pp. 333–334.
24. *Kalinin V.N., Sokolov B.V.* A dynamic model and an optimal scheduling algorithm for activities with bans of interrupts // Autom. Remote Control. 1987. vol. 48. pp. 88–94.
25. *Васильев С.Н.* От классических задач регулирования к интеллектуному управлению // Теория и системы управления. 2001. № 1. С. 5–22.
26. *Шестопалов М.Ю.* Отказоустойчивое управление циклическими многостадийными технологическими процессами // Инновации. 2015. № 4(198). С. 8–12.
27. *Шестопалов М.Ю., Имаев Д.Х.* Отказоустойчивое управление сложными системами // Дистанционные образовательные технологии: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 259–266.
28. *Шестопалов М.Ю., Имаев Д.Х., Кораблев Ю.А., Квашиин С.В.* Проектирование систем управления территориально распределенными объектами // Инновации. 2018. № 10(240). С. 100–107.
29. *Дзюбановский С.А., Озерянный Н.А.* Системы автоматического управления с реконфигурацией // Измерение, контроль, автоматизация. 1990. № 4(76). С. 62–80.
30. *Цвиркун А.Д.* Основы синтеза структуры сложных систем // М.: Наука. 1982. 200 с.
31. *Pavlov A.N.* The Technique of Multi-Criteria Decision-Making in the Study of Semi-Structured Problems // Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). pp. 131–140.
32. *Калинов М.И., Родионов В.А., Черкашин В.Г.* Влияние крена космического аппарата на эффективность решения задачи наблюдения за морскими объектами // Информатизация и связь. 2020. № 5. С. 151–157.

Калинин Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Область научных интересов: теория системных исследований, космическая кибернетика и информатика, теория оптимального управления динамическими системами, автоматизированные системы управления, подготовка инженерных кадров и новые информационно-дидактические технологии в высшем образовании. Число научных публикаций — 200. kvn.112@mail.ru; ул. Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)3479508; факс: +7(812)3284450.

Кулаков Александр Юрьевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 30. russ69@bk.ru; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)3280103; факс: +7(812)3284450.

Павлов Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор, Почетный работник сферы образования РФ, старший научный сотрудник, Лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН); Профессор, Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского. Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 200. pavlov62@list.ru; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)3280103; факс: +7(812)3284450.

Потрясаев Семен Алексеевич — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: системный анализ и исследование операций, теория управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 140. spotryasaev@gmail.com; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)3280103; факс: +7(812)3284450.

Соколов Борис Владимирович — д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, Лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 600. sokol@iias.spb.su; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)3280103; факс: +7(812)3284450.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-08-00989-а, № 20-08-01046), в рамках бюджетной темы № 0073–2019–0004.

V. Kalinin, A. Kulakov, A. Pavlov, S. Potryasaev, B. Sokolov
**METHODS AND ALGORITHMS FOR THE SYNTHESIS OF
TECHNOLOGIES AND PROGRAMS FOR CONTROLLING THE
RECONFIGURATION OF ON-BOARD SYSTEMS OF SMALL-
SIZED SPACECRAFTS**

Kalinin V., Kulakov A., Pavlov A., Potryasaev S., Sokolov B. **Methods and Algorithms for the Synthesis of Technologies and Programs for Controlling the Reconfiguration of On-Board Systems of Small-Sized Spacecrafts.**

Abstract. In modern conditions, in the field of the creation and use of existing and advanced space vehicles (SV), the issues of autonomy and survivability acquire particular relevance in the development and operation of small-mass spacecraft (SMS) for Earth remote sensing (ERS).

The specificity of the small spacecraft lies in the fact that it is difficult to directly apply to the process of their creation the standard practice of using the system for ensuring the reliability of the rocket and space industry due to the lack of the ability to provide full structural redundancy of its onboard systems (OBS) associated with mass-dimensional and other restrictions. In this case, the tasks of developing model-algorithmic methods and approaches to ensuring the required level of indicators of structural reliability, survivability and, in general, the effectiveness of the functioning of the MCA OBS become of particular relevance.

The problem of increasing the level of indicators of autonomy, survivability, efficiency of functioning of complex technical objects (CTO), which, in particular, SMS belong, is considered in the scientific literature in conjunction with solving problems of control, assessment and technical diagnostics of the state of the CTO reconfiguration (structural, functional, structural-functional reconfiguration) of CTO structures, management of its reserves, alternative and multi-mode control, analysis of fault tolerance and disaster recovery of CTO. However, all of these studies are fragmented, both at the methodological and methodological and technological levels.

The article provides a generalized description of the combined methods and algorithms developed by the authors for solving the problems of synthesis of technologies and programs for controlling the OS reconfiguration to increase the survivability of the SMS. At the same time, these tasks are solved not in isolation, but in a comprehensive manner within the framework of the general problem of proactive management of the structural dynamics of SMS with or without the use of GCC tools, which ensures the efficiency, validity, completeness, isolation and consistency of synthesized management decisions. The novelty of the approach proposed in the article is that its authors, based on the concepts of integrated (system) modeling, proactive control of the structural dynamics of the OS SMS, as well as the intellectualization of the processes of proactive control of the OS SMS, developed methods and algorithms for the synthesis of technologies and programs. Control of the reconfiguration of the MCS BS, providing, firstly, the situational choice of the optimal sequence of operations and the allocation of SMS resources with and without the use of GCC facilities, and, secondly, effective parrying not only of the calculated ones, but also off-design emergency flight situations (EFS), as well as the operational restoration of the operability of its OS. The constructiveness of the proposed approach is illustrated by the example of solving the problem of flexible redistribution of information processing tasks between the OS SMS and the SMS GCC.

Keywords: synthesis of control technologies, proactive management of reconfiguration, indicators of survivability and efficiency of functioning of a small-size spacecraft.

Kalinin Vladimir — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Honored Scientists of the Russian Federation, Professor, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: development of research

fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational technical systems. The number of publications — 200. kvn.112@mail.ru; 13, Zhdanovskaya str., 197198, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)3479508; fax: +7(812)3284450.

Kulakov Aleksandr — Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational technical systems. The number of publications — 30. russ69@bk.ru; 39, 14 liniya V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)3280103; fax: +7(812)3284450.

Pavlov Alexander — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Honorary Worker of Education of the Russian Federation, Senior Researcher, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS); Prof., Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 200. pavlov62@list.ru; 39, 14 liniya V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)3280103; fax: +7(812)3284450.

Potryasaev Semen — Ph.D., Dr.Sci., Leading Researcher, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: system analysis and operations research, theory of managing the structural dynamics of complex organizational and technical systems. The number of publications — 140. spotryasaev@gmail.com; 39, 14 liniya V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)3280103; fax: +7(812)3284450.

Sokolov Boris — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Honored scientist of Russian Federation, Chief Researcher, Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: development of research fundamentals for the control theory by structural dynamics of complex organizational-technical systems. The number of publications — 600. sokol@iias.spb.su; 39, 14 liniya V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)3280103; fax: +7(812)3284450.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grants No 19–08–00989–a, No 20–08–01046), within the budgetary theme No 0073–2019–0004.

References

1. Ahmetov R.N., Makarov V.P., Sollogub A.V. [Bypass as an attribute of robotic spacecraft survivability in abnormal flight situations]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2015. vol. 4(44). pp. 17–37. (In Russ.).
2. Kirilin A.N., Ahmetov R.P., Makarov V.P., Sollogub A.V. *Metody obespecheniya zhivuchesti nizkoorbital'nyh avtomaticheskikh KA zondirovaniya Zem-li: matematicheskie modeli, komp'yuternye tekhnologii* [Methods for ensuring the survivability of low-orbit automatic Earth-sensing spacecraft: mathematical models, computer technologies]. M.: Mashinostroenie. 2010. 384 p. (In Russ.).
3. Kalinin V.N. [Modern space cybernetics - methodological foundations and directions of research]. *Informaciya i kosmos – Information and Space*. 2007. vol. 3. pp. 7–16. (In Russ.).

4. Ohtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoj dinamikoj slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov* [Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects]. M.: Science. 2006. 410 p. (In Russ.).
5. Pavlov A.N., Kulakov A.Yu., Potryasaev S.A., Sokolov B.V. [Methods, algorithms and technologies for reconfiguring onboard systems of small-size spacecraft]. *Izvestiya Vuzov. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 2018. Issue 61. vol. 7. pp. 596–603. (In Russ.).
6. Kalinin V.N., Sokolov B.V. Multiple-model description of control processes for aerospace crafts. *Journal Computer System Science International*. 1996. vol. 6. pp. 192–199.
7. Kalinin V.N., Sokolov B.V. Optimal planning of the process of interaction of moving operating objects. *Int. J. Differ. Equ.* 1985. vol. 21. pp. 502–506.
8. Nauchno-tekhnicheskij otchet (promezhutochnyj) po teme [Development of technology and creation of experimental software systems for controlling the configuration of onboard systems of small-sized spacecraft in order to improve their survivability] (shifr “Tekhnologiya-SG-3.3.3.1”). SPb: SPIIRAN. 2018. 450 p. (In Russ.).
9. Kovtun V.S. [Application of methods of variable flight control of automatic spacecraft for rational use of onboard systems resources]. *Kosmonavtika i raketostroenie – Astronautics and rocket science*. 2017. vol. 4(97). pp. 143–157. (In Russ.).
10. Kovtun V.S., Pochukaev V.N. [Methods of figurative-symbolic control of automatic spacecraft in anomalous situations]. *Kosmonavtika i raketostroenie – Kosmonavtika i raketostroenie – Astronautics and rocket science*. 2017. vol. 6(99). pp. 1–14. (In Russ.).
11. Mikaelyan L., Müller S., Gerndt A., Noll T. Synthesizing and Optimizing FDIR Recovery Strategies from Fault Trees. *Formal Techniques for Safety-Critical Systems. FTSCS 2018*. pp. 37–54.
12. Tipaldi M., Glielmo L. A Survey on Model-Based Mission Planning and Execution for Autonomous Spacecraft. *IEEE Systems Journal*. 2018. vol. 12. no. 4. pp. 3893–3905.
13. Lianxiang J., Peipei X., Xuyang F. Software Reconfiguration Technology for Serviceable Satellite OBDH System. *Proceedings of the Second International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)*. 2017. pp. 100–104.
14. Amigoni F. et al. Aggregating Models for Anomaly Detection in Space Systems: Results from the FCTMAS Study. *International Conference on Intelligent Autonomous Systems*. 2018. pp. 142–160.
15. Wang D.-Y. et al. Connotation and Research of Reconfigurability for Spacecraft Control Systems: A Review. *Acta Automatica Sinica*. 2017. vol. 43(10). pp. 1687–1702.
16. Mehdi J. Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system. *Aerospace Science and Technology*. 2015. vol. 47. pp. 467–472.
17. Nayak A., Reyes L.R., Lee S., Nof S.Y. Resource sharing in cyber-physical systems: modelling framework and case studies. *International Journal of Production Research*. 2016. vol. 54(23). pp. 6969–6983.
18. Theorin A. et al. An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. *International Journal of Production Research*. 2016. pp. 1297–1311.
19. Oesterreich T.D., Teuteberg F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*. 2016. vol. 83. pp. 121–139.
20. Božek A., Wysocki M. Flexible Job Shop with Continuous Material Flow. *Int. J. Prod. Res.* 2015. 53. pp. 1273–1290.
21. Pinha D., Ahluwalia R., Carvalho A. Parallel Mode Schedule Generation Scheme // Parallel mode schedule generation scheme. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. vol. 48. no. 3. pp. 794–799.

22. Battaia O., Dolgui A., Guschinsky N. Decision support for design of reconfigurable rotary machining systems for family part production. *International Journal of Production Research*. 2017. vol. 55(5). pp. 1368–1385.
23. Blazewicz J., Pesch E., Trystram D., Zhang G. New Perspectives in Scheduling Theory. *Journal of Scheduling*. 2015. vol. 18. pp. 333–334.
24. Kalinin V.N., Sokolov B.V. A dynamic model and an optimal scheduling algorithm for activities with bans of interrupts. *Autom. Remote Control*. 1987. vol. 48. pp. 88–94.
25. Vasil'ev S.N. [From classical regulation problems to intelligent control]. *Teoriya i sistemy upravleniya – Control theory and systems*. 2001. vol. 1. pp. 5–22. (In Russ.).
26. Shestopalov M.YU. [Fault-tolerant control of cyclic multistage technological processes]. *Innovacii – Innovation*. 2015. vol. 4(198). pp. 8–12. (In Russ.).
27. Shestopalov M.YU., Imaev D.H. [Resilient management of complex systems] // *Distancionnye obrazovatel'nye tekhnologii: Materialy III Vseros-sijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Otv. Red. V.N. Taran*. 2018. pp. 259–266. (In Russ.).
28. Shestopalov M.Yu., Imaev D.H., Korablev Yu.A., Kvashnin S.V. [Design of control systems for geographically distributed objects]. *Innovacii – Innovation*. 2018. vol. 10(240). pp. 100–107. (In Russ.).
29. Dzyubanovskij S.A., Ozeryannyj N.A. [Automatic control systems with reconfiguration]. *Izmerenie, kontrol', avtomatizaciya – Measurement, control, automation*. 1990. vol. 4(76). pp. 62–80. (In Russ.).
30. Tsvirkun A.D. *Osnovy sinteza struktury slozhnyh sistem* [Fundamentals of the synthesis of the structure of complex systems]. M.: Science. 1982. 200 p. (In Russ.).
31. Pavlov A.N. The Technique of Multi-Criteria Decision-Making in the Study of Semi-Structured Problems. Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). pp. 131–140.
32. Kalinov M.I., Rodionov V.A., Cherkashin V.G. [The influence of the roll of the spacecraft on the efficiency of solving the problem of observing sea objects]. *Informatizaciya i svyaz' – Informatization and communication*. 2020. vol. 5. pp. 151–157. (In Russ.).

В.Я. ПРОРОК, А.А. КАРЫТКО, А.С. ГОРЯНСКИЙ, Е.С. ЕМЕЛЬЯНОВА
**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРБИТАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ИНФОРМАЦИИ
О КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ**

Пророк В.Я., Карытко А.А., Горянский А.С., Емельянова Е.С. **Оценка возможностей орбитальных оптических средств по получению информации о космических объектах.**

Аннотация. Цель исследования заключается в выборе оптимальных условий сбора некоординатной информации о космическом объекте орбитальным оптическим средством при прохождении обоими объектами окрестностей точек минимального расстояния между их орбитами. Для достижения указанной цели предложен количественный показатель, характеризующий меру возможности получения некоординатной информации о космическом объекте с требуемым уровнем качества. Аргументами функции, характеризующей вводимый показатель, являются: расстояние между объектами; относительная скорость объектов; фазовый угол освещенности космического объекта Солнцем по отношению к оптико-электронному средству; длительность интервала времени, в течение которого оба объекта находятся в окрестности точки минимума расстояния между их орбитами. Расчет величины показателя обеспечивается решением трех частных задач исследования.

Первая задача – поиск окрестностей, включающих минимальные расстояния между орбитами космического объекта и орбитального оптического средства. Для ее решения используется быстрый алгоритм расчета минимального расстояния между орбитами, при этом осуществляется прогноз дрейфа найденных окрестностей на интервале времени до 60 часов.

Вторая задача – оценка характеристик движения и условий оптической видимости космического объекта в окрестностях точек минимума расстояния между его орбитой и орбитой оптического средства. Решение данной задачи осуществляется средствами имитационного моделирования с использованием библиотеки прогноза движения космических объектов SGP4.

Третья задача – обоснование и расчет показателя, характеризующего меру возможности получения некоординатной информации о космическом объекте. Для решения данной задачи разработана система правил нечеткого логического вывода, которая используется в качестве входных данных алгоритма Мамдани.

Рассматриваемая методика реализована программно, в ходе вычислительного эксперимента проведена оценка возможности получения некоординатной информации по низкоорбитальным и геостационарным космическим объектам.

Применение предложенного показателя обеспечивает повышение результативности процедуры сбора некоординатной информации о космических объектах за счет выбора наиболее информативных альтернатив контроля космических объектов из доступного множества возможных наблюдений на заданном интервале планирования сбора информации о космических объектах.

Ключевые слова: околоземное космическое пространство, оптико-электронное средство, космический объект, нечеткий логический вывод, сближение космических объектов

1. Введение. Основным источником информации об объектах искусственного происхождения, находящихся в околоземном космическом

пространстве (ОКП), являются наземные оптико-электронные, радиолокационные и радиотехнические средства мониторинга ОКП. Данные средства используются для сбора координатной и некоординатной информации (КИ, НКИ) о космических объектах (КО). Периодичность сбора указанных видов информации определяется географическим расположением наземных средств мониторинга ОКП, метеорологическими условиями в районе дислокации средств, параметрами орбит наблюдаемых КО и в среднем составляет от нескольких часов до нескольких суток. Повышение периодичности сбора информации о КО достигается за счет привлечения большого числа территориально разнесенных высокоинформативных и высокопроизводительных наблюдательных средств – регулярных источников измерительной информации о множестве КО в ОКП.

На основе анализа радиолокационных сигнатур и кривых блеска КО, получаемых наземными средствами мониторинга ОКП [1], осуществляется классификация типовых КО, производится оценка массогабаритных характеристик КО, определяется факт стабилизации КО, выделяются конструктивные элементы КО, форма которых близка к форме геометрических примитивов: сферы, цилиндра, конуса, параллелограмма. Данная информация используется для оперативного определения состояния КО, обнаружения фактов воздействия на КО фрагментов космического мусора (КМ), устранения негативных эффектов данного воздействия.

Вместе с тем достижения научно-технического прогресса в области производства электронно-компонентной базы, используемой при проектировании и создании космических аппаратов (КА), обусловили универсализацию базовых платформ КА, а также их общую минимизацию, при этом сложность КА как технических систем возросла. В данных условиях НКИ (прежде всего кривые изменения блеска и оптические изображения КО), формируемая сетью наземных средств мониторинга ОКП, не обеспечивает качественное распознавание и селекцию КО, оперативный контроль деградации элементов конструкции КО с течением времени вследствие столкновений объекта с мелкогабаритными фрагментами КМ, линейный размер которых меньше 10 см [2].

Естественным этапом дальнейшего развития методов и методик распознавания и контроля состояния КО является внедрение в их состав методов построения трехмерных моделей КО на основе оптических изображений и радиолокационных портретов объектов, сформированных средствами мониторинга ОКП космического базирования [3-11]. Применение орбитальных оптико-электронных средств (ОЭС) обеспечивает возможность сбора информации о КО с расстояния до сотен метров, при этом исключаются атмосферные искажения, становятся доступными ракурсы наблюдения, недоступные наземным средствам мониторинга ОКП. Основными функциональными элементами ОЭС являются:

- устройство наведения зеркально-линзового объектива с полем зрения около 1 градуса и угловым разрешением не более 0,4 угловых секунды;
- космическая платформа;
- управляющая вычислительная система;
- фоточувствительная ПЗС-матрица.

Применение ОЭС космического базирования основывается на результатах выполнения процедуры планирования операций сбора НКИ о КО (контроля КО). В качестве контролируемого объекта возможно рассматривать любой объект, период вращения которого вокруг центра масс превышает 6 секунд и расстояние от орбиты которого до орбиты ОЭС не превышает предельно допустимого значения, составляющего десятки километров. Реализация плана сбора НКИ о КО, как правило, сопряжена с выполнением процедуры коррекции орбиты ОЭС либо совершением маневра. Коррекция параметров орбиты или совершение маневра приводят к расходу рабочего тела и сокращению срока активного существования ОЭС космического базирования. Таким образом, возникает задача, заключающаяся в необходимости проведения предварительной оценки возможности сбора информации о КО средством космического базирования в зависимости от условий контроля.

Условия сбора информации о КО характеризуются следующим множеством факторов:

- величиной расстояния между контролируемым объектом и ОЭС космического базирования – ΔR ;
- величиной угловой скорости контролируемого объекта относительно ОЭС космического базирования – $\Delta V_{уг}$;
- величиной фазового угла контролируемый объект-Солнце-ОЭС космического базирования – ψ ;
- длительностью интервала времени Δt , в течение которого параметры $\Delta R, \Delta V_{уг}, \psi$ находятся в области допустимых значений;
- погрешностью определения координат ОЭС и контролируемого объекта;
- конструктивными особенностями объекта контроля – геометрическими примитивами, образующими поверхность объекта, а также величины коэффициента альбедо его поверхности.

Наличие обоснованной количественной меры возможности сбора информации о КО позволяет повысить эффективность применения ОЭС космического базирования за счет рационального планирования его ресурсов и формирования оптимальных условий сбора НКИ о КО, обеспечивающих высокое качество получаемых результатов.

Комплексное применение НКИ, формируемой наземными средствами мониторинга ОКП, в совокупности с информацией от ОЭС космического базирования обеспечивает сокращение длительности цикла функционирования автоматизированных систем сбора и обработки информации о событиях в ОКП, обеспечивает проактивность в процедурах планирования применения средств мониторинга ОКП [12].

Исходные данные, используемые для решения рассматриваемой задачи, формируются на основе анализа результатов, полученных при разработке систем компьютерного зрения, совершенствовании процесса управления ориентацией КА [13-19], а также условий, в которых проводились уже совершившиеся операции сбора НКИ о КО [20-22].

2. Исходные данные и постановка задачи исследования.

Обеспечение возможности сбора НКИ о КО с использованием ОЭС космического базирования связано с решением задачи сближения КО. Целесообразно рассматривать два частных случая ее решения: первый – плоскость орбиты контролируемого КО компланарна плоскости орбиты ОЭС космического базирования; второй – плоскости сближающихся объектов не компланарны. Разница в периодах обращения контролируемого объекта и ОЭС космического базирования обеспечивает периодическое повторение взаимных положений объектов (фазирование объектов) в окрестностях точек пересечения орбит, тем самым формируются условия, необходимые для проведения операции сбора НКИ о КО.

Таким образом, решение рассматриваемой задачи требует решения частной задачи прогнозирования изменения параметров орбиты КО и его положения в пространстве с течением времени под действием вековых и периодических возмущающих факторов, а также задачи расчета интервалов времени совместного нахождения контролируемого и контролирующего объектов в окрестности точки минимума расстояния между их орбитами.

Общая математическая теория поиска довольно сложна и заметно усложняется, если искомый объект совершает какое-либо движение. В контексте данного исследования задача поиска контролируемого объекта в окрестности точки минимума расстояния между орбитами сводится к решению задачи «убегающей» цели [23], поскольку КО способен изменять параметры дифференциального уравнения в частных производных, используемых для прогноза его координат.

Случайные ошибки в исходных данных, используемых для прогноза координат КО, и ошибки, обусловленные несовершенством процедуры прогноза положения КО, приводят к возникновению неодно-

значности прогнозирования положения объекта. Традиционно формализованное представление неоднозначности обеспечивается методами математической статистики и теории вероятностей, при использовании которых положение объекта в пространстве задается функцией плотности распределения $u(x, t)$, где x – точка, принадлежащая области трехмерного Евклидова пространства Ω , включающей истинное положение объекта в момент времени t . При этом параметры плотности распределения ошибок координат КО зависят от длительности интервала времени, прошедшего с момента последнего уточнения параметров орбиты КО и типа его орбиты. Следствием указанных факторов является необходимость разработки стратегии поиска КО в области Ω , реализация которой требует применения численных методов расчета и не всегда обеспечивает получение единственного решения. При этом использование вероятностного подхода серьезно усложняет процесс формализованного учета конструктивных особенностей КО и их влияния на его фотометрические характеристики, а также угловых скоростей движения контролирующего и контролируемого объекта друг относительно друга. Таким образом, вероятностный показатель обнаружения и контроля КО с применением ОЭС космического базирования является ненадежным и слабо формализуемым.

Оценку параметров сближения космических объектов и складывающихся при этом условий сбора НКИ целесообразно осуществлять в окрестностях точек пересечения их орбит. Исторически решение задачи поиска точек и окрестностей пересечения орбит получило наибольшее развитие при исследовании вопросов, связанных с предупреждением астероидной или кометной опасности для планет Солнечной системы. Существуют численные, аналитические и численно-аналитические подходы к решению данной задачи, обладающие различной вычислительной сложностью и достоверностью результатов, получаемых с их помощью, основные положения этих методов изложены в работах [24-26].

В процессе решения задачи оценки возможности сбора НКИ о КО целесообразно рассматривать три возможных события:

- 1) контролируемый КО и ОЭС космического базирования двигаются на встречных курсах;
- 2) ОЭС космического базирования двигается вдогонку контролируемого КО;
- 3) объекты двигаются по пересекающимся курсам.

Наиболее благоприятные условия для решения рассматриваемой в исследовании задачи складываются при возникновении первого или

второго события, вместе с тем данные события редко возникают на практике. Таким образом, наибольший практический интерес представляет исследование возможности сбора НКИ о КО средствами ОЭС космического базирования на пересекающихся курсах.

Результативность выполнения операции сбора НКИ определяется особенностями взаимного движения и расположения КО и ОЭС относительно Солнца, а также достоверностью априорной координатной и некоординатной информации об обоих объектах. Следовательно, обоснование и формализация показателя, характеризующего меру возможности контроля объекта ОЭС – I , позволит повысить результативность процесса сбора НКИ и тем самым обеспечить достижение требуемых характеристик систем мониторинга ОКП в сложных условиях космической обстановки.

На основе проведенного выше анализа в контексте решаемой задачи показатель I рассчитывается на основе математического аппарата теории нечетких множеств и нечеткого логического вывода. Применение теории нечетких множеств обеспечивает учет неопределенности, свойственной объекту исследования, и обусловлено неполнотой исходных данных о контролируемом КО, виде и параметрах функции распределения случайных событий, относящихся к возможности нахождения контролируемого КО в том или ином состоянии.

В качестве исходных данных о параметрах орбит КО в работе используется информация TLE (*two-line element set*) [27] базы данных системы NORAD, свободно распространяемая в интернете. Данные TLE используются для формирования множества КО:

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\},$$

где o_i – i -ый элемент множества КО, $i \in [1; n]$, n – мощность формируемого множества.

С каждым элементом o_i отождествляется множество Кеплеровых элементов орбит, заданных на момент времени эпохи t .

Условия контроля КО характеризуются множеством параметров встречи контролируемого КО и ОЭС $x = \{\Delta R, \Delta V_{y2}, \psi, \Delta t\}$, оказывающих влияние на качество результатов контроля объектом o_i объекта o_j на различных витках обращения.

Задача, решаемая в данном исследовании, заключается в выборе среди множества формируемых альтернатив контроля КО таких

витков (условий контроля), на которых мера возможности контроля КО I является максимальной. Таким образом, цель выбора задается с помощью целевой функции I , характеризующей меру возможности контроля КО:

$$x^* = \arg \max I(x), I(\bullet): \mathbb{R}^4 \rightarrow [0,1]. \quad (1)$$

Достижение цели (1) обеспечивается последовательным решением трех частных задач исследования:

1) расчет окрестностей точек минимального расстояния между орбитами КО;

2) оценка характеристик движения и условий оптической видимости контролируемого КО относительно ОЭС космического базирования в окрестностях точек минимума расстояния между их орбитами (пересечения орбит);

3) обоснование и расчет показателя, характеризующего меру возможности сбора НКИ о КО для заданных условий оптической видимости.

3. Методика расчета окрестностей точек минимального расстояния между орбитами КО. В ходе решения данной задачи используется следующая классификация орбит КО по высоте: низкие околоземные орбиты (НОО) – диапазон высот от 160 до 2000 км.; высокие эллиптические орбиты (ВЭО) – высота в апогее свыше 2000 км.; геостационарные орбиты (ГСО). Количество точек пересечения орбит двух КО n может быть:

1) $n = 0$, если рассматриваемые КО характеризуются орбитами различного типа, например, НОО и ГСО;

2) $n = \overline{1,2}$, если пересечение происходит в перигейной области ВЭО с НОО или апогейной области ВЭО с ГСО (рисунок 1а),

3) $n = 2$, если плоскости орбит, принадлежащих одному типу, не компланарны (рисунок 1б),

4) $n = 4$, если плоскости орбит, принадлежащих одному типу, компланарны (рисунок 1в),

5) $n = \infty$, если орбиты принадлежат одному типу, компланарны и имеют множество соприкасающихся областей (рисунок 1г).

Окрестности точек пересечения орбит рассчитываются с использованием алгоритма быстрой оценки минимального расстояния между орбитами, представленного в работе [25].

Геометрически орбиты представляют собой эллипсы с фокусом в центре Земли. В методике рассматриваются плоскости эллипсов

$e_1, e_2 \subset \mathbb{R}^3$, где \mathbb{R}^3 – Евклидово пространство с общим фокусом в притягивающем центре. Пусть эллипс e_1 – орбита контролируемого объекта o_i , эллипс e_2 – орбита ОЭС o_{w_j} . Минимальное расстояние между эллипсами $d(e_1, e_2)$ характеризуется критерием вида:

$$d(e_1, e_2) = \min_{E_1 \in e_1, E_2 \in e_2} d(E_1, E_2), \quad (2)$$

где E_1, E_2 – точки, принадлежащие кривым эллипсов e_1, e_2 соответственно.

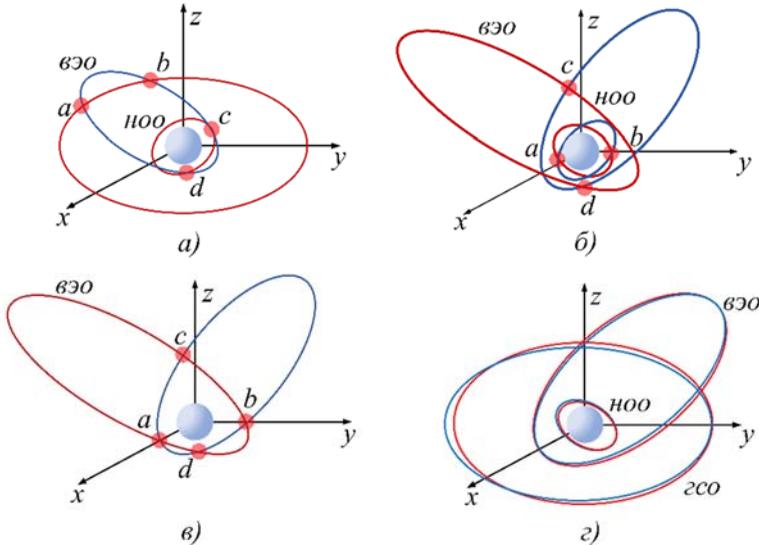


Рис. 1. Рассматриваемые варианты пересечения орбит КО

Точки E_1, E_2 рассчитываются для заданных значений эксцентрических аномалий u_1 и u_2 соответствующих орбит. Таким образом, выражение (2) преобразуется к виду:

$$d(e_1, e_2) = \min_{u_1, u_2 \in [0, 2\pi]} d(E_1(u_1), E_2(u_2)),$$

где $E_1(u_1)$ – точка, принадлежащая e_1 с эксцентрисической аномалией u_1 ; $E_2(u_2)$ – точка, принадлежащая e_2 с эксцентрисической аномалией u_2 .

Входной информацией методики являются множество O и интервал времени $[t_n; t_k]$, на котором производится оценка меры возможности проведения контроля КО.

Выходной информацией методики является множество эксцентрисических аномалий входа, параметра и выхода – $u_{вх}, u_{пар}, u_{вых}$ орбит контролируемого КО o_{i_j} :

$$U^{(t)} = \left\{ \left\langle u_{вх}^{(t)}, u_{пар}^{(t)}, u_{вых}^{(t)} \right\rangle_1, \dots, \left\langle u_{вх}^{(t)}, u_{пар}^{(t)}, u_{вых}^{(t)} \right\rangle_n \right\}$$

и ОЭС o_{w_j} :

$$U^{(w)} = \left\{ \left\langle u_{вх}^{(w)}, u_{пар}^{(w)}, u_{вых}^{(w)} \right\rangle_1, \dots, \left\langle u_{вх}^{(w)}, u_{пар}^{(w)}, u_{вых}^{(w)} \right\rangle_n \right\},$$

характеризующих участки траекторий орбит, для которых выполняется критерий:

$$\begin{cases} d(u_{пар}^{(t)}, u_{пар}^{(w)}) \leq d(u_{вх}^{(t)}, u_{вх}^{(w)}) \leq R_{крит}; \\ d(u_{пар}^{(t)}, u_{пар}^{(w)}) \leq d(u_{вых}^{(t)}, u_{вых}^{(w)}) \leq R_{крит}, \end{cases} \quad (3)$$

где $R_{крит}$ – максимальное расстояние между орбитами, обеспечивающее возможность получения НКИ о КО.

Следствием влияния возмущающих факторов на орбиты КО является равномерное движение точек минимума расстояния (ТМР) между орбитами и их окрестностей.

В целях учета смещения ТМР для элементов множеств $U^{(t)}, U^{(w)}$ методами регрессионного анализа выполняется установление зависимости изменения параметров i -ой ТМР $\left\langle u_{вх}^{(t)}, u_{пар}^{(t)}, u_{вых}^{(t)} \right\rangle_i$, $\left\langle u_{вх}^{(w)}, u_{пар}^{(w)}, u_{вых}^{(w)} \right\rangle_i$ с течением времени. Для этого применяется метод наименьших квадратов. Для аппроксимации зависимости

эксцентрической аномалии от времени применяется полином первой степени вида:

$$u_i^{(t,w)}(\tau) = a_i\tau + b_i, \quad (4)$$

где $u_i^{(t,w)}$ – значения эксцентрических аномалий, при которых достигаются минимальные значения расстояний между орбитами КО, принадлежащие одной и той же окрестности ТМР, τ – значение времени эпохи, a_i, b_i – неизвестные коэффициенты линейного уравнения.

При этом в рамках одного витка КО координаты ТМР и ее окрестностей считаются постоянными.

4. Методика оценки характеристик движения и условий оптической видимости контролируемого КО относительно ОЭС космического базирования в окрестностях точек минимума расстояния между их орбитами. Для найденных ТМР и их окрестностей, характеризующихся эксцентрическими аномалиями $u_{вх}, u_{нар}, u_{вых}$, производится оценка характеристик движения и условий оптической видимости контролируемого КО относительно ОЭС космического базирования. Методика основана на использовании модели прогноза движения КО SGP4 [28]. Модель учитывает вековые и периодические отклонения элементов орбит $E(\tau)$ на момент времени $\tau + \Delta\tau$, где $\Delta\tau$ – время, прошедшее с момента времени эпохи τ , на которые заданы параметры орбит в формате TLE.

Входной информацией методики являются: множества $U^{(t)}, U^{(w)}, N$, где N – номер витка ОЭС, на котором производится оценка характеристик движения и условий оптической видимости контролируемого КО.

Выходной информацией является множество параметров $\{\Delta R, \Delta V_{уг}, \psi, t\}$, характеризующих условия для получения НКИ о КО.

Для выходных параметров установлены следующие области допустимых значений:

- 1) $\Delta R \in [0; 100]$ – расстояние между объектами o_i, o_{w_j} в окрестности ТМР между орбитами соответствующих объектов (км),
- 2) $\Delta V_{уг} \in [0; 3600]$ – угловая скорость движения ОЭС o_{w_j} относительно объекта o_i в окрестности ТМР (уг.с/с),

3) $\psi \in [0; 120]$ – фазовый угол ОЭС-Солнце-контролируемый КО (град),

4) $t \in [0; 60]$ – время совместного нахождения ОЭС и контролируемого КО в окрестности ТМР, в течение которого значения первых трех параметров принадлежат области допустимых значений (с).

Методика заключается в последовательном выполнении следующих шагов.

Шаг 1. Выполняется расчет времени τ начала витка ОЭС, на котором планируется выполнить сбор НКИ о КО:

$$\tau = \tau_0 + \frac{\lceil 2\pi(1 + \Delta N) - m \rceil}{\eta}, \eta = \frac{2\pi N^*}{T},$$

где τ_0 – время начала эпохи, на которое заданы параметры орбиты ОЭС в формате TLE, ΔN – разница между номером планируемого витка и номером витка на момент эпохи, m – средняя аномалия ОЭС на момент времени τ_0 , N^* – количество витков ОЭС вокруг Земли в сутки, T – период вращения Земли вокруг оси в секундах, в расчетах принимается равным 86400.

Шаг 2. С использованием выражения (4) уточняются значения $\langle u_{\text{вх}}^{(t)}, u_{\text{пар}}^{(t)}, u_{\text{вых}}^{(t)} \rangle_i$, $\langle u_{\text{вх}}^{(w)}, u_{\text{пар}}^{(w)}, u_{\text{вых}}^{(w)} \rangle_i$ на момент времени τ .

Шаг 3. Выполняется переход от эксцентрических аномалий $\langle u_{\text{вх}}^{(t)}, u_{\text{пар}}^{(t)}, u_{\text{вых}}^{(t)} \rangle_i$ и $\langle u_{\text{вх}}^{(w)}, u_{\text{пар}}^{(w)}, u_{\text{вых}}^{(w)} \rangle_i$ к соответствующим значениям средних аномалий $\langle m_{\text{вх}}^{(t)}, m_{\text{пар}}^{(t)}, m_{\text{вых}}^{(t)} \rangle_i$ и $\langle m_{\text{вх}}^{(w)}, m_{\text{пар}}^{(w)}, m_{\text{вых}}^{(w)} \rangle_i$ с помощью уравнения Кеплера:

$$m_i^{(t)} = u_i^{(t)} - \varepsilon^{(t)} \sin u_i^{(t)}, m_i^{(w)} = u_i^{(w)} - \varepsilon^{(w)} \sin u_i^{(w)},$$

где $m_i^{(t)}, m_i^{(w)}$ – значения средних аномалий i -ой точки на орбите контролируемого объекта o_i и ОЭС o_w при соответствующих значениях эксцентрических аномалий $u_i^{(t)}$ и $u_i^{(w)}$, $i = \{\text{вх, пар, вых}\}$, $\varepsilon^{(t)}, \varepsilon^{(w)}$ – эксцентриситеты орбит контролируемого объекта o_i и ОЭС o_w соответственно.

Шаг 4. Для заданного витка контроля рассчитываются интервалы времени прохождения в окрестности ТМР $\tau_{\text{ТМР}}^{(w)} \in [\tau_{\text{ВХ}}^{(w)}, \tau_{\text{ВЫХ}}^{(w)}]$ ОЭС и $\tau_{\text{ТМР}}^{(t)} \in [\tau_{\text{ВХ}}^{(t)}, \tau_{\text{ВЫХ}}^{(t)}]$ контролируемого КО:

$$\tau_{\text{ТМР}}^{(t,w)} = \frac{\tau_0 + [m_i^{(t,w)} - m_0^{(t,w)}]}{\eta}.$$

Шаг 5. Производится анализ рассчитанных интервалов $[\tau_{\text{ВХ}}^{(w)}, \tau_{\text{ВЫХ}}^{(w)}]$ и $[\tau_{\text{ВХ}}^{(t)}, \tau_{\text{ВЫХ}}^{(t)}]$. Итоговый интервал оценки характеристик движения и условий оптической видимости контролируемого КО относительно ОЭС в окрестности ТВР задается выражением:

$$[\tau_{\text{ВХ}}^*, \tau_{\text{ВЫХ}}^*] = [\tau_{\text{ВХ}}^{(t)}, \tau_{\text{ВЫХ}}^{(t)}] \cap [\tau_{\text{ВХ}}^{(w)}, \tau_{\text{ВЫХ}}^{(w)}].$$

Если $[\tau_{\text{ВХ}}^*, \tau_{\text{ВЫХ}}^*] \neq \emptyset$, то устанавливается начальное значение модельного времени $\tau^* = \tau_{\text{ВХ}}^*$ и выполняется переход к шагу 6, иначе алгоритм завершает свою работу, контроль объекта заданным ОЭС невозможен.

Шаг 6. Проверяется критерий $\tau^* \leq \tau_{\text{ВЫХ}}^*$. Если критерий выполняется, то осуществляется переход к шагу 7 алгоритма, иначе работа алгоритма завершается, результаты алгоритма сохраняются согласно критериям:

$$\Delta R = \min \Delta R^*, \Delta V_{\text{гТ}} = \min \Delta V_{\text{гТ}}^*, \psi = \min \psi^*, t = \tau_{\text{ВЫХ}}^* - \tau_{\text{ВХ}}^*.$$

Шаг 7. Процесс моделирования осуществляется согласно принципу Δt , где Δt – дискретность прогноза положения объектов. В результате применения модели *SGP4* формируются шестимерные векторы для пары рассматриваемых объектов $\vec{P}^{(t,w)} = (X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$.

Шаг 8. Производится расчёт фазового угла освещенности ψ [29] контролируемого КО:

$$\psi = \arccos \frac{\left| r_{o_{t_i}} - r_{o_{w_j}} \right|^2 + \left| r_{sun} - r_{o_{t_i}} \right|^2 - \left| r_{sun} - r_{o_{w_j}} \right|^2}{2 \left(r_{o_{t_i}} - r_{o_{w_j}} \right) \left(r_{sun} - r_{o_{t_i}} \right)},$$

где $r_{o_{t_i}}$ – радиус-вектор, описывающий положение контролируемого КО в геоцентрической инерциальной СК, $r_{o_{w_j}}$ – радиус-вектор, описывающий положение ОЭС в геоцентрической инерциальной СК, r_{sun} – радиус-вектор, описывающий положение Солнца в геоцентрической инерциальной СК и рассчитываемый с помощью модели *SGP4*.

Рассчитанное значение ψ добавляется в множество ψ^* .

Шаг 9. Расчет расстояния ΔR между контролируемым КО и ОЭС осуществляется с помощью выражения:

$$\Delta R = \sqrt{\left(X^{(t)} - X^{(w)} \right)^2 + \left(Y^{(t)} - Y^{(w)} \right)^2 + \left(Z^{(t)} - Z^{(w)} \right)^2}.$$

Рассчитанное значение ΔR добавляется в множество ΔR^* .

Шаг 10. Угловая скорость движения ОЭС относительно контролируемого КО осуществляется согласно выражению:

$$\Delta V_{уг} = \frac{\left(\alpha(\tau + \Delta\tau) - \alpha(\tau) \right)}{\Delta\tau},$$

где $\alpha(\tau)$ – значение угла, образованного пересечением вектора локации ОЭС-контролируемый КО и вектора скорости ОЭС в момент времени τ .

Рассчитанное значение $\Delta V_{уг}$ добавляется в множество $\Delta V_{уг}^*$.

Шаг 11. Выполняется коррекция модельного времени $\tau^* = \tau + \Delta\tau$, переход к шагу 6 методики.

5. Методика обоснования и расчета показателя, характеризующего меру возможности сбора НКИ о КО для заданных условий оптической видимости. Мера возможности получения НКИ о КО I является функцией от множества аргументов $\Delta R, \Delta V_{уг}, \psi, t$, являющихся результатом работы вышерассмотренной методики.

В качестве меры возможности получения НКИ о КО для каждой ТМР и ее окрестности применяется функция принадлежности $\mu_I(\Delta R, \Delta V_{\text{уг}}, \psi, t)$. Определение вида функции $\mu_I(\Delta R, \Delta V_{\text{уг}}, \psi, t)$ осуществляется с использованием алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани. Схематично структура нечёткого логического вывода представлена на рисунке 2.

Входной информацией рассматриваемой методики является множество параметров: $\Delta R, \Delta V_{\text{уг}}, \psi, t$.

Выходной информацией алгоритма является значение меры возможности получения НКИ о КО: $I \in [0, 0; 1, 0]$.

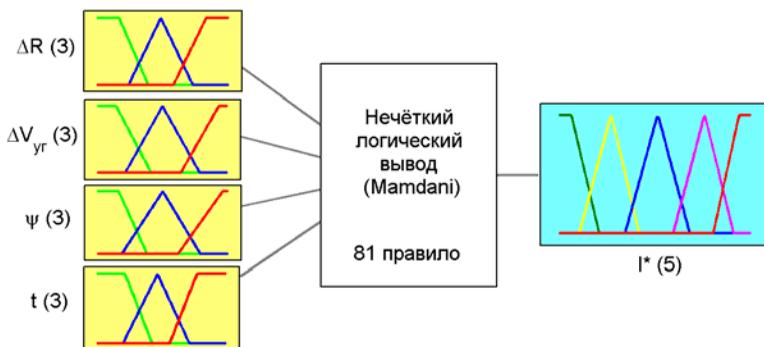


Рис. 2. Схема нечёткого логического вывода Мамдани

Множество непосредственных реализаций значений входных параметров алгоритма $\Delta R, \Delta V_{\text{уг}}, \psi, t$ обозначим:

$$V' = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4\}, \quad (5)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – численные значения $\Delta R, \Delta V_{\text{уг}}, \psi, t$ соответственно.

Множество соответствующих численным значениям (5) входных лингвистических переменных (ЛП) обозначим:

$$V = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}, \quad (6)$$

где β_1 – «расстояние»; β_2 – «относительная угловая скорость»; β_3 – «фазовый угол»; β_4 – «время».

Выходная ЛП – «контроль» характеризует меру возможности проведения контроля в заданных условиях $\Delta R, \Delta V_{\text{гр}}, \psi, t$ и обозначается I .

Методика заключается в выполнении следующей последовательности шагов.

Шаг 1. Определяются базовые терм-множества T для каждой ЛП с соответствующими функциями принадлежности каждого термина. Для входных ЛП (6) используется три терм-множества:

$$T_{\beta_i} = \{M, CP, B\},$$

где M – малое значение β_i ; CP – среднее значение β_i ; B – большое значение β_i .

Для выходной ЛП I используется пять терм-множеств:

$$T_I = \{HC, HD, BC, D, C\},$$

где HC – не состоится, HD – не допустим, BC – возможно состоится, D – допустим, C – состоится.

Функции принадлежности $\mu(CP)$, $\mu(HD)$, $\mu(BC)$, $\mu(D)$ характеризуются треугольными нечёткими числами (ТНЧ) типа $\langle a, \alpha, \beta \rangle$, где a – модальное число, α, β – левые и правые коэффициенты нечёткости.

Функции принадлежности термов $\mu(M)$, $\mu(B)$, $\mu(HC)$, $\mu(C)$ характеризуются трапециевидными нечёткими интервалами (ТНИ) типа $\langle a, b, \alpha, \beta \rangle$ где a, b – нижние и верхние модальные значения, α, β – левые и правые коэффициенты нечёткости.

На основе результатов анализа устанавливаются модальные, левые и правые коэффициенты нечёткости, соответствующие введённым терминам T_{β_i}, T_I для входных и выходной ЛП.

Шаг 2. В результате анализа полученных данных формулируются эвристические правила следующего вида:

«Если расстояние малое и угловая скорость малая и фазовый угол малый и время большое, то контроль состоится.»

В соответствии с данной формулировкой и заданными на шаге 1 функциями принадлежности базовых терм-множеств для входных и выходных ЛП формируется база правил $P = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, где $n = \overline{1; 81}$, представленная в таблице 1.

Шаг 3. Для каждого конкретного числового значения α_i всех входных параметров алгоритма V' определяются степени принадлежности $\mu(\alpha_i)$ соответствующим термам T_{β_i} входной ЛП. Полученные значения $\mu(\alpha_i)$ формируют формализованную запись множества подусловий. Таким образом, на данном шаге выполняется процедура фазификации входных ЛП алгоритма.

Таблица 1. База правил нечетких продукций

		$\Delta V_{\text{ут}}$									
		М			СР			Б			
ΔR	t	ψ	М	СР	Б	М	СР	Б	М	СР	Б
		М	М	ВС	Д	С	ВС	Д	С	ВС	Д
СР			ВС	Д	С	ВС	Д	Д	НД	ВС	ВС
Б			НС								
С Р		М	НД	Д	С	ВС	ВС	Д	НД	ВС	Д
		СР	НД	ВС	ВС	НД	ВС	ВС	НД	ВС	ВС
		Б	НС								
Б		М	НС	ВС	Д	НС	ВС	Д	НС	ВС	ВС
		СР	НС	НД	ВС	НС	НД	НД	НС	НС	НД
		Б	НС								

Формализованная запись правила примет следующий вид:

$$R_i : \{U_i, C_i\},$$

где U_i – множество подусловий правил нечётких продукций P , сформированных в форме нечётких высказываний для каждой входной ЛП, причём $U_i : \{u_{\beta_1}, u_{\beta_2}, u_{\beta_3}, u_{\beta_4}\}$, здесь $u_{\beta_i} : \beta_i \in T_{\beta_i}$; C_i – множество заключений правил нечётких продукций P , сформированных в форме нечётких высказываний для выходной ЛП I ; i – номер правила в базе правил, $i = \overline{1; 8}$.

Шаг 4. Производится агрегирование подусловий с использованием операции логический минимум. Условие i -го правила примет вид:

$$U_i = \min(\mu(\alpha_1), \mu(\alpha_2), \mu(\alpha_3), \mu(\alpha_4)).$$

Правила, для которых $\mu(\alpha_i) \neq 0$, считаются активными и используются в дальнейшем для системы нечёткого вывода.

Шаг 5. Этап активизации подзаклучений тривиален, так как все нечёткие правила продукций содержат по одному подзаклучению в форме нечётких лингвистических высказываний, а весовые коэффициенты приняты по умолчанию со значением 1.

Шаг 6. Производится аккумулятивное подзаклучение правил, которые на шаге 4 приняты активными, с помощью операции логический максимум. В результате формируется нечёткое множество с функцией принадлежности $\mu_{\Sigma}(I)$:

$$\mu_{\Sigma}(I) = \max(\mu_{\Sigma}(I_1), \mu_{\Sigma}(I_2), \mu_{\Sigma}(I_3), \mu_{\Sigma}(I_4)).$$

Шаг 7. Производится дефаззификация выходной лингвистической переменной I методом центра тяжести для значения функции принадлежности $\mu_{\Sigma}(I)$ и приводит к значению меры возможности получения НКИ о КО:

$$I^* = \frac{\int_0^1 I \mu_{\Sigma}(I) dI}{\int_0^1 \mu_{\Sigma}(I) dI}.$$

Величина I^* является результатом решения задачи нечёткого вывода для входных лингвистических переменных $V = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}$ и позволяет разрешить (1).

6. Вычислительный эксперимент. Разработанная методика реализована программно с использованием языков программирования C++, R, библиотек прикладного программирования Qt, OpenGL, OpenSceneGraph, sgp4, OSGEarth, пакета прикладных программ Matlab. В ходе описываемого ниже вычислительного эксперимента рассматривались комбинации объектов, принадлежащих разным типам орбит и условиям встречи. Величина $R_{\text{крит}}$ принималась равной 100 километрам, приращение эксцентрисической аномалии $\Delta u = 0.05$ град.

В вычислительном эксперименте в области геостационарных орбит рассматривалось сближение объектов с номерами каталога NORAD 41838 и 28082.

Параметры орбиты объекта 41838 в формате TLE:

1 41838U 16065A 18050.96020773 -.00000302 +00000-0 +00000-0
0 9996

2 41838 003.9905 070.1287 0001531 191.1740 018.3229
0.99131806004758

Параметры орбиты объекта 28082 в формате TLE:

1 28082U 03052A 18050.96442995 -.00000303 +00000-0 +00000-0
0 9999

2 28082 003.9949 070.2288 0003001 195.5766 015.2515
0.99144151052275

Начало интервала прогнозирования 19.02.2018 10:00:00 (UTC). В результате работы алгоритма расчёта минимального расстояния между орбитами сформированы множества значений, характеризующие окрестность точки минимума расстояния между орбитами:

$$\begin{aligned} \left\langle r_{\text{вх}}^{(t,w)}, r_{\text{пар}}^{(t,w)}, r_{\text{вых}}^{(t,w)} \right\rangle, \\ \left\langle m_{\text{вх}}^{(t)}, m_{\text{пар}}^{(t)}, m_{\text{вых}}^{(t)} \right\rangle, \\ \left\langle m_{\text{вх}}^{(w)}, m_{\text{пар}}^{(w)}, m_{\text{вых}}^{(w)} \right\rangle. \end{aligned}$$

Здесь и далее приводятся данные с уже выполненным пересчетом величины эксцентрической аномалии в эквивалентное значение средней аномалии.

Так как для геостационарных КО характерна медленная эволюция орбит, то в течение интервала прогнозирования $\tau = 60$ часов изменение координат точки минимума расстояния между орбитами и ее окрестности является не существенным, вычисленные параметр $\left(\left\langle r_{\text{вх}}, r_{\text{пар}}, r_{\text{вых}} \right\rangle, \left\langle m_{\text{вх}}^{(t)}, m_{\text{пар}}^{(t)}, m_{\text{вых}}^{(t)} \right\rangle, \left\langle m_{\text{вх}}^{(w)}, m_{\text{пар}}^{(w)}, m_{\text{вых}}^{(w)} \right\rangle \right)$ в течение интервала прогнозирования принимаются неизменными.

В результате работы алгоритма оценки характеристик движения и условий оптической видимости для найденной точки сформированы следующие альтернативные участки проведения контроля, представленные в таблице 2.

Из представленных в таблице 2 альтернатив контроля выбрана ТМР №1. Зависимости условий контроля от времени для выбранной ТМР представлены на рисунках 3-5.

Таблица 2. Характеристики условий контроля объекта 28082

№ ТМР	ΔR , км	$\Delta V_{\text{уг.с}}$, $\frac{\text{уг.с}}{\text{с}}$	ψ , град	Дата и время входа и выхода в окрестности ТМР
1	36	1	1	2018-02-19 21:48:53 2018-02-20 22:03:50
2	10	-10	45	2018-02-20 22:01:22 2018-02-21 22:04:00

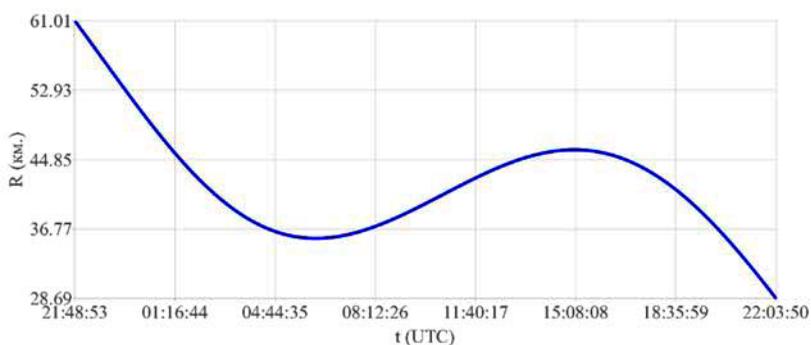


Рис. 3. Зависимость расстояния между орбитами рассматриваемых объектов в окрестности ТМР

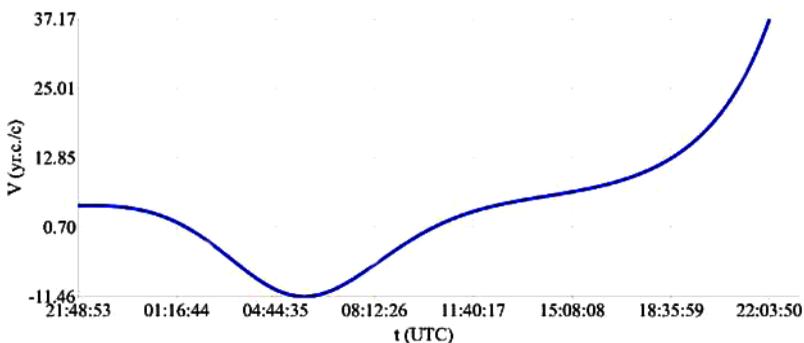


Рис. 4. Зависимость угловой скорости движения рассматриваемых объектов в окрестности ТМР между орбитами

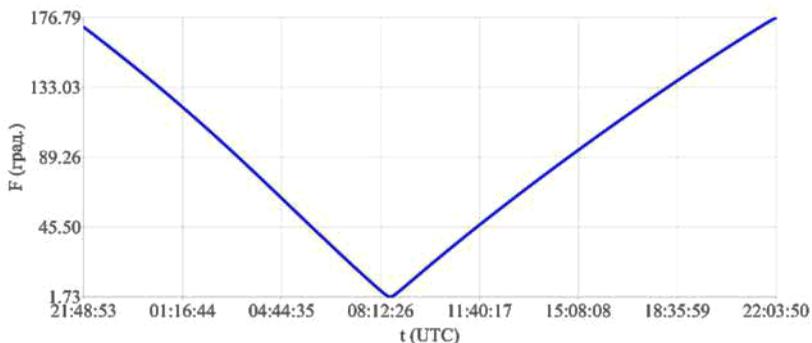


Рис. 5. Зависимость фазового угла освещённости 41838-Солнце-28082 в окрестности ТМР между орбитами

Вторая пара объектов, рассмотренная в ходе вычислительного эксперимента, принадлежит низкой околоземной орбите. В вычислительном эксперименте рассматривается сближение объектов с номерами каталога NORAD 36596 и 33409.

Параметры орбиты объекта 36596 в формате TLE:

```
1 36596U 10027A 10261.48442617 .00000537 00000-0 60259-4 0
9996
2 36596 097.6527 295.543 0018374 151.8496 314.1622 14.90603950
14227
```

Параметры орбиты объекта 33409 в формате TLE:

```
1 33409U 08053B 10261.48442617 -.00000265 00000-0 -21477-4 0
9991
2 33409 097.6532 295.5434 0018197 150.801 315.1254
14.90598283103369
```

В результате расчета точек пересечения орбит между указанными КО обнаружена одна окрестность ТМР. Для неё выполнен анализ динамики эволюции с течением времени путем пересчета точек пересечения орбит для параметров орбит данных КО, заданных на моменты времени, смещенные относительно времени эпохи τ_0 на 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54 и 60 часов соответственно. Вид функций (4), аппроксимирующих полученные значения эксцентрисических аномалий, описывающих окрестности ТМР с использованием метода наименьших квадратов, представлен на рисунке 6.

В процессе моделирования прогноза движения данных объектов сформированы следующие характеристики условий контроля объекта 33409 объектом 36596, представленные в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики условий контроля объекта 33409

$\Delta R, \text{км}$	$\Delta V_{\text{гр}}, \frac{\text{уг.с}}{\text{с}}$	$\psi, \text{град}$	Дата и время входа и выхода в окрестности ТМР
10	10	60	2010-09-18 13:26:53 2010-09-18 15:06:45

Зависимости условий контроля от времени представлены на рисунках 7-9.

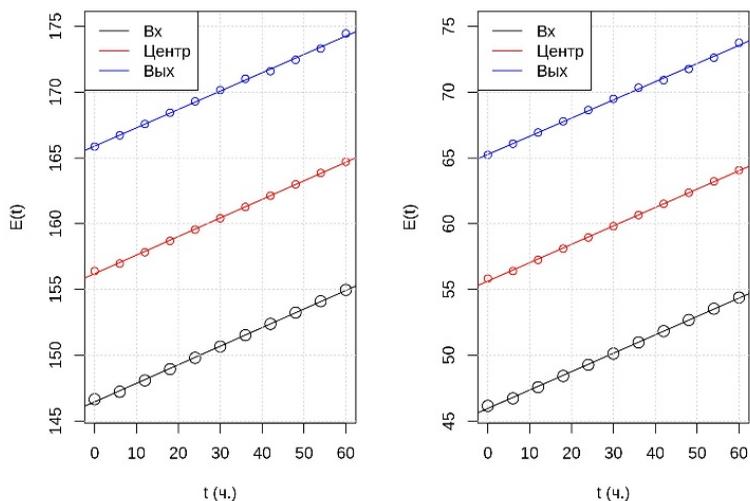


Рис. 6. Зависимость эксцентрической аномалии входа на параметре и выхода в окрестности ТМР между орбитами для объекта 36596 – справа и объекта 33409 – слева от времени (в часах)

Согласно рассмотренному выше алгоритму устанавливаются значения используемых ЛП в соответствии с данными, представленными в таблицах 4-8.

Таблица 4. Функции принадлежности для входной лингвистической переменной – «расстояние»

$\mu(M)$	$\mu(CP)$	$\mu(B)$
ТНИ: $a_M = 0$ $\alpha_M = 0$ $b_M = 15$ $\beta_M = 25$	ТНЧ: $a_{CP} = 50$ $\alpha_{CP} = 25$ $\beta_{CP} = 25$	ТНИ: $a_B = 85$ $\alpha_B = 25$ $b_B = 100$ $\beta_B = 100$

Таблица 5. Функции принадлежности для входной лингвистической переменной – «угловая скорость»

$\mu(M)$	$\mu(CP)$	$\mu(B)$
ТНИ: $a_M = 0$	ТНЧ: $a_{CP} = 1000$	ТНИ: $a_B = 3200$
$\alpha_M = 0$	$\alpha_{CP} = 1800$	$\alpha_B = 1000$
$b_M = 400$	$\beta_{CP} = 1000$	$b_B = 3600$
$\beta_M = 1200$		$\beta_B = 3600$

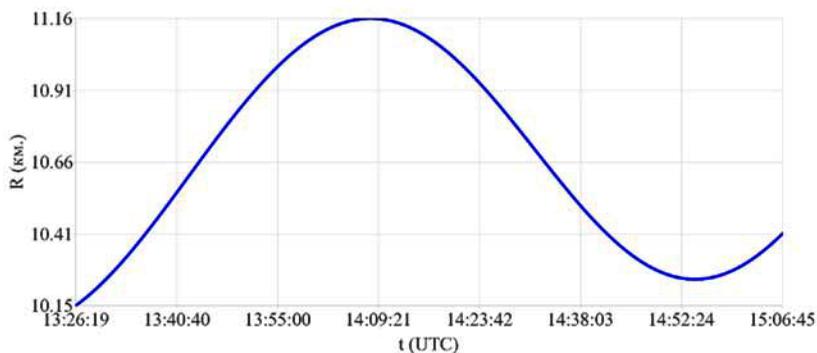


Рис. 7. Зависимость расстояния между орбитами рассматриваемых объектов в окрестности ТМР

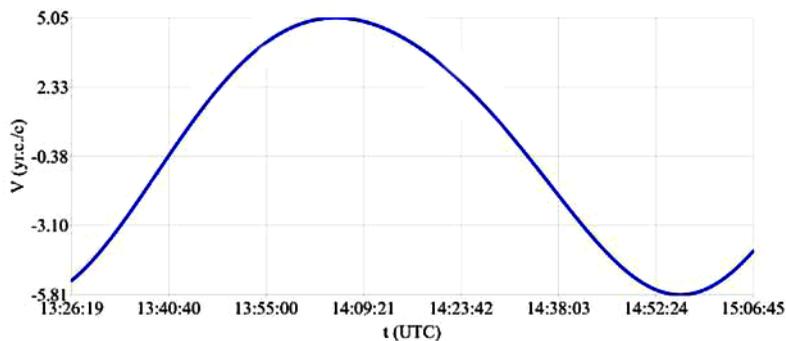


Рис. 8. Зависимость угловой скорости движения рассматриваемых объектов в окрестности ТМР между орбитами

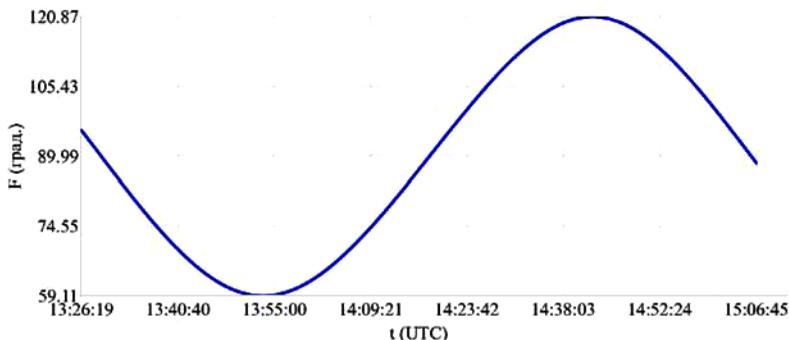


Рис. 9. Зависимость фазового угла освещённости 36596-Солнце-33409 в окрестности ТМР между орбитами

Таблица 6. Функции принадлежности для входной лингвистической переменной – «фазовый угол»

$\mu(M)$	$\mu(CP)$	$\mu(B)$
ТНИ: $a_M = 0$ $\alpha_M = 0$ $b_M = 10$ $\beta_M = 35$	ТНЧ: $a_{CP} = 35$ $\alpha_{CP} = 60$ $\beta_{CP} = 35$	ТНИ: $a_B = 35$ $\alpha_B = 110$ $b_B = 120$ $\beta_B = 120$

Таблица 7 – Функции принадлежности для входной лингвистической переменной – «время»

$\mu(M)$	$\mu(CP)$	$\mu(B)$
ТНИ: $a_M = 0$ $\alpha_M = 0$ $b_M = 5$ $\beta_M = 15$	ТНЧ: $a_{CP} = 15$ $\alpha_{CP} = 30$ $\beta_{CP} = 15$	ТНИ: $a_B = 55$ $\alpha_B = 15$ $b_B = 60$ $\beta_B = 60$

Таблица 8 – Функции принадлежности для выходной лингвистической переменной – «контроль»

$\mu(HC)$	$\mu(HD)$	$\mu(BC)$	$\mu(D)$	$\mu(C)$
ТНИ: $a_{HC} = 0$ $\alpha_{HC} = 0$ $b_{HC} = 0,05$ $\beta_{HC} = 0,15$	ТНЧ: $a_{HD} = 0,25$ $\alpha_{HD} = 0,10$ $\beta_{HD} = 0,10$	ТНЧ: $a_{BC} = 0,5$ $\alpha_{BC} = 0,25$ $\beta_{BC} = 0,25$	ТНЧ: $a_D = 0,75$ $\alpha_D = 0,10$ $\beta_D = 0,10$	ТНИ: $a_C = 0,95$ $\alpha_C = 0,15$ $b_C = 1$ $\beta_C = 1$

Пример внешнего вида функции принадлежности выходной лингвистической переменной «контроль» представлен на рисунке 10. После формирования вида функций принадлежности введённых термов ЛП осуществляется этап фаззификации – введение нечёткости. Полученные в ходе работы алгоритма оценки характеристик движения и условий оптической видимости численные значения параметров $\{\Delta R, \Delta V_{\text{уг}}, \psi, t\}$ представляются в виде нечётких лингвистических высказываний в соответствии с оценкой их величины.

В сформированных условиях контроля объектом 41838 объекта 28082 на геостационарной орбите с численными значениями $\{\Delta R = 36 \text{ км}, \Delta V_{\text{уг}} = 1 \text{ уг.с/с.}, \psi = 1 \text{ град}, t = 60 \text{ с}\}$ формируются следующие нечёткие лингвистические высказывания:

- «расстояние малое»;
- «расстояние среднее»;
- «угловая скорость малая»;
- «фазовый угол освещённости малый»;
- «интервал времени большой».

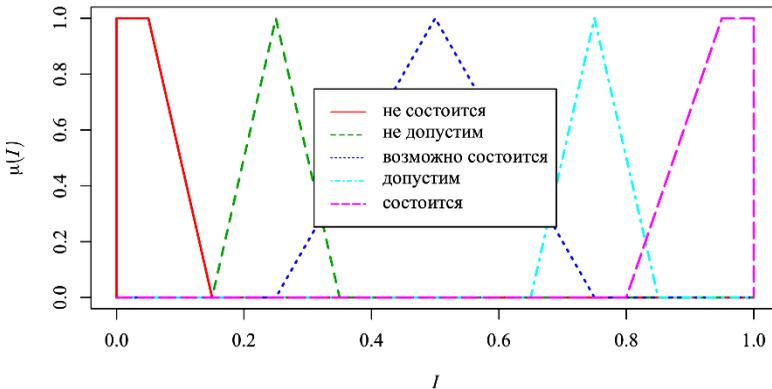


Рис. 10. Функция принадлежности выходной лингвистической переменной к определенным в исследовании термам

Степени принадлежности входных лингвистических переменных базовым термам-множествам (малое, среднее, большое):

$$\mu(\Delta R = 36) = 0,42 - \text{среднее}; \mu(\Delta R = 36) = 0,2 - \text{малое};$$

$$\mu(\Delta V_{\text{уг}} = 1) = 1 - \text{малая}; \mu(\psi = 1) = 1 - \text{малый}; \mu(t = 60) = 1 - \text{большое}.$$

На основе сформированных фаззифицированных значений входных лингвистических переменных (малое, среднее, большое) и значений функций принадлежности базовым термам-множествам активизируются правила, для которых $\mu(\beta_i) \neq 0$.

Таким образом, считаются активными следующие правила нечётких продукций:

- 1) «Если расстояние среднее и угловая скорость малая и фазовый угол малый и интервал времени большой, то контроль состоится»;
- 2) «Если расстояние малое и угловая скорость малая и фазовый угол малый и интервал времени большой, то контроль состоится».

На этапе агрегирования подусловий вычисляются значения U_i с помощью операции логической минимум:

$$U_1 = \min(0,42; 1; 1; 1) = 0,42; \quad U_2 = \min(0,2; 1; 1; 1) = 0,2.$$

В результате аккумуляции подзаключений формируется суммарное значение функции принадлежности выходной лингвистической переменной с помощью операции логической максимум:

$$\mu_{\Sigma}(I) = \max(0,42; 0,2) = 0,42.$$

Разработанная система правил нечеткого логического вывода обеспечила для указанных выше исходных данных формирование итоговой функции принадлежности показателя I , а также позволила получить его дефаззифицированное значение, представленное на рисунке 11.

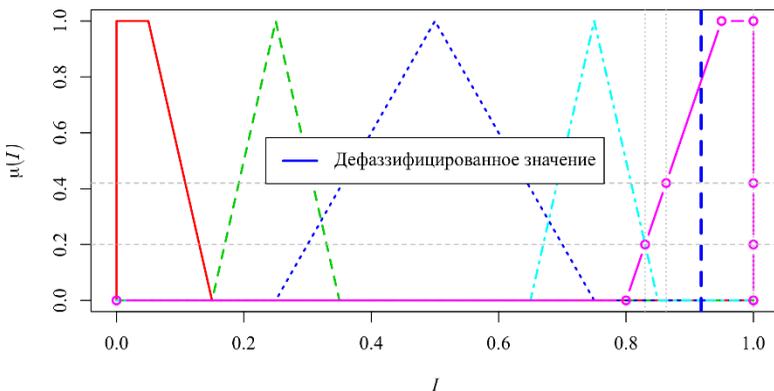


Рис. 11. Итоговая функция принадлежности меры I для условий контроля, заданных параметрами: $\Delta R = 36$ км, $\Delta V_{\text{гр}} = 1$ уг.с/с, $\psi = 1$ град, $t = 60$ с

Результат дефаззификации выходной лингвистической переменной методом центра тяжести является мерой возможности проведения контроля в заданных условиях оптической видимости:

$$I^* = \frac{\int_0^1 I \mu_{\Sigma}(I) dI}{\int_0^1 \mu_{\Sigma}(I) dI} = 0,918.$$

Нечёткий логический вывод для расчёта меры возможности проведения контроля в низком космосе объектом 36596 объектом 33409 выглядит следующим образом.

В результате фаззификации формируются следующие нечёткие лингвистические высказывания:

- «*расстояние малое*»;
- «*угловая скорость малая*»;
- «*фазовый угол средний*»;
- «*интервал времени большой*».

Степени принадлежности входных лингвистических переменных базовым термам-множествам (малое, среднее, большое):

$$\begin{aligned} \mu(\Delta R = 10) &= 1 - \text{малое}, \\ \mu(\Delta V_{\text{гр}} = 10) &= 1 - \text{малая}, \\ \mu(\psi = 60) &= 1 - \text{средний}, \\ \mu(t = 60) &= 1 - \text{большое}. \end{aligned}$$

Таким образом, активной является одна нечёткая продукция: «*Если расстояние малое и угловая скорость малая и фазовый угол средний и интервал времени большой, то контроль состоится*».

Суммарное значение функции принадлежности выходной ЛП для рассматриваемого примера равно единице, дефаззифицированное значение выходной ЛП для рассматриваемых условий контроля принимает значение 0,933.

5. Заключение. Предложенный показатель обеспечивает достоверное прогнозирование возможности получения НКИ о КО с помощью ОЭС космического базирования при условии использования обоснованных ТНИ и ТНЧ, применяемых для фаззификации исходных данных процедуры оценки меры возможности контроля КО. Обоснование зна-

чений ТНИ и ТНЧ целесообразно осуществлять для конкретных образцов ОЭС с учетом их тактико-технических характеристик: разрешающей способности и ширины поля зрения зеркально-линзового объектива; светочувствительности ПЗС-матрицы; характеристик космической платформы.

Результаты решения рассматриваемой задачи учитывают неоднозначность исходных данных и обеспечивают учет слабо формализуемых факторов, оказывающих влияние на оптическую видимость контролируемого КО. В совокупности с предложенным показателем целесообразно учитывать в процедуре планирования сбора НКИ о КО ОЭС информацию о вращении КО вокруг собственного центра масс, полученную на основе анализа функций блеска, формируемых наземными ОЭС. Характеристики современных ПЗС-матриц способны обеспечивать получение изображений КО, обладающих периодом обращения свыше 10 секунд, с линейным разрешением до 10 сантиметров. К указанному классу КО относится свыше 80% всех объектов, находящихся на околоземной орбите.

Поиск ТМР между орбитами космических объектов обеспечивает минимизацию вычислений, выполняемых при использовании аналитических методов прогноза координат КО при оценке характеристик движения и условий оптической видимости контролируемого КО относительно ОЭС космического базирования. При этом время, необходимое для расчета ТМР между орбитой одного ОЭС и 2950 КО, не превышает 4 секунд в однопоточном режиме при использовании средств вычислительной техники на базе микропроцессора AMD Phenom II x2 545.

Использование математического аппарата нечетких множеств и нечеткого логического вывода позволило формализовать процесс влияния на результаты контроля КО ошибок координат, характеризующих взаимное положение контролируемого КО и ОЭС с учетом относительной угловой скорости объектов и освещенности контролируемого объекта.

Литература

1. Фотометрия ИСЗ на ММТ в течение 5 лет. URL: <http://mmt9.ru/article/> (дата обращения: 07.06.2020).
2. *Алешин В.И., Астраханцев М.В., Афанасьева Т.И.* Мониторинг техногенного засорения околоземного пространства и предупреждение об опасных ситуациях, создаваемых космическим мусором // М.: ЦНИИмаш. 2015. 244 с.
3. *Шилов Л.Б., Федосеев А.А.* «О работах АО «РКЦ «ПРОГРЕСС» по вопросам методологии и средствам космического базирования для наблюдения космических объектов» // Сб. тр. Всероссийской научн. конф. с междунар. участ. «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы». 2019. С. 110–116.

4. *Okasha M., Park C., Park S.-Y.* Guidance and control for satellite in-orbit-self-assembly proximity operations // *Aerospace Science and Technology*. 2015. vol. 41. pp. 289–302.
5. *Jianbin H. et al.* Docking mechanism design and dynamic analysis for the GEO tumbling satellite // *Assembly Automation*. 2019. vol. 39. no. 3. pp. 432–444.
6. *Вахитов Э.В., Лагуткин В.Н., Лукьянов А.П.* Исследование эффективности управления движением космического датчика, фотографирующего низкоорбитальные космические объекты // *Вопросы радиоэлектроники*. 2018. № 3. С. 40–44.
7. *Боев С.Ф.* Концепция интегрированной системы ракетно-космической обороны России // *Вопросы радиоэлектроники*. 2019. № 3. С. 7–11.
8. *Capolupo F., Labourdette P.* Receding-Horizon Trajectory Planning Algorithm for Passively Safe On-Orbit Inspection Missions // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2019. vol. 42. no. 5. pp. 1–10.
9. *Лагуткин В.Н., Лукьянов А.П.* Возможности фотографирования низкоорбитальных космических объектов из космоса на пролете // *Радиопромышленность*, 2016. № 1. С. 109–117.
10. *Шилин В.Д. и др.* Вопросы применения космических информационных средств для контроля космических объектов // *Вопросы радиоэлектроники*. 2018. № 3. С. 85–89.
11. *Миронов В.И., Миронов Ю.В., Хегай Д.М.* Оптимальное определение орбиты космических объектов по угловым измерениям наземных опτικο-электронных станций // *Труды СПИИРАН*. 2019. Т. 18№. 5. С. 1239–1263.
12. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов, Р.М.* Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // *Известия южного федерального университета. Технические науки*. 2015. Т. 162. № 1. С. 162–174.
13. *Curtis D.H., Cobb R.G.* Free Access Satellite Articulation Tracking Using Computer Vision // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2019. vol. 56. no. 5. pp. 1478–1491.
14. *Gui H., DeRuiter A.H.J.* Quaternion Invariant Extended Kalman Filtering for Spacecraft Attitude Estimation // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2018. vol. 41. no. 4. pp. 863–878.
15. *Богачёв С.А., Ерхова Н.Ф., Перцов А.А., Ульянов А.С.* Оптическая камера для наблюдения космических объектов с использованием аппаратов типа «Кубсат» // *Космонавтика и ракетостроение: Центральный научно-исследовательский институт машиностроения*. 2020. № 1. С. 98–107.
16. *Tweddle B.E., Saenz-Otero A.* Relative computer vision-based navigation for small inspection spacecraft // *Journal of guidance, control, and dynamics*. 2015. vol. 38. pp. 969–978.
17. *Fourie D., Tweddle B.E., Ulrich S., Saenz-Otero A.* Flight Results of Vision-Based Navigation for Autonomous Spacecraft Inspection of Unknown Objects // *Journal of spacecraft and rockets*. 2014. vol. 51. pp. 2016–2026.
18. *Opromolla R., Fasano G., Rufino G., Grassi M.* A review of cooperative and uncooperative spacecraft pose determination techniques for close-proximity operations // *Progress in Aerospace Sciences*. 2017. vol. 93. pp. 53–72.
19. *Sternberg D., Sheerin T.F., Urbain G.* INSPECT Sensor Suite for On-Orbit Inspection and Characterization with Extravehicular Activity Spacecraft // *45th International Conference on Environmental Systems*. 2015. 17 p.
20. Gunter's Space Page. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/sj-12.htm (дата обращения: 07.06.2020).
21. *Горишков О.А., Муравлёв В.А., Шагайда А.А.* Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов // М.: Машиностроение. 2008. 280 с.
22. Aerospace security. URL: <https://aerospace.csis.org/data/unusual-behavior-in-geo-sj-17/> (дата обращения: 10.02.2020).

23. Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска // М.: Наука. 1985. 248 с.
24. Mikryukov D.V., Baluev R.V. Fast error-controlling MOID computation for confocal elliptic orbits // *Astronomy and Computing*. 2018. vol. 27. pp. 11–22.
25. Hedo J.M., Ruiz M., Pelaez J. On the minimum orbital intersection distance computation: a new effective method // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018. vol. 479. no. 3. pp. 3288–3299.
26. Деревянка А.Е. Быстрая оценка минимального расстояния между двумя конфокальными гелиоцентрическими орбитами // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия физико-математические науки*. 2014. № 4(37). С. 144–156.
27. space-track.org. URL: <https://www.space-track.org> (дата обращения: 16.02.2020).
28. Hoots F.R., Ronald L. Roehrich. Spacetrack report N 3. Models for Propagation of NORAD Element Sets. 1988. pp. 87.
29. Haingja S., Ho J., Yongjun S., Yongseok L., Yongseok O. The Photometric Brightness Variation of Geostationary Orbit Satellite // *Journal of Astronomy and Space Sciences*. 2013. vol. 30. no. 3. pp. 179–185.

Пророк Валерий Ярославович – д-р тех. наук, профессор, профессор, кафедра программно-алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: представление и обработка данных, совершенствование способов проектирования, эксплуатации и обслуживания автоматизированных систем, системы искусственного интеллекта. Число научных публикаций – 150. vka@mail.ru; ул. Ждановская, д. 13, г. Санкт-Петербург, 197198, РФ; р.т. +7(812)347-9660.

Карытко Анатолий Александрович – канд. техн. наук, преподаватель, кафедра программно-алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: теория вычислительных процессов, алгоритмы сбора, обработки и анализа информации о космических объектах искусственного происхождения. Число научных публикаций – 21. vka@mil.ru; ул. Ждановская, д. 13, г. Санкт-Петербург, 197198, РФ; р.т. +7(812)347-9660.

Горянский Александр Сергеевич – канд. техн. наук, начальник, учебная лаборатория кафедры программно-алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: алгоритмы планирования применения средств мониторинга околоземного космического пространства. Число научных публикаций – 8. vka@mail.ru; ул. Ждановская, д. 13, г. Санкт-Петербург, 197198, РФ; р.т. +7(812)347-9660.

Емельянова Екатерина Сергеевна – курсант, кафедра программно-алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: алгоритмы сбора, обработки и анализа информации о космических объектах искусственного происхождения. Число научных публикаций – 1. vka@mail.ru; ул. Ждановская, д. 13, г. Санкт-Петербург, 197198, РФ; р.т. +7(812)347-9660.

V. PROROK, A. KARYTKO, A. GORYANSKIY, E. EMELYANOVA
**ASSESSMENT OF THE CAPABILITIES OF ORBITAL OPTICAL
DEVICES FOR OBTAINING INFORMATION
ABOUT SPACE OBJECTS**

Prorok V., Karytko A., Goryanskiy A., Emelyanova E. Assessment of the Capabilities of Orbital Optical Devices for Obtaining Information about Space Objects.

Abstract. The purpose of the study is to select the optimal conditions for collecting non-coordinate information about a spacecraft by a space optical-electronic means at the time objects pass the vicinity of the points of the minimum distance between their orbits. The quantitative indicator is proposed that characterize the measure of the possibility of obtaining non-coordinate information about space objects with the required level of quality. The arguments of the function characterizing the indicator are the distance between spacecraft; their relative speed; phase angle of illumination of a spacecraft by the Sun in relation to the optical-electronic means; the length of the time interval during which both objects are in the vicinity of the point of a minimum distance between their orbits. The value of the indicator is computed by solving three particular research problems.

The first task is to search for neighborhoods that include the minimum distances between the orbits of the controlled spacecraft and optical-electronic means. To solve it, a fast algorithm for calculating the minimum distance between orbits used. Additionally, the drift of the found neighborhoods is taken into account on the time interval up to 60 hours.

The second task is to estimate the characteristics of motion and the conditions of optical visibility of a controlled spacecraft in the vicinity of the minimum points of the distance between the orbits of spacecraft. The solution to this problem is carried out by using the SGP4 library of space objects motion forecast.

The third task is justification and calculation of an index characterizing the measure of the possibility of obtaining an optical image of a spacecraft for given conditions of optical visibility. To solve the problem, the developed system of fuzzy inference rules and the Mamdani algorithm is used.

The presented method is implemented as a program. In the course of a computational experiment, an assessment was made of the possibility of obtaining non-coordinate information on low-orbit and geostationary space objects. The proposed indicator provides an increase in the efficiency of the procedure for collecting non-coordinate information about space objects by choosing the most informative alternatives for monitoring space objects from the available set of possible observations at a given planning interval for collecting information about space objects.

Keywords: Near-earth Outer Space, Optoelectronic Means, Spacecraft, Fuzzy Inference, Convergence of Space Objects

Prorok Valeriy – Ph.D., Dr. Sci., Professor, Professor, Department of Software and Algorithmic Support for Automated Control Systems, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky. Research interests: representation and processing of data, improvement of methods of design, operation and maintenance of automated systems, artificial intelligence systems. The number of publications – 150. vka@mil.ru; 13, Zhdanovskaya str., St. Petersburg, 197198, Russia; office phone +7 (812) 347-9660.

Karytko Anatoliy – Ph.D., Lecturer, Department of Software and Algorithmic Support for Automated Control Systems, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky. Research in-

terests: computer science, mathematics and methods of astrodynamics. The number of publications – 21. vka@mil.ru; 13, Zhdanovskaya str., St. Petersburg, 197198, Russia; office phone +7 (812) 347-9660.

Goryanskiy Aleksandr – Ph.D., Head, Teaching Laboratory of the Department of Software and Algorithmic Support for Automated Control Systems, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky. Research interests: near-earth space monitoring planning algorithms. The number of publications – 8. vka@mil.ru; 13, Zhdanovskaya str., St. Petersburg, 197198, Russia; office phone +7 (812) 347-9660.

Emelyanova Ekaterina – Cadet, the Department of Software and Algorithmic Support for Automated Control Systems, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky. Research interests: mathematics and methods of astrodynamics. The number of publications – 1. vka@mil.ru; 13, Zhdanovskaya str., St. Petersburg, 197198, Russia; office phone +7 (812) 347-9660.

References

1. Fotometriya ISZ na MMT v techenie 5 let [Photometry of satellites on MMT for 5 years]. Available at: <http://mmt9.ru/article/> (accessed: 07.06.2020). (In Russ.).
2. Aleshin V.I., Astrahancev M.V., Afanas'eva T.I. *Monitoring tehnogenno zashcheniya okolozemnogo prostranstva i preduprezhdenie ob opasnykh situatsiyah, sozdavaemykh kosmicheskimi musorom* [Monitoring technogenic contamination of near-earth space and warning about dangerous situations created by space debris]. Moscow: TSNII-MASH. 2015. 244 p. (In Russ.).
3. Shilov L.B., Fedoseev A.A. [About the work of AO «RKC «PROGRESS» on issues of methodology and space-based means for observing space objects] *Kosmicheskij musor: fundamental'nye i prakticheskie aspekty ugrozy: Sb. nauch. tr.* [Space Debris: Fundamental and Practical Aspects of the Threat: Collected papers]. 2019. pp. 110–116. (In Russ.).
4. Okasha M., Park C., Park S.-Y. Guidance and control for satellite in-orbit-self-assembly proximity operations. *Aerospace Science and Technology*. 2015. vol. 41. pp. 289–302.
5. Jianbin H. et al. Docking mechanism design and dynamic analysis for the GEO tumbling satellite. *Assembly Automation*. 2019. vol. 39. no. 3. pp. 432–444.
6. Vakhitov E.N., Lagutkin V.N., Lukyanov A.P. [Efficiency of motion control of space sensor photographing low orbital space objects]. *Voprosy radioelektroniki – Issues of radio electronics*. 2018. vol. 3. pp. 40–44. (In Russ.).
7. Boev S.F. [Concept of integrated system of missile and space defense of Russia]. *Voprosy radioelektroniki – Issues of radio electronics*. 2019. vol. 3. pp. 7–11. (In Russ.).
8. Capolupo F., Labourdette P. Receding-Horizon Trajectory Planning Algorithm for Passively Safe On-Orbit Inspection Missions. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2019. vol. 42. no. 5. pp. 1–10.
9. Lagutkin V.N., Lukyanov A.P. [Performance capacities of photographing of transiting low orbital objects from space]. *Radiopromyshlennost – Radio industry*. 2016. vol. 1. pp. 109–117. (In Russ.).
10. Shilin V.D. et al. [Application issues of space information facilities for space objects monitoring]. *Voprosy radioelektroniki – Issues of radio electronics*. 2018. vol. 3. pp. 85–89. (In Russ.).
11. Mironov V.I., Mironov Y.V., Khegay D.K. [Optimal determination of space objects orbit by angular measurements of ground-based optoelectronic stations]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2019. vol. 18. no. 5. pp. 1239–1263. (In Russ.).
12. Ohtilev M.Ju., Sokolov B.V., Jusupov, R.M. [Conception of complex objects proactive monitoring management and control: theoretical and technological foundations].

- Izvestija juzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki – Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2015. Issue 162. vol. 1. pp. 162–174. (In Russ.).
13. Curtis D.H., Cobb R.G. Free Access Satellite Articulation Tracking Using Computer Vision. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2019. vol. 56. no. 5. pp. 1478–1491.
 14. Gui H., DeRuiter A.H.J. Quaternion Invariant Extended Kalman Filtering for Spacecraft Attitude Estimation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2018. vol. 41. no. 4. pp. 863–878.
 15. Bogachjov S.A., Erhova N.F., Percov A.A., Ul'janov A.S. [Optical camera for observing space objects using Kubsat spacecraft]. *Kosmonavtika i raketostroenie – Cosmonautics and Rocket Engineering* 2020. vol. 1. pp. 98–107. (In Russ.).
 16. Tweddle B.E., Saenz-Otero A. Relative computer vision-based navigation for small inspection spacecraft. *Journal of guidance, control, and dynamics*. 2015. vol. 38. pp. 969–978.
 17. Fourie D., Tweddle B.E., Ulrich S., Saenz-Otero A. Flight Results of Vision-Based Navigation for Autonomous Spacecraft Inspection of Unknown Objects. *Journal of spacecraft and rockets*. 2014. vol. 51. pp. 2016–2026.
 18. Opromolla R., Fasano G., Rufino G., Grassi M. A review of cooperative and uncooperative spacecraft pose determination techniques for close-proximity operations. *Progress in Aerospace Sciences*. 2017. vol. 93. pp. 53–72.
 19. Sternberg D., Sheerin T.F., Urbain G. INSPECT Sensor Suite for On-Orbit Inspection and Characterization with Extravehicular Activity Spacecraft. 45th International Conference on Environmental Systems. 2015. 17 pp.
 20. Gunter's Space Page. Available at: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/sj-12.htm (accessed: 07.06.2020).
 21. Gorshkov O.A., Muravljov V.A., Shagajda A.A. *Hollovskie i ionnye plazmennye dvigateli dlja kosmicheskikh apparatov* [Hall and ion plasma engines for spacecraft]. M.: Mashinostroenie. 2008. 280 p. (In Russ.).
 22. Aerospace security. Available at: <https://aerospace.csis.org/data/unusual-behavior-in-geo-sj-17/> (accessed: 10.02.2020).
 23. Hellman O. *Vvedenie v teoriiju optimal'nogo poiska* [Introduction to the optimal search theory]. M.: Nauka. 1985. 248 p. (In Russ.).
 24. Mikryukov D.V., Baluev R.V. Fast error-controlling MOID computation for confocal elliptic orbits. *Astronomy and Computing*. 2018. vol. 27. pp. 11–22.
 25. Hedo J.M., Ruiz M., Pelaez J. On the minimum orbital intersection distance computation: a new effective method. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018. vol. 479. no 3. pp. 3288–3299.
 26. Derevjanka A.E. [A quick estimate of the minimum distance between two confocal heliocentric orbits]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija fiziko-matematičeskie nauki – Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2014. vol. 4(37). pp. 144–156. (In Russ.).
 27. space-track.org. Available at: <https://www.space-track.org> (accessed: 16.02.2020)
 28. Hoots F.R., Ronald L. Roehrich. Spacetrack report N 3. Models for Propagation of NORAD Element Sets. 1988. pp. 87.
 29. Haingja S., Ho J., Yongjun S., Yongseok L., Yongseok O. The Photometric Brightness Variation of Geostationary Orbit Satellite. *Journal of Astronomy and Space Sciences*. 2013. vol. 30. no. 3. pp. 179–185.

В.А. НЕНАШЕВ, И.Г. ХАНЫКОВ
**ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРИЗАЦИИ
ПИКСЕЛЕЙ ЛОКАЦИОННЫХ СНИМКОВ В
МНОГОПОЗИЦИОННОЙ БОРТОВОЙ СИСТЕМЕ**

Ненашев В.А., Ханыков И.Г. **Формирование комплексного изображения земной поверхности на основе кластеризации пикселей локационных снимков в многопозиционной бортовой системе.**

Аннотация. Предлагается способ комплексирования разноразмерных изображений с применением алгоритма квазиоптимальной кластеризации пикселей к исходным снимкам земной поверхности. Исходные разноразмерные изображения, сформированные бортовой аппаратурой многопозиционных локационных систем, состыкуются в единый составной снимок и при помощи высокоскоростного алгоритма квазиоптимальной кластеризации пикселей редуцируются до нескольких цветов с сохранением характерных границ. Особенность алгоритма квазиоптимальной кластеризации заключается в генерации серии разбиений с постепенно увеличивающейся детализацией за счет переменного числа кластеров. Эта особенность позволяет выбрать подходящие разбиения пар состыкованных изображений из серии сгенерированных.

На паре изображений из выбранного разбиения состыкованного снимка осуществляется поиск опорных точек выделенных контуров. Для этих точек определяется функциональное преобразование и после его применения к исходным снимкам осуществляется оценка степени корреляции комплексированного изображения. Как положение опорных точек контура, так и само искомое функциональное преобразование уточняется до тех пор, пока оценка качества комплексирования не будет приемлемой. Вид функционального преобразования подбирается по редуцированным по цвету изображениям, а затем применяется к исходным снимкам. Этот процесс повторяется для кластеризованных изображений с большей детализацией в том случае, если оценка качества комплексирования не является приемлемой. Целью настоящего исследования является разработка способа, позволяющего сформировать комплексное изображение земной поверхности из разноформатных и разноразмерных снимков.

В работе представлены следующие особенности способа комплексирования. Первая особенность заключается в обработке единого составного изображения из пары состыкованных исходных снимков алгоритмом кластеризации пикселей, что позволяет подобным образом выделить одинаковые области на его различных частях. Вторая особенность заключается в определении функционального преобразования по выделенным точкам контура на обработанной паре кластеризованных снимков, которое и применяется к исходным изображениям для их комплексирования.

В работе представлены результаты формирования комплексного изображения как по однородным (оптическим) снимкам, так и по разнородным (радиолокационным и оптическим) снимкам. Отличительной чертой предлагаемого способа является улучшение качества формирования, повышение точности и информативности итогового комплексного изображения земной поверхности.

Ключевые слова: кластеризация пикселей, разноразмерные изображения, формирование комплексного изображения, локационные бортовые системы, полноразмерные изображения земной поверхности, опорные точки контура, комплексирование информации, беспилотный летательный аппарат, многопозиционная система.

1. Введение. При экологической разведке труднодоступных мест, например зон, представляющих экологическую опасность, а также при

оперативном предупреждении чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера на современном этапе развития науки и техники все чаще применяют многопозиционные бортовые локационные малогабаритные системы. Эти системы, как правило, базируются на малых беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) как самолетного, так и вертолетного типа. Это обусловлено рядом причин. Во-первых, тактико-технические характеристики БПЛА позволяют использовать все большую по массе и габаритам полезную нагрузку. Во-вторых, сами бортовые локационные системы уменьшаются в своих массогабаритных характеристиках. Эти причины способствуют увеличению времени полета БПЛА для осуществления продолжительного мониторинга земной поверхности. Однако в целях оперативного оповещения о чрезвычайных ситуациях и других экологических катастрофах целесообразно использовать многопозиционную систему, состоящую из нескольких пространственно-распределенных БПЛА. В этом случае за счет использования группы БПЛА сокращается излишнее время поиска места чрезвычайной ситуации или бедствия. По этим причинам развитие многопозиционных бортовых систем и реализуемых на их базе способов оперативного мониторинга на сегодняшний день является актуальной задачей.

На рисунке 1 изображен вариант расположения бортовой локационной аппаратуры элементов многопозиционной системы с частичным перекрытием совместной зоны обзора земной поверхности под разными ракурсами.

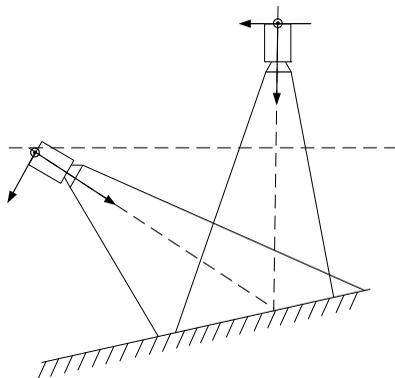


Рис. 1. Вариант расположения бортовой локационной аппаратуры элементов многопозиционной системы с частичным перекрытием совместной зоны обзора земной поверхности под разными ракурсами

Для решения задач оперативного поиска зон чрезвычайных ситуаций, мониторинга труднодоступных территорий и объектов интереса в различных сферах применяется многопозиционная система, расположенная на БПЛА-ах [1, 2]. Их главным критерием является оперативность исполнения поставленной задачи, что накладывает требование сокращения времени поиска при осуществлении мониторинга земной поверхности.

Требование быстродействия алгоритмов порой влечет за собой необходимость использования высокоскоростных вычислительных ресурсов и разработку быстрых алгоритмов обработки получаемой информации от элементов многопозиционной системы. В подобных системах требуется обеспечить надежный помехоустойчивый беспроводной канал обмена информацией между бортовыми локаторами многопозиционной системы БПЛА в условиях сложных деструктивных воздействий [3, 4].

Для реализации подобных многопозиционных пространственно-распределенных систем (рис. 2) сбора и комплексной обработки данных требуется в первую очередь определить вид собираемой информации от локационных устройств с бортов БПЛА.

Собираемой локационной информацией о земной поверхности, как правило, являются полноразмерные изображения, получаемые как от оптических локационных бортовых систем, так и от радиолокационных, например, сформированных методом синтеза апертуры антенны [5-8] и т.д.

На рисунке 2 структурно изображены источники локационной информации, базирующиеся на каждом БПЛА, входящем в многопозиционную систему. Таким образом, суть функционирования многопозиционной системы БПЛА-ов заключается в следующем. Центр обработки и управления БПЛА получает по беспроводному каналу связи от каждой локационной станции разноразмерные изображения различной природы наблюдаемых зон. Далее в центре обработки осуществляется формирование комплексного изображения в целях выполнения различных задач, например: картографирования обширных площадей, выделения объектов интереса, локации, распознавания и классификации обнаруженных объектов и т.д. [9-11]. В подобных многопозиционных системах задача комплексирования информации решается довольно нетривиально.

Комплексирование изображений – способ существенного повышения информативности о земной поверхности и объектов на ней за счет наложения изображений, полученных от источников локационной информации различных спектральных диапазонов и/или изображений, снятых распределённой системой под различными ракурсами [12, 13].

В качестве таких источников могут выступать как видеокamеры видимого, так и инфракрасного диапазонов, а также изображения, сформированные методом синтезирования апертуры антенны [5-8]. В этом случае основной задачей является объединение изображений разных спектральных диапазонов и их комплексирование в одно. Такое комплексирование (объединение) предназначено, прежде всего, для улучшения информативности комплексного изображения и предоставления более целостной и актуальной информации о земной поверхности.

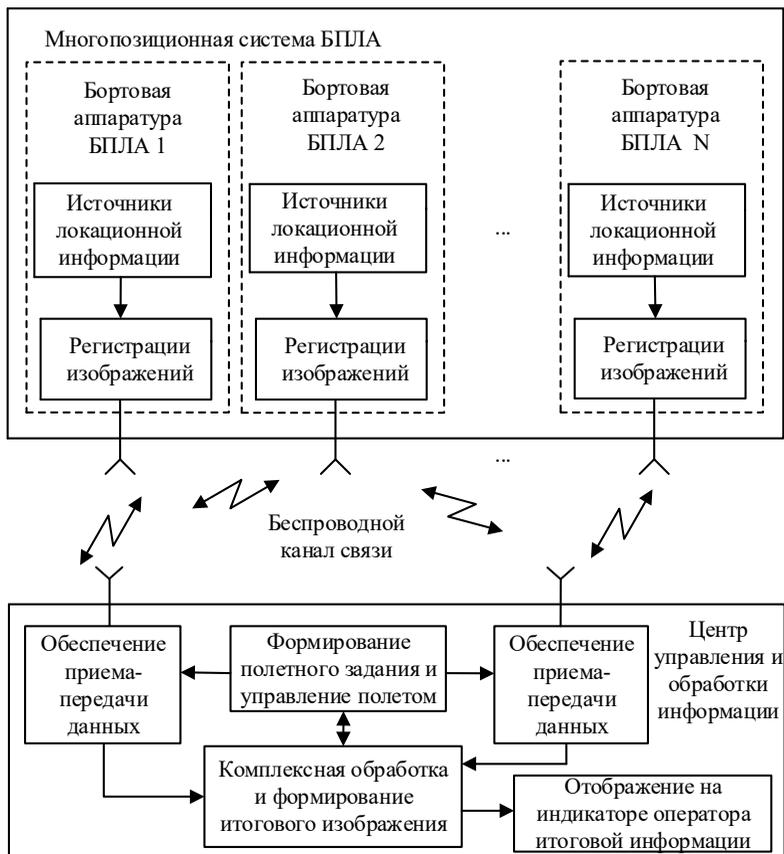


Рис. 2. Схема многопозиционной системы БПЛА

Комплексирование изображений на основе разнородной информации имеет ряд достоинств:

- выявление визуально-понятного изображения в разное время суток, независимо от погодных условий;

– возможность геометрических преобразований изображения, таких как масштабирование, поворот и др., полученных от разных источников локационной информации различной природы;

– формирование общей зоны наблюдаемой поверхности с различных ракурсов от разных источников локационной информации и др.

Преимущества объединения двух или более разноракурсных и разнородных изображений – повышение информативности результирующего комплексного изображения в одно, также при совмещении с картографической информацией.

Однако даже известные способы объединения имеют ряд недостатков и не всегда позволяют осуществить высокоточное комплексирование. Это может быть связано с тем, что зачастую на изображениях, получаемых с бортов БПЛА, присутствуют участки с малым количеством информации, например, однородные поля, гладкие рельефы и т.д.

При мониторинге земной поверхности в целях повышения информативности и выделения полезной информации применяется способ комплексирования изображений различных спектральных диапазонов. Для достижения этой цели в настоящей работе применяются алгоритм кластеризации пикселей изображений [14], корреляционно экстремальный способ совмещения изображений [12, 13], способ многопозиционного комплексирования разнородной информации [15, 16], способы специализированного представления и обработки изображений высокого разрешения [4, 17].

В разделе 2 проведен обзор способов формирования комплексного изображения земной поверхности. Выделены общие механизмы при реализации рассматриваемых способов. Определены основные ограничения этих способов и поставлена задача разработки нового способа формирования комплексного изображения, применимого для целей оперативного мониторинга и свободного от ограничений рассмотренных аналогов в данном разделе. В разделе три приведена функциональная схема и описана суть предлагаемого способа формирования комплексного изображения. В разделе четыре описывается модель высокоскоростной кластеризации пикселей изображения. Приводится блок-схема трехэтапного алгоритма. Описываются операции над кластерами пикселей изображения. Приводятся промежуточные результаты кластеризации пикселей исходных изображений. В разделе пять приведены эксперименты по формированию комплексного изображения на основе разноракурсных изображений как однородной, так и разнородной природы следующими способами: способом опорных точек [18, 19] и предлагаемым в настоящей работе способом совмещения по точкам контура. В разделе шесть приведены основные выводы по результатам проведенных исследований.

2. Обзор способов формирования комплексного изображения.

Формирование комплексного изображения на основе разнородных и разноразмерных изображений – непростая задача [20-30].

Методы комплексирования изображений можно широко разделить на две группы, а именно: комплексирование по опорным точкам на двух изображениях и комплексирование по контурам характерных областей.

Основным этапом формирования (объединения) комплексного изображения является выделение соответствующих точек или контуров на изображениях. Иными словами, требуется найти такое преобразование одного изображения относительно другого, которое обеспечит совпадение пар точек или его контуров, где каждая такая пара будет представлением иной такой же пары в исследуемой области. Одни из эффективных и широко применяемых механизмов поиска пар опорных точек представлены в алгоритмах объединения изображений SIFT и SURF [18, 19], а также KAZE, AKAZE, ORB и BRISK [31, 32].

Находимые с помощью алгоритма SIFT точки устойчивы к операциям поворота, растяжения изображения, а также частично к изменению точки наблюдения, что является его весомым преимуществом. Анализ результатов экспериментов показал, что обработка с использованием алгоритма SIFT является вычислительно сложной задачей, а скорость обнаружения и совмещения признаков изображений низкая, что является его существенными недостатками.

Алгоритм SURF позволяет определять опорные точки на основе применения матрицы Гессе. Сначала, используя значения гессиана, находятся опорные точки на изображениях. Это осуществляется работой с яркостью изображения и наложением специальной маски [19].

Основная задача объединения изображений на основе алгоритма SURF заключается в том, чтобы определить механизм обнаружения опорных точек. В процессе комплексирования двух изображений и формирования единого выходного изображения возникает проблема в определении характерных опорных точек, перспективы и регулировки цветопередачи. Существенными недостатками алгоритма SURF являются неспособность воспринимать размытые изображения, сложность совмещения разномасштабных изображений или изображений, снятых под разными углами. Алгоритм SURF является улучшением SIFT, что в основном отражается в скорости и более высокой эффективности его применения на практике.

Алгоритм ORB является совокупностью двух модифицированных способов поиска опорных точек с применением алгоритма FAST [32] и последующим определением их особенностей по модифицированному методу BRIEF [31, 32]. Установлено, что алгоритм ORB

реализует выигрыш по скорости при сопоставимой и лучшей точности, чем SIFT [18] и SURF [19] соответственно.

Алгоритм ORB имеет лучшую скорость в вычислении опорных точек и расчете их функционального преобразования, что позволяет использовать его в задачах, где требуется объединение изображений в реальном масштабе времени. Однако выигрыш по скорости негативно отражается на точности сопоставления изображений. Наличие размытых изображений и цифрового шума также ухудшает итоговый результат.

Алгоритм BRISK отличается от остальных алгоритмов тем, что он осуществляет поиск наибольшего числа опорных точек. Однако в это число зачастую попадают точки, образованные в результате действия цифрового шума. Хотя итоговая точность объединения достаточно высока, при этом на селекцию и фильтрацию образовавшихся ложных пар точек затрачивается значительное количество времени.

Алгоритм AKAZE зарекомендовал себя, хотя он уступает по скорости объединения алгоритму ORB и не осуществляет поиска такого числа опорных точек как алгоритм BRISK. Но при этом из-за особенностей его структуры, таких как поиск опорных точек на нелинейной многомасштабной пирамиде и описание функционального преобразования по трем параметрам, вместо одного, как у ORB и BRISK, получаем высокую точность при объединении изображений и дальнейшем их распределении по группам.

В результате сравнительного анализа этих алгоритмов было установлено, что по быстродействию нахождения опорных точек наилучшим является алгоритм ORB, по количеству найденных опорных точек, алгоритм BRISK [32]. По скорости полного объединения изображений наилучшим является также ORB, а по качеству формирования комплексного изображения – алгоритмы SIFT и AKAZE.

Из приведенных выше результатов сопоставления алгоритмов следует, что нет единого алгоритма, удовлетворяющего всем показателям одновременно. И каждый из них применяется в зависимости от постановки конкретной решаемой задачи. Нахождение фиксированного числа опорных точек является общим признаком всех рассмотренных алгоритмов. Эта алгоритмическая особенность не позволяет увеличивать качество формирования комплексного изображения при неудовлетворительных результатах объединения изображений.

В связи с этим в работе предлагается способ формирования комплексного изображения по разноракурстным снимкам различной природы, сформированных бортовой аппаратурой многопозиционной системы радиолокационных и оптических станций и примененного для реализации бортового оперативного мониторинга, свободного от ограничений рассмотренных выше алгоритмов. Отличительной особенностью

предлагаемого в настоящей работе способа формирования комплексного изображения является его итерационность. Предлагаемый в настоящей работе способ осуществляет поиск новых пар точек контура, количество которых увеличивается от итерации к итерации, что влечет увеличение точности и качества комплексирования.

Решаемая научная задача – разработка способа для комплексной обработки изображений земной поверхности от 2 и более элементов многопозиционной системы бортовых локационных систем, а также для выделения объектов и классификации зон с целью формирования целостной достоверной информативной картины о земной поверхности. Задача предлагаемого способа состоит в том, чтобы экспериментально показать возможность эффективного увеличения точности и качества формирования комплексного изображения в многопозиционной системе бортовых разнородных локационных систем, а также показать возможность слияния двух разнородных снимков и преимущества такого симбиоза.

3. Способ формирования комплексного изображения. Для получения комплексного изображения используется процедура пространственного преобразования. Она применяется в случае объединения изображений одной сцены, полученных из различных источников локационной информации или последовательно сформированных одним источником, например, видеокамерой высокого разрешения или радиолокационной бортовой станцией [5-7]. В этом случае задача формирования комплексного изображения ставится как задача нахождения некоторого функционального преобразования, при котором достигается наибольшее совпадение характерных областей снимков земной поверхности.

Предлагаемый способ формирования комплексного изображения основан на итерационном алгоритме поиска пар точек контура на исходных снимках. Схема реализации данного способа представлена на рисунке 3. Функциональная схема состоит из источников локационной информации, включающих оптическую и радиолокационную системы; процессов регистрации изображений; процессов создания комплексного изображения и его отображения.

Первый выход блока принятия решения о приемлемости качества объединенного комплексного изображения соединен со входом дисплея, а второй выход – со вторым входом блока кластеризации состыкованного изображения. Входы блока применения функционального преобразования к исходным зарегистрированным изображениям соединены с блоком регистрации изображений 2. Их количество равно количеству элементов многопозиционной системы $(1+M)$, которые обмениваются между собой зарегистрированными разноракурсными и разнородными изображениями, сформированными бортовой локационной аппаратурой, базирующейся на пространственно-распределенных БПЛА.



Рис. 3. Функциональная схема способа формирования комплексного изображения земной поверхности

Предлагаемый способ комплексирования разноракурсных изображений основан на совместном использовании алгоритмов сегментации (кластеризации пикселей и выделения границ) и алгоритма выделения пар опорных точек контура. Методы сегментации обеспечивают выделение областей и их границ, а метод опорных точек позволяет определить вид функционального преобразования для формирования комплексного изображения по исходным снимкам.

Предлагаемый способ состоит из следующих шагов. На первом шаге исходные разноракурсные изображения состыковываются в одно составное, к которому применяется кластеризация пикселей изображений.

На втором шаге из серии разбиений выбирается разбиение с малым числом кластеров, например $N=2$. Выбранное разбиение состыкованного снимка разделяется на отдельные кластеризованные изображения, на которых фильтром обнаружения границ выделяются контуры характерных областей. На контурах разделенных изображений осуществляется поиск пар опорных точек контуров [33].

На третьем шаге по найденным парам точек контуров определяется вид функционального преобразования. При определении вида функционального преобразования происходит вычисление величины, измеряющей корреляцию между двумя кластеризованными изображениями. При этом значение функции корреляции должно достигать максимального значения. Найденное таким способом функциональное преобразование применяется к исходным изображениям, вследствие чего и формируется комплексное изображение.

На четвертом шаге оценивается качество комплексирования итогового изображения. Если результат формирования неудовлетворительный, то переходим либо к шагу два, где увеличиваем параметр числа кластеров N для поиска и уточнения положения большего числа пар опорных точек, либо к шагу один, где задаем параметр с большей детализацией числа суперпикселей $N_{сп}$.

Отличительной особенностью предлагаемого способа комплексирования по опорным точкам контура, в отличие от аналогичных, является его итерационность. На каждой итерации положение найденных пар точек контура уточняется, что в свою очередь позволяет более точно определить вид искомого функционального преобразования, применяемого к исходным снимкам.

4. Применение сегментации для редуцирования цветов изображения. Сегментация – это процесс разделения изображения на составные части или объекты. Под объектом понимается группа пикселей, объединенная по схожести яркости или цвета. Сегментация от-

носится к предварительной стадии обработки изображений, от результатов которой зависят последующие задачи распознавания и анализа изображений.

В работах [34-36] рассматриваются классификации алгоритмов сегментации. По типу выполняемых операций все алгоритмы сегментации разделяются на алгоритмы выделения областей и алгоритмы выделения границ. Категорию методов выделения областей образуют методы кластеризации (clustering) [37], методы нормализованных разрезов (normalized cuts) [38, 39], методы выращивания области (region growing) [40], методы пороговой обработки (thresholding) [41], методы водоразделов [42].

Методы выделения границ преобразуют исходное изображение в изображение краев, используя изменения оттенков серого. Край – это место локального изменения интенсивности изображения, возникающее на границе между двумя областями, где плавный переход яркости прерывается. К простейшим методам выделения границ относят операторы Приветта (Prewett), Робертса (Roberts), Собеля (Sobel), Кэнни (Canny) [43, 44]. Среди мягких подходов обнаружения границ выделяют подходы на основе нечеткой логики (fuzzy logic based approach) [45], подходы на основе генетических алгоритмов (genetic algorithm approach) [46], подходы на основе нейронных сетей (neural network approach) [47].

Одна из часто возникающих проблем при сегментации изображений – это выбор числа цветов для генерации итогового разбиения. При их малом количестве происходит объединение пикселей в крупные области. Итоговое разбиение получается грубым. Мелкие детали утрачиваются, сливаясь с крупными областями. Такое изображение называется неполно сегментированным (under-segmented image). Напротив, при большом числе цветов итоговое разбиение содержит множество деталей и может слабо отличаться от исходного изображения. Такое разбиение называется сверхсегментированным (over-segmented image). В связи с этим по числу разбиений на выходе алгоритма сегментации алгоритмы разделяют на категорию, возвращающую единственное разбиение, и категорию, возвращающую множество разбиений на выходе алгоритма. Преимущество второй категории методов в том, что из сгенерированной серии разбиений можно выбрать одно или несколько подходящих для дальнейшей обработки.

К категории методов, возвращающих множество разбиений, относятся, например, иерархические методы построения квадродерева [48] по пикселям изображения, или метод построения дендрограммы по гистограмме яркостей [49].

Единого общепринятого метода сегментации изображений не существует. Метод выбирают в зависимости от выполняемой задачи. В настоящей работе используются два алгоритма сегментации изображений, каждый из которых обеспечивает достижение определенного результата. При помощи квазиоптимальной кластеризации [14] получаем серию разбиений разной степени детализации на характерные области. При помощи алгоритма пороговой обработки выделяем границы на выбранном разбиении. Применение такой связки алгоритмов помогает избежать эффектов как чрезмерной сегментации (*over-segmentation*), так и недостаточной сегментации (*under-segmentation*) при выделении границ характерных областей для нахождения опорных точек контуров.

4.1. Модель высокоскоростной кластеризации пикселей изображения. Среди методов кластерного анализа, которые можно применить для цифровых изображений, классический метод Уорда [50, 51] выделяется на фоне остальных. Метод Уорда применим для обработки как полутоновых, так и цветных изображений. Метод использует суммарную квадратичную ошибку (СКО) для оценки качества кластеризации. Чем ниже значение СКО, тем лучше качество разбиения пикселей изображения на отдельные кластеры (цвета). Метод Уорда возвращает адекватные результаты как по субъективному визуальному восприятию, так и объективно численно по значению СКО.

Однако методу Уорда характерен существенный недостаток в виде вычислительной сложности, препятствующий непосредственному применению этого метода в обработке цифровых изображений. Вычислительная сложность этого метода зависит от числа рассматриваемых кластеров и растет квадратично. По этой причине классический метод Уорда затруднительно применять при обработке изображений непрерывную.

Работа [52] посвящена модификации классического метода Уорда. В предложенной модификации преодолевается проблема квадратично возрастающей вычислительной сложности. Модифицированный процесс обработки отличается от оригинального классического наличием вспомогательных блоков операций, в совокупности образующих три последовательных этапа.

Трехэтапная блок-схема алгоритма квазиоптимальной кластеризации представлена на рисунке 4. Последовательно друг за другом в этой схеме соединены следующие блоки: блок «а» построения иерархии связанных сегментов, блок «б» формирования заданного числа суперпикселей и блок «в» кластеризации, а также два блока ввода-вывода. Первый блок ввода считывает исходное изображение и задаваемое

число суперпикселей. Второй заключительный блок вывода возвращает иерархическое множество разбиений.

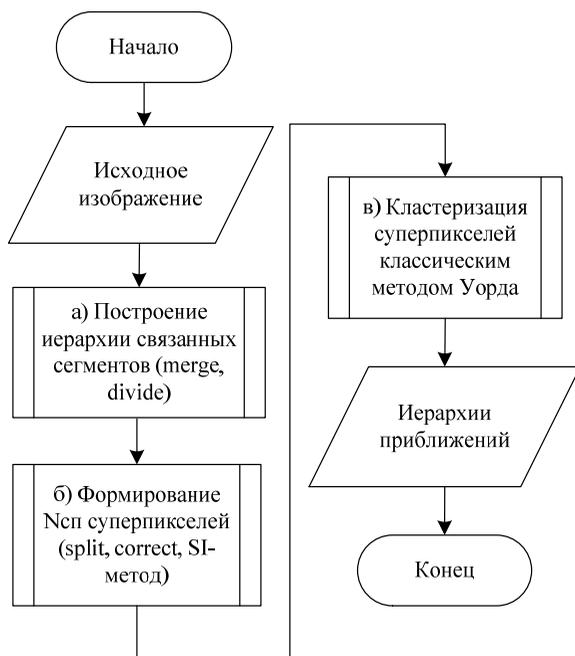


Рис. 4. Трехэтапная блок-схема преодоления вычислительной сложности классического метода Урда

Сегмент и кластер отличаются друг от друга внутренней структурой. Сегмент образуется только из смежных пикселей, а для кластера правило смежности послабляется, то есть кластер может быть образован из нескольких разобщенных пикселей или сегментов.

Построение быстрой иерархии сегментов на этапе «а» имеет несколько вариантов реализации: применение модели Мамфорда-Шаха [53, 54] и применение классического метода Урда [50] по частям изображения.

При применении модели Мамфорда-Шаха на каждом шаге выполняются объединение пары смежных множеств пикселей. На первом шаге построения иерархии сегментов каждый пиксель является сегментом. На каждом последующем шаге сегменты укрупняются путем объединения пары смежных сегментов. На конечном шаге все пиксели объединены в один сегмент.

При применении классического метода Уорда по частям изображения исходное изображение разделяется на «клетки» регулярной сеткой. Каждая «клетка» рассматривается как самостоятельное изображение. Внутри каждого такого самостоятельного изображения пиксели кластеризуются классическим методом Уорда [50]. На последних шагах выполняется объединение иерархий кластеров пикселей соответствующих «клеток».

Первый этап «а» (см. рис. 4) передает второму этапу «б» иерархию связанных сегментов, задаваемую двумя таблицами. В первой таблице хранятся указатели объединяемых вершин, значения суммарных квадратичных ошибок объединений, суммы площадей, средние значения яркостей сегментов. Во второй таблице – последовательность объединяемых пар сегментов.

Второй этап «б» алгоритма квазиоптимальной кластеризации формирует заданное число $N_{сп}$ суперпикселей. Фактически выполняется процедура улучшения качества построенной иерархии разбиений. Диапазон значений задаваемого параметра $N_{сп}$ – от 1 до N , где N – общее количество пикселей в изображении. Большому значению параметра $N_{сп}$ соответствует большее число кластеров, для которых преформатируется иерархическая структура. При задании большего значения параметра $N_{сп}$ выполняется более детальное улучшение качества выбранного разбиения изображения. Для реализации этого этапа разработаны два алгоритма:

1) *Segmentation Improvement (SI-метод)* [14], суть которого реализуется разделением одного текущего сегмента на два его образующих сегмента и объединении двух других смежных сегментов в один.

2) Метод *K-средних-без-средних (K-meanless метод)* [54] извлекает часть пикселей из одного множества и относит в другое.

Оба метода используют значение СКО для оценки качества получаемого разбиения. Итерационный процесс промежуточного улучшения качества завершается, когда заканчиваются сегменты, реструктуризация которых дает уменьшение значения СКО, соответствует улучшению качества разбиения.

Третий этап «в» кластеризует ранее сформированные суперпиксели классическим методом Уорда.

Таким образом, для осуществления возможности применения классического метода Уорда, требуется проделать предпроцессинг, который заключается в следующем: подготовить структуру данных изображения (этап «а») и промежуточно улучшить качество данной структуры (этап «б»). Эти предпроцедуры и позволяют преодолеть недостаток метода Уорда, связанный с квадратичной вычислительной сложностью.

4.2. Программно-алгоритмический инструментарий модели.

Основу программно-алгоритмического инструментария схемы высокоскоростной кластеризации пикселей [14] образуют четыре операции над множествами пикселей (кластерами, сегментами): операции «merge», «divide», «correct», «split». Эти перечисленные операции используют минимум СКО E или среднеквадратичной ошибки σ как критерий качества при кластеризации. СКО и среднеквадратичная ошибка связаны равенством $E=3N\sigma^2$, в котором коэффициент 3 указывает на число цветовых компонент, а параметр N задает общее число пикселей в изображении.

Операция «merge» объединяет кластеры 1 и 2 (смежные сегменты 1 и 2) с числом пикселей n_1 и n_2 , и средними яркостями I_1, I_2 :

$$\Delta E_{merge} = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} \|I_1 - I_2\|^2.$$

Объединение пары множеств 1 и 2 из набора доступных выполняется исходя из критерия минимума приращения СКО: $(1, 2) = \operatorname{argmin}\{\Delta E_{merge}(1,2)\}$.

Операция «divide» разделяет множество пикселей 1 на два его составляющих множества $1'$ и $1''$: $\Delta E_{divide}(1) \equiv -\Delta E_{merge}(1',1'')$.

Операция «split» выделяет из множества 1 (с числом пикселей n_1) подмножество k пикселей ($k < n_1$):

$$\Delta E_{split} = -\frac{kn_1}{n_1 - k} \|I - I_1\|^2, \Delta E_{split} \leq 0,$$

где I и I_1 – трехкомпонентные средние значения яркости n_1 и k пикселей.

Операция «correct» реклассифицирует k пикселей исключением из множества 1 (с числом пикселей n_1) с последующим отнесением к множеству 2 (с числом пикселей n_2):

$$\Delta E_{correct} = \frac{kn_2}{n_2 + k} \|I - I_2\|^2 - \frac{kn_1}{n_1 - k} \|I - I_1\|^2,$$

где I_1, I_2 – средние значения пикселей кластеров 1 и 2, I – среднее значение реклассифицируемых k пикселей.

Критерием исполнения операции «correct» служит максимальное понижение значения приращения СКО: $(1, 2, k) = \operatorname{argmin} \Delta E_{correct}(1, 2, k)$, $\Delta E_{correct} \leq 0$.

Пара операций «merge÷» образуют SI-метод, который улучшает качество заданного разбиения. Метод разделяет сегмент 1 на два

сегмента его составляющих и объединяет в один сегмент два других 2 и 3 несовпадающих с сегментом 1. Метод *SI* выполняется итеративно по критерию максимального падения значения приращения СКО:

$$\Delta E(1, 2, 3) = \Delta E_{divide}(1) + \Delta E_{merge}(2, 3); (1, 2, 3) = \operatorname{argmin}(\Delta E(1, 2, 3)); \\ \Delta E(1, 2, 3) < 0.$$

Итеративный процесс «слияния-и-разделения» повторяется до тех пор, пока существует такая тройка сегментов 1, 2, 3, исполнение операции над которыми приводит к падению общего значения СКО в заданном разбиении. В ходе исполнения *SI*-метода суммарное число сегментов остается постоянным.

Операция «*correct*» формирует *K-meanless* метод [55]. Операции «*merge*» и «*divide*» используются для быстрого построения грубой иерархии. Операции «*split*» и «*correct*» преобразуют уже построенную грубую иерархию в более точную. Иерархия множеств пикселей считается сформированной, если соблюдается следующее правило: 1) множество должно состоять из не менее чем одного пикселя; 2) должна существовать пара множеств, объединение которых образует укрупненное множество.

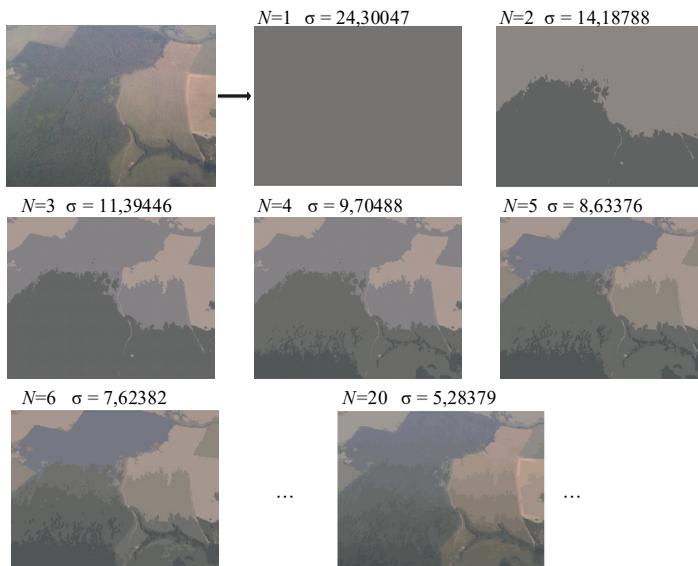
4.3. Результаты кластеризации пикселей изображения. На рисунке 4 показана конечная часть примера последовательности разбиений исходного изображения на серию кусочно-постоянных приближений. Разбиения получены кластеризацией пикселей согласно алгоритму трехэтапной схемы рисунка 4. При этом значение вспомогательного параметра $N_{сп}$ числа суперпикселей, задающего точность вычислений, равно 1000. Параметр точности может принимать значения от 1 до N . При значении $N_{сп} = 1$ схема (рисунок 4) работает в режиме чистой сегментации, как в модели Мамфорда-Шаха [53, 54]. При $N_{сп} = 1000$ – в режиме квазиоптимальной кластеризации. При $N_{сп} = N$ – в режиме чистой кластеризации пикселей, которая доступна для изображений малых размеров, в связи с большой вычислительной сложностью исходного метода Уорда (для изображений 512x512 время вычислений превышает 20000 секунд).

В качестве исходного изображения для обработки взят левый снимок из пары аэроснимков ландшафта земной поверхности, предназначенных для дальнейшего комплексирования в одно изображение. На рисунке 5 в верхнем левом углу представлено отмасштабированное исходное изображение. Для данного исходного изображения размером 1728x1350 пикселей доступно всего 2332800 разбиений. Справа от него – часть последовательности кластеризованных разбиений согласно схеме, показанной на рисунке 4. Представлены 20, 6, 5, 4, 3, 2 и 1 разбиения на кластеры.

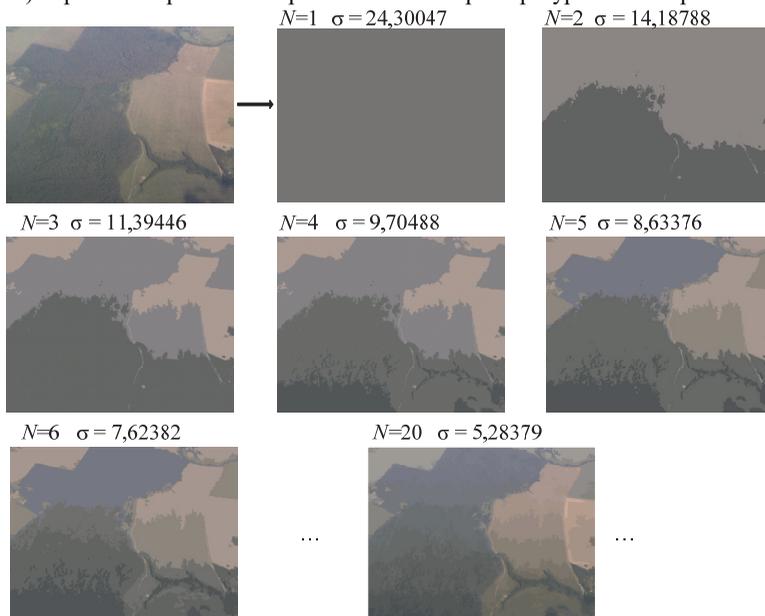
Над каждым таким разбиением указано число цветов (кластеров), из которых оно состоит. Под разбиением указано значение СКО, соответствующее данному разбиению.

Для отдельно левого (рис. 5а и 5г), правого (рис. 5б и 5д) и составного (рис. 5в и 5е) из двух снимков исходных изображений получены серии разбиений от 1 до 20 цветов в двух различных режимах: в режиме чистой сегментации и в режиме квазиоптимальной кластеризации пикселей. На рисунке 6 сплошными линиями обозначены последовательности сегментированных разбиений ($N_{сп}=1$). Пунктирными линиями представлены результаты кластеризации пикселей предложенной трехэтапной схемой ($N_{сп}=1000$). Цветом (зеленым, красным, синим) отмечены различные снимки, для которых выполнялось два вида обработки. Зеленым цветом отмечены линии, соответствующие результатам обработки состыкованных снимков в одно изображение. Красным цветом отмечены линии, соответствующие результатам обработки отдельно взятого левого изображения. Синим цветом – отдельно правого снимка. На оси абсцисс графика рисунке 6 отложены количество цветов (число кластеров) в разбиении. На оси ординат отмечено значение СКО.

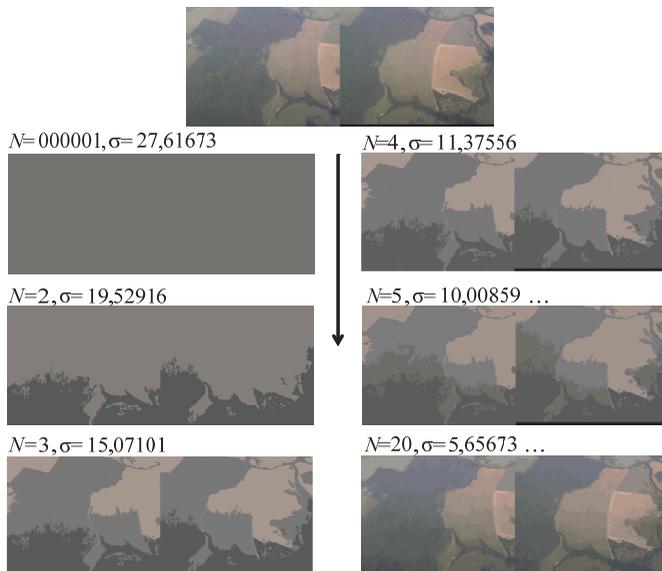
Согласно графику, представленному на рисунке 6, видно, что предлагаемая трехэтапная схема дает лучшие результаты по значению СКО. Ошибка меньше, чем при чистой сегментации. В связи с этим целесообразно использование схемы квазиоптимальной высокоскоростной кластеризации пикселей изображения для последующей процедуры совмещения редуцированных по цвету разнокурсных снимков, снятых бортовыми локационными системами. Вопросы быстрогодействия алгоритма квазиоптимальной кластеризации рассмотрены в работе [52], где было показано, что за счет небольшой потери качества кластеризации пикселей можно добиться приемлемых результатов по значению СКО за малое время по сравнению с классическим методом Уорда.



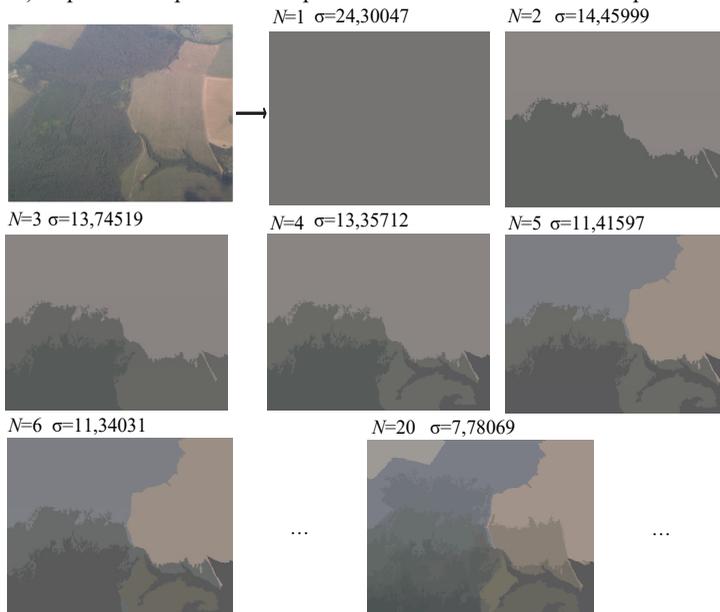
а) Серия кластеризованных разбиений левого разноракурсного изображения



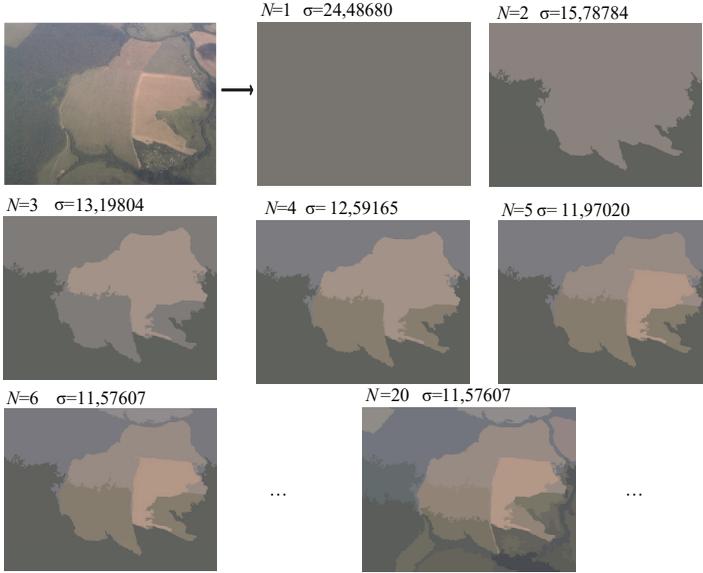
б) Серия кластеризованных разбиений правого разноракурсного изображения



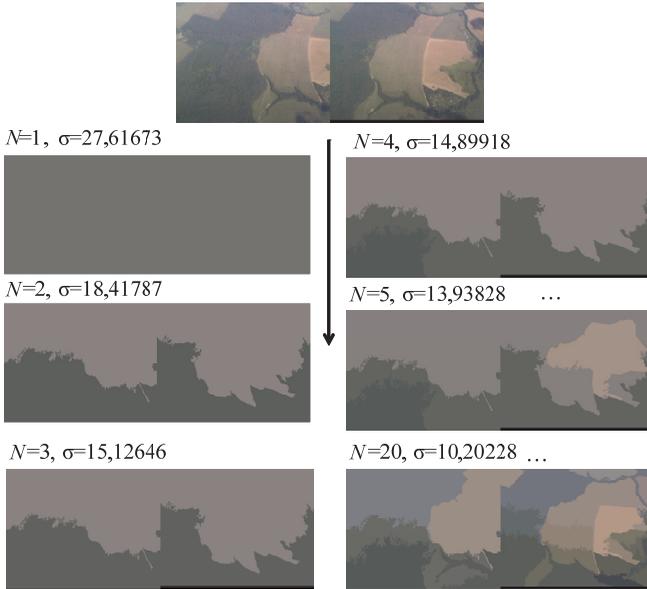
в) Серия кластеризованных разбиений состыкованного изображения



г) Серия сегментированных разбиений левого разноракурсного изображения



д) Серия сегментированных разбиений правого разноракурсного изображения



е. Серия сегментированных разбиений состыкованного изображения

Рис. 5. Примеры сегментированных разбиений изображения

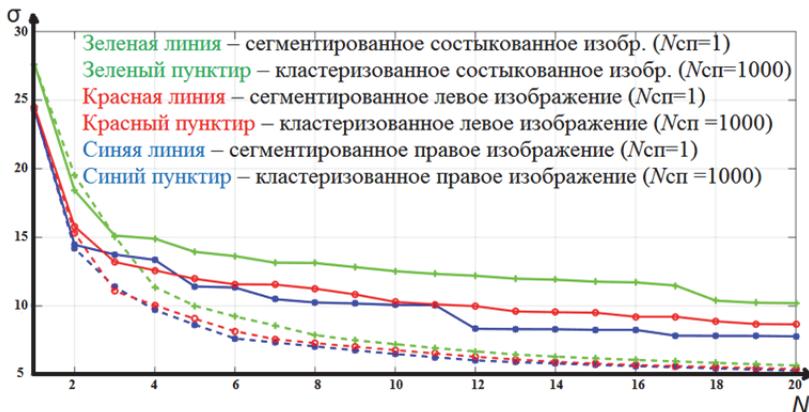
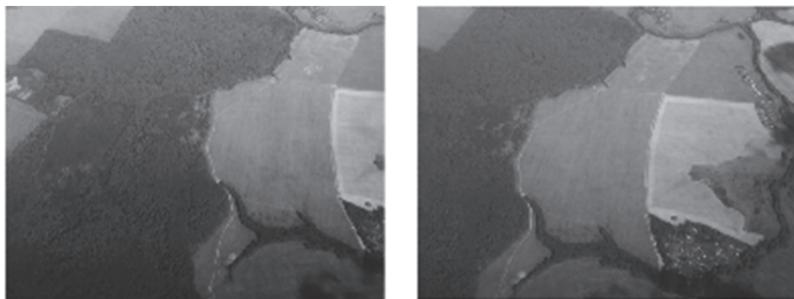


Рис. 6. Графики зависимостей значений среднеквадратичной ошибки σ различных типов разбиений от числа цветов (кластеров или сегментов) N в разбиении

5. Экспериментальные результаты способов формирования комплексных изображений. В данном разделе иллюстрируются экспериментальные результаты применения способов комплексирования как разнородной, так и однородной информации, позволяющих объединить разноракурсные локационные изображения в одно информационное поле.

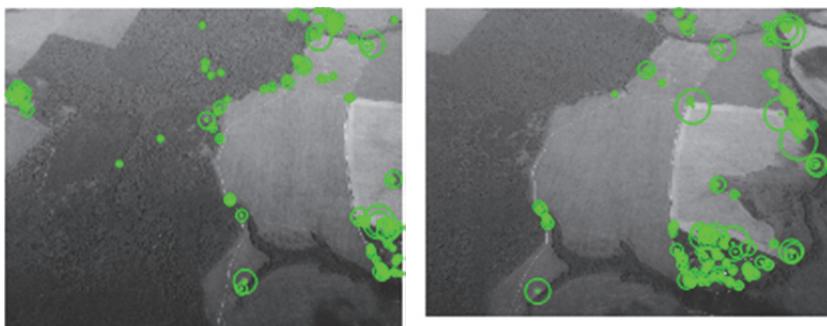
5.1. Эксперимент по формированию комплексного изображения на основе способа опорных точек. На рисунках 7а и 7б представлены два конвертированных в градации серого изображения различного размера, полученные в результате натурных полетов двух БПЛА. Эти изображения сформированы с разных ракурсов аппаратурой оптико-локационных устройств. Далее эти изображения (см. схему рисунок 2) поступают по беспроводному высокоскоростному помехозащищенному каналу [4] в центр обработки и комплексирования информации от БПЛА₁ и БПЛА₂.

Процедура комплексирования снимков в одно изображение единой сцены по способу опорных точек осуществляет поиск и выделение характерных точек на изображениях (рис. 7а и 7б). На основе найденных на обоих изображениях характерных пар точек (рисунок 8) осуществляется сопоставление точек, а затем производится объединение снимков в один (рис. 9, 10) [18].



а)

б)

Рис. 7. Изображения, снятые аппаратурой БПЛА: а) БПЛА₁; б) БПЛА₂

а)

б)

Рис. 8. Отображение опорных точек на разноракурсных изображениях

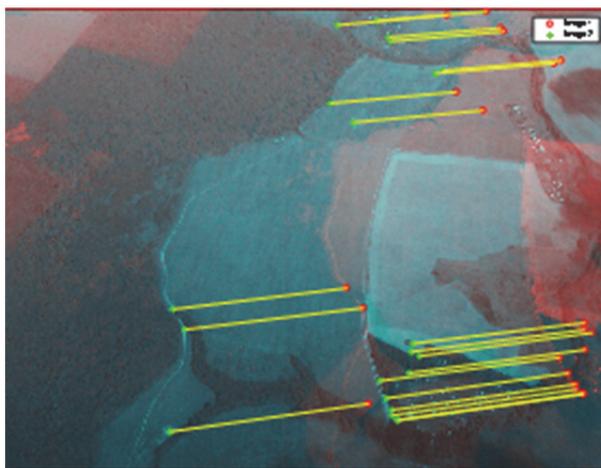


Рис. 9. Наложение двух изображений в одно и сопоставление точек

На рисунке 10 приведено объединенное изображение, пригодное для дальнейшей обработки. Способ опорных точек прост в использовании и реализации. Он применим как для цветных, так и для полутоновых снимков. Однако рассмотренный способ имеет ряд ограничений. В частности, он не применим, если найденное количество опорных точек меньше четырех. Способ имеет довольно высокую вычислительную сложность. И у него отсутствует гарантия, что найденная опорная точка совпадет с контуром. Ему также свойственна неоднозначность результатов при фрактальной или подобной структуре исходных изображений. А также отсутствует возможность повышения точности и качества формирования комплексного изображения.

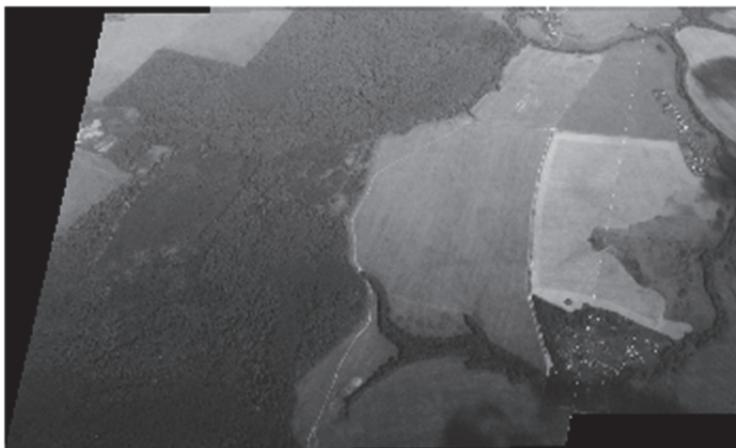


Рис. 10. Объединенное изображение одной сцены

В связи с вышеуказанными ограничениями и был предложен способ комплексирования по точкам контура, которому не свойственны ограничения способа опорных точек. В следующем разделе приводятся экспериментальные результаты применения алгоритма поиска пар точек контура, которые и иллюстрируют преимущества предлагаемого способа перед аналогичными.

5.2 Эксперименты на основе способа поиска пары точек контура. На первом шаге оба изображения переводятся в кластеризованный вид по описанному в разделе 4 алгоритму. В целях удобства выделения контуров, поступающие разноразмерные изображения от источников локационной информации, как и при реализации способа опорных точек, конвертируются в градации серого. Далее выделяются внутренние контуры кластеризованных изображений.

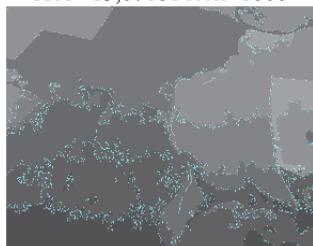
На рисунках 11а-11е представлены пары кластеризованных изображений с выделенными контурами. При этом каждая из пар имеет различную степень детализации (число кластеров).



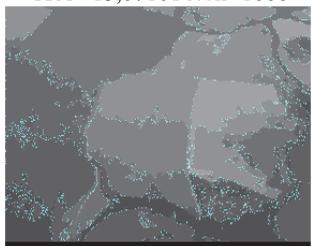
а) $N=3$ кластера,
СКО=15,07101 $N_{сп}=1000$



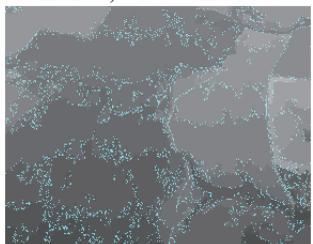
б) $N=3$ кластера,
СКО=15,07101 $N_{сп}=1000$



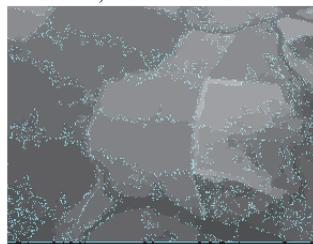
в) $N=9$ кластеров,
СКО=7,49204 $N_{сп}=1000$



г) $N=9$ кластеров,
СКО=7,49204 $N_{сп}=1000$



д) $N=18$ кластеров,
СКО=5,84563 $N_{сп}=1000$



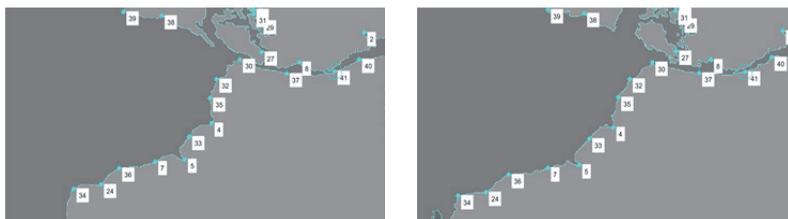
е) $N=18$ кластеров,
СКО=5,84563 $N_{сп}=1000$

Рис. 11. Кластеризованные изображения с выделенными контурами

Процесс их обработки осуществляется следующим образом. Левое и правое изображения были состыкованы в одно. Далее к этому состыкованному изображению была применена квазиоптимальная кластеризация пикселей, описанная в разделе 4. Затем обработанное состыкованное изображение вновь разделено на левое и правое. И затем на левом и правом изображении были выделены контуры

ры характерных областей. Такой прием обработки позволяет на разноразмерных изображениях выделять схожие по структуре области пикселей.

На рисунке 12 выделены фрагменты общей наблюдаемой зоны двух разноразмерных изображений в увеличенном масштабе. На увеличенных фрагментах выделены контуры и определены характерные пары точек схожих по структуре областей. Количество определенных пар точек контура составляет порядка 30 штук.



а) фрагмент изображения с БПЛА₁

б) фрагмент изображения с БПЛА₂

Рис. 12. Определение опорных точек контура на фрагментах

Далее на третьем шаге по этим точкам контура определяется функциональное преобразование, при котором значение функции корреляции принимает максимальное значение. Это функциональное преобразование и является начальным для последующих возможных итераций. При текущих начальных параметрах кластеризации (рис. 11а, 11б) и при найденном функциональном преобразовании было сформировано комплексное изображение (рис. 13а). Переход к последующим итерациям целесообразно проводить в случае неудовлетворительной оценки качества сформированного изображения.

Аналогичные действия (шаги 1-3) выполняются для разбиений с большим числом кластеров N , то есть с большей детализацией. При этом диапазон поиска как самих опорных точек контура, так и функционального преобразования будет сужен и уточнен, а количество опорных точек контура возрастет. Увеличивается и точность определения их положения. По этим причинам и происходит уточнение функционального преобразования. После того, как на новых итерациях положение опорных точек контура уточняется и подбирается более точное функциональное преобразование исходных разноразмерных изображений, производится операция формирования одного общего изображения (рис. 13б).

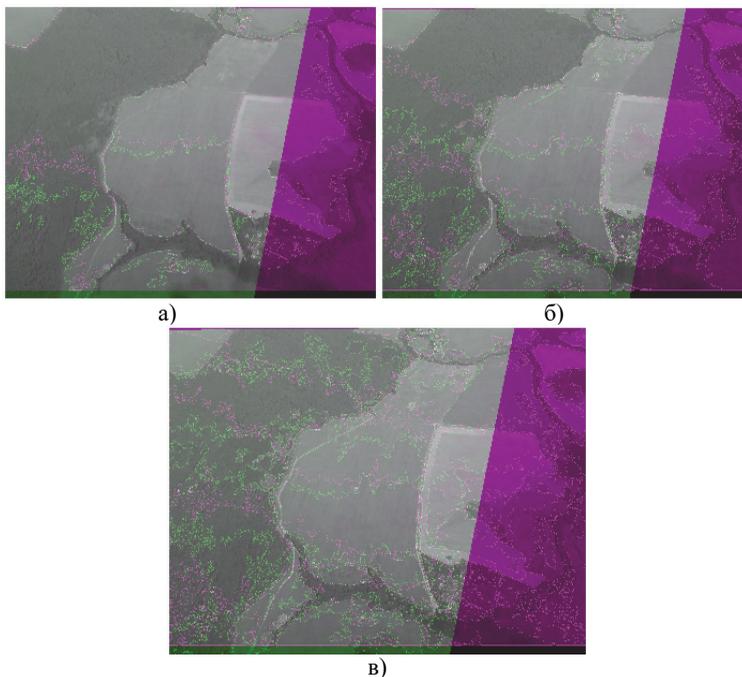
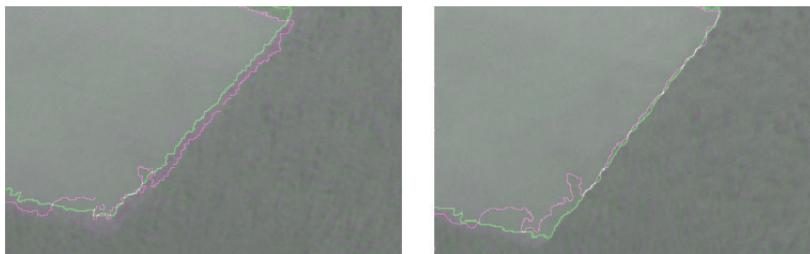


Рис. 13. Комплексное изображение

Затем вновь производится оценка качества комплексного изображения. Так, например, на рисунках 14а и 14б представлены увеличенные фрагменты объединенных изображений по точкам контура (см. рис. 13) со следующими параметрами: левое - $N_{сп}=1000$; $N=3$ кластера; $\sigma=15,07101$; 30 опорных точек и правое - $N_{сп}=1000$; $N=9$ кластеров; $\sigma=7,49204$; 50 опорных точек.



а) $N_{сп}=1000$; $N=3$ кластера;
 $\sigma=15,07101$; 30 опорных точек

б) $N_{сп}=1000$; $N=9$ кластеров;
 $\sigma=7,49204$; 50 опорных точек

Рис. 14. Оценки качества объединенного сформированного изображения

На левом фрагменте наблюдается, как два контура разноракурсных изображений совмещаются с некоторым несовпадением. Контурные линии идут на удалении друг от друга. На правом фрагменте с большим числом опорных точек видим, что линии практически совпадают. Переход на новые итерации с большей детализацией разбиений для уточнения функционального преобразования повторяется до приемлемого качества комплексированного изображения.

Аналогичный эксперимент (рис. 15-17) был проведен для комплексирования оптического и радиолокационного изображения, сформированного методом синтезирования апертуры антенны одного и того же участка местности под разным ракурсом.

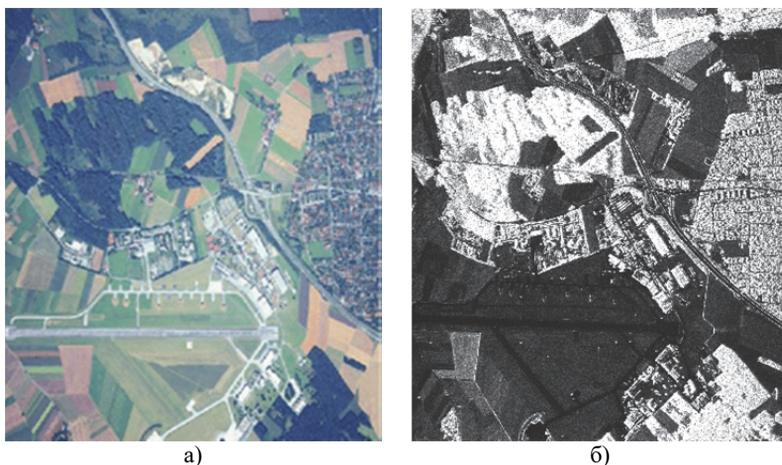


Рис. 15. Изображение одного и того же участка местности: а) оптическое; б) радиолокационное

Бортовые системы мониторинга с радиолокационным синтезированием (РСА) апертуры антенны позволяют формировать изображения земной поверхности с высоким разрешением. Кроме того, этот метод формирования изображений применим как ночью, так и в сложных метеоусловиях, а также эти изображения имеют ряд преимуществ по сравнению с оптическими системами мониторинга. Однако подобные изображения зачастую сложно интерпретировать, главным образом, по следующим двум причинам. Первая – они засорены мультипликативным шумом, известным как спекл-шум. Вторая – сформированные изображения методом РСА не содержат информации о цвете, а являются изображениями, состоящими из пикселей оттенков серого. Эти две сложности часто затрудняют обработку и интерпретацию ландшафтов и их

объектов на радиолокационных изображениях. Следовательно, целесообразно комплексирование оптического и радиолокационного изображений, например представленных на рисунке 15. Основной характеристикой комплексирования двух изображений в одно является повышение информативности в зоне наблюдения и объектов на ней с сохранением всех важных качеств исходных снимков.



а) кластеризованное оптическое изображение, $N=5$, $\sigma=16,22515$



б) кластеризованное радиолокационное изображение, $N=5$, $\sigma=21,54134$

Рис. 16. Кластеризованные локационные изображения одного участка

Так на рисунке 17 представлен результат формирования комплексного изображения земной поверхности с предварительным применением алгоритма кластеризации пикселей локационных разнородных изображений, снятых аппаратурой БПЛА в многопозиционной системе. На рисунке 17 исходные разнородные снимки объединены в единое комплексное изображение с помощью выбора важнейших различных компонентов из исходных снимков. Бирюзовым цветом выделены контуры характерных областей. Комплексное изображение содержит два слоя: оптический и радиолокационный. Подобное изображение является комплексным вследствие того, что эти две разнородные составляющие взаимно дополняют друг друга. В зависимости от решаемой задачи, каждый из слоев при необходимости можно усилить.



Рис. 17. Комплексование оптического и радиолокационного изображения

Таким образом, исследуемый способ формирования комплексного изображения на основе поиска пар точек контуров заключается в предварительном редуцировании количества кластеров исходных изображений при помощи трехэтапного алгоритма квазиоптимальной кластеризации, который генерирует множество разбиений на кластеры пикселей. После применения этого алгоритма осуществляется поиск пар опорных точек выделенных контуров и определение функционального преобразования с оценкой степени корреляции объединенных изображений. При неудовлетворительной оценке качества итогового изображения необходимо вернуться к первому шагу предлагаемого способа комплексования, тем самым перейдя на новую итерацию, где исходными данными будут служить кластеризованные изображения с большей детализацией. Большому числу кластеров соответствует большая протяженность границ контуров, на которых может быть найдено большее число пар опорных точек. На новой паре из серии кластеризованных изображений положение опорных точек контура и само искомое по ним функциональное преобразование уточняется до тех пор, пока оценка качества комплексования не будет приемлемой.

6. Особенности и сферы применения способа. На основании вышеизложенного следует, что предлагаемый способ на основе поиска пар точек контура по сравнению с аналогичными позволяет формировать комплексное изображение на основе разноразмерных изображений различной природы. Применение итерационного подхода при реализации способа позволяет улучшить качество формирования,

увеличить точность комплексирования, а также информативность итогового комплексного изображения.

Кроме того, способ применим для классификации зон и объектов на радиолокационных снимках, выступающих в качестве опорных изображений, вследствие того, что как было упомянуто выше, они являются всепогодными и их формирование возможно в любое время суток. Однако оптические цветные снимки после формирования единого комплексного снимка могут служить в качестве дополнительной информации о наблюдаемых зонах обзора.

Поскольку оптическое изображение имеет дополнительно информацию о цвете, в отличие от черно-белого радиолокационного, то формирование по ним единого комплексного изображения позволяет получить цветосинтезированный снимок с большей информативностью. Такой подход позволяет в дальнейшем осуществлять качественный анализ подобных снимков в целях повышения достоверности дешифрирования опорных радиолокационных изображений.

Кроме того, рассматриваемый способ применим при экологическом мониторинге, когда требуется определить временные изменения ландшафтов наблюдаемых зон в динамике. В этом случае формирование комплексного изображения осуществляется по снимкам, снятым в текущий момент времени с архивными снимками, на которых изменений еще не было. Формирование комплексного разновременного изображения позволяет довольно четко выделить сезонные изменения, например, такие как определение зон пожаров, размера береговой кромки рек, озер и прочих водоемов, масштабы формирования болотистой местности, таяния льдов, снежных покровов и другие временные изменения.

Такое применение предлагаемого способа для формирования комплексных изображений разнесенных по времени исходных снимков в целях экологического мониторинга, в частности выявления структурных изменений запечатленных объектов различной тематики, является довольно значимой задачей, в особенности для различных структур, осуществляющих поисково-спасательные операции, в том числе в условиях Арктики.

6. Заключение. В ходе проделанной работы было предложено применение алгоритма квазиоптимальной кластеризации пикселей для формирования стартовых наборов разбиений и последующей процедуры формирования комплексного изображения. Проанализированы результаты редуцирования разноразмерных изображений по цвету. На примере сопоставления результатов применения трехэтапной схемы в

различных режимах: чистой сегментации и квазиоптимальной кластеризации, – установлено преимущество второго режима. Результаты квазиоптимальной кластеризации пикселей изображения приемлемы как субъективно визуально, так и объективно по значению суммарного квадратичного отклонения.

В работе предложен прием обработки разноракурсных изображений, заключающийся в состыковке серии снимков в одно изображение с последующей кластеризацией пикселей этого единого снимка. Такой способ обработки позволяет выделить схожие области пикселей на различных снимках. Результаты проведенных экспериментов подтвердили возможность комплексирования исходных как разнородных, так и однородных снимков, полученных с разных ракурсов, по кластеризованным изображениям.

Предложен способ комплексирования снимков, включающий алгоритм кластеризации пикселей и способ выделения опорных точек контура. Данный способ применим для бортовых локационных станций многопозиционной системы БПЛА как самолетного типа, так и вертолетного, в целях комплексирования и актуализации информации о земной поверхности.

В работе рассмотрено два способа комплексирования: способ опорных точек и способ совмещения по точкам контура. Стоит отметить, что в отличие от первого способа, у второго способа количество точек контура возрастает с повышением числа кластеров изображения. На каждой последующей итерации повышается степень детализации снимка, увеличивается количество точек контура, и как следствие уточняется вид искомого функционального преобразования. Следует также отметить, что данный алгоритм уточнения функционального преобразования с повышением степени детализации изображения следует повторять до тех пор, пока степень оценки качества совмещенного изображения не будет приемлемой. Сопоставление рассмотренных способов комплексирования изображений показало преимущество применения способа на основе выделения точек контуров.

Суть методики формирования комплексного изображения из разнородных и разноракурсных исходных снимков заключается в предварительном применении двух методов сегментации. Первый иерархический метод квазиоптимальной кластеризации пикселей, генерирующий серию разбиений, позволяет обойти проблемы неточной и сверх сегментации (*under-segmentation*, *over-segmentation*). Из серии разбиений всегда можно выбрать одно или несколько подходящих для дальнейшей их обработки. Если первый метод возвра-

щает характерные области на исходные снимки, то второй метод сегментации позволяет на выбранном редуцированном по цвету разбиении выделить границы характерных областей. Без первого метода кластеризации пикселей второй метод возвращает неадекватные, чрезмерно сегментированные результаты, по которым уже невозможно определить пары точек контуров для слияния двух исходных изображений в одно.

В работе предложены две идеи: 1) обрабатывать единое состыкованное в одно изображение алгоритмом кластеризации пикселей, чтобы выделять одинаковые области подобным образом на различных частях состыкованной пары снимков; 2) подбирать функциональное преобразование по точкам контура выделенных на обработанной паре кластеризованных снимков, которое и применяется к исходным изображениям для их комплексирования.

Предложенная в настоящей работе методика формирования комплексного изображения может быть адаптирована для обработки алгоритмов кластеризации пикселей и комплексирования сформированных изображений потока кадров, записанных в ходе натуральных испытаний разнородными устройствами формирования локационной информации.

Приведенные в работе результаты комплексирования как однородных (оптических) изображений, так и разнородных (радиолокационных и оптических) изображений являются основой для обеспечения дальнейших исследований по комплексированию разнородной и разноформатной информации, применяемой для современных систем мониторинга земной поверхности. Эти результаты также являются существенными для структур, осуществляющих оперативные поисково-спасательные операции в зонах чрезвычайных ситуаций и катастроф природного и техногенного характера, а также в целях экологического мониторинга труднодоступных мест, в том числе в условиях Арктики.

Литература

1. *Kim H.G., Park J.-S., Lee D.-H.* Potential of Unmanned Aerial Sampling for Monitoring Insect Populations in Rice Fields // *Florida Entomol.* 2018. vol. 101. pp. 330–334.
2. *Toro G.F., Tsourdos A.* UAV sensors for environmental monitoring // *Belgrade: MDPI.* 2018. 661 p.
3. *Sergeev A.M. et al.* Discovering and Analyzing Binary Codes Based on Monocyclic Quasi-Orthogonal. Matrices // *Smart Innovation, Systems and Technologies.* 2019. vol 143. pp. 113–123.
4. *Kapranova E.A. et al.* Distributed matrix methods of compression, masking and noise-resistant image encoding in a high-speed network of information exchange, information processing and aggregation // *SPIE Future Sensing Technologies.* 2019. pp. 111970T-1-111970T-7.

5. *Shepeta A.P., Nenashev V.A.* Modeling Algorithm for SAR Image Based on Fluctuations of Echo Signal of the Earth's Surface // Proc. of SPIE Remote Sensing. 2015. vol. 9642. pp. 96420X-1-96420X-8.
6. *Klemm R.* Novel Radar Techniques and Applications. Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar // Scitech Publishing. 2017. 951 p.
7. *Chen K.-S.* Principles of Synthetic Aperture Radar Imaging. A System Simulation Approach // CRC Press, 2016. 217 p.
8. *Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu.* Radio vision in the front viewing area of an airborne radar with a synthesized aperture of the antenna // Radio Engineering. 2004. vol. 1 pp. 47–49.
9. *Shepeta A.P., Makhlin A.M., Nenashev V.A., Kryachko A.F.* Performance of UWB Signal Detecting Circuits // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018. pp. 1–4.
10. *Lombacher J., Hahn M., Dickmann J., Wöhler C.* Object classification in radar using ensemble methods // 2017 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM). 2017. pp. 87–90.
11. *Svinarsky M.V., Yarmolik S.N., Khramenkov A.S.* Influence of the target observation angle on the efficiency of radar object classification // Reports of the Belarusian state University of Informatics and Radioelectronics. 2017. vol. 104. no. 2. pp. 31–38.
12. *Klemm R.* Novel Radar Techniques and Applications. Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion // Scitech Publishing. 2017. vol. 2. 553 p.
13. *Fourati H.* Multisensor Data Fusion: From Algorithms and Architectural Design to Applications // CRC Press. 2016. 639 p.
14. *Khanykov I.G., Kharinov M.V., Patel C.* Image Segmentation Improvement by Reversible Segment Merging // Int. Conf. on Soft Computing and its Engineering Applications, icSoftComp-2017, IEEE Gujarat Section Proceedings, at CHARUSAT. 2017.
15. *Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P.* The Problem of Determination of Coordinates of Unmanned Aerial Vehicles Using a Two-Position System Ground Radar // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). IEEE. 2018. pp. 256–280.
16. *Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P.* Formation of Radar Image the Earth's Surface in the Front Zone Review Two-Position Systems Airborne Radar // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2019. pp. 1–5.
17. *Kapranova E.A., Nenashev V.A., Sergeev M.B.* Compression and coding of images for satellite systems of Earth remote sensing based on quasi-orthogonal matrices // Proc. of SPIE, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV. 2018. vol. 10789. pp. 1078923-1–1078923-6.
18. *Wang J., Wang Y.* Modified SURF applied in Remote Sensing Image Stitching. School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology // Shijiazhuang. 2015. 256 p.
19. *Sledevič T., Serackis A.* SURF Algorithm Implementation on FPGA Department of Electronic Systems // Vilnius Gediminas Technical University. 2015. 76 p.
20. *D'Addabbo A., Refice A., Francesco P.* Lovergine, Guido Pasquariello «DAFNE: A Matlab toolbox for Bayesian multi-source remote sensing and ancillary data fusion, with application to flood mapping» // Computers & Geosciences. 2018. vol. 112. pp. 64–75.
21. *Dabbiru L. et al.* Runway assessment via remote sensing. 1-4. 10.1109/AIPR.2015.7444545. 2015.
22. *Seo D.K. et al.* Fusion of SAR and Multispectral Images Using Random Forest Regression for Change Detection // ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2018. vol. 7. 401 p.
23. *Bigdeli B., Pahlavani P.* High resolution multisensor fusion of SAR, optical and LiDAR data based on crisp vs. fuzzy and feature vs. decision ensemble systems // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. vol. 52. pp. 126–136

24. *Verdoliva L. et al.* Optical-Driven Nonlocal SAR Despeckling // *Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015. pp. 314–318.
25. *Kaplan G., Avdan U.* Sentinel-1 and Sentinel-2 Data Fusion for Mapping and Monitoring Wetlands. Preprints 2018. 2018070244.
26. *Dalla Mura M. et al.* Challenges and Opportunities of Multimodality and Data Fusion in Remote Sensing // *Proceedings of the IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 2015. vol. 103(9). pp. 1585–1601.
27. *Rajah P., Odindi J., Mutanga O.* Feature level image fusion of optical imagery and Synthetic Aperture Radar (SAR) for invasive alien plant species detection and mapping» // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2018. vol. 10. pp. 198–208.
28. *Shao Z., Fu H., Fu P., Yin L.* Mapping Urban Impervious Surface by Fusing Optical and SAR Data at the Decision Level // *Remote Sens*. 2016. vol. 8(11). pp. 1–21.
29. *Nsaibi M., Chaabane F.* Image fusion of radar and optical remote sensing data for land cover classification // *3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications*. 2008. pp. 1–4.
30. *Kedar M., Rege P.P.* Wavelet Transform-Based Fusion of SAR and Multispectral Images // *Nanoelectronics, Circuits and Communication Systems. NCCS 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2018. vol 642. pp. 256.
31. *Tareen S.A.K., Saleem Z.* A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK // *2018 International conference on computing, mathematics and engineering technologies (iCoMET)*. 2018. pp. 1–10.
32. *Макаров А.С., Болсуновская М.В.* Сравнительный анализ методов обнаружения особых точек на изображениях при различных уровнях освещения // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика, телекоммуникации и управление*. 2018. Т. 11. №. 2. С. 7–18.
33. *Ефимов А.И.* Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений // *Компьютерная оптика*. 2016. Т. 40. № 2. С. 258–265.
34. *Zaitoun N.M., Aqel M.J.* Survey on Image Segmentation Techniques // *Procedia Computer Science*. 2015. vol. 65. pp. 797–806.
35. *Jain S., Laxmi V.* Color Image Segmentation Techniques: A Survey // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2017. pp. 189–197.
36. *Vantaram S.R., Saber E.* Survey of contemporary trends in color image segmentation // *Journal of Electronic Imaging*. 2012. vol. 21(4). pp. 248.
37. *Dhanachandra N., Chanu Y.J.* A survey on image segmentation methods using clustering techniques // *European Journal of Engineering Research and Science*. 2017. vol. 2. no. 1. pp. 15–20.
38. *Fu K., Gong C., Gu I.Y.-H., Gu J.* Normalized cut-based saliency detection by adaptive multi-level region merging // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2015. vol. 24(12). pp. 5671–5683.
39. *Yi F., Moon I.* Image segmentation: A survey of graph-cut methods // *2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012)*. 2012.
40. *Hore S.* An Integrated Interactive Technique for Image Segmentation using Stack based Seeded Region Growing and Thresholding // *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2016. vol.6. no.6. pp. 2773–2780.
41. *Kumar N.* Thresholding in salient object detection: a survey // *Multimedia Tools and Applications*. 2017. vol. 77(15). pp. 19139–19170.
42. *Najman L., Schmitt M.* Watershed of a continuous function,” *Signal Processing*. 1994. vol. 38. no. 1. pp. 99–112.
43. *Zhu Y.P., Li P.* Survey on the Image Segmentation Algorithms // *Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference*. 2017. pp. 475–488.
44. *Amer G.M.H., Abushaala A.M.* Edge detection methods // *2015 2nd World Symposium on Web Applications and Networking (WSWAN)*. 2015. pp. 1–7.

45. *Li C. et al.* Image segmentation based on fuzzy clustering with cellular automata and features weighting // EURASIP Journal on Image and Video Processing. 2019(1).
46. *Abdel-Khalek S., Ben I.A., Omer O.A., Obada, A.-S.F.* A two-dimensional image segmentation method based on genetic algorithm and entropy // Optik. 2017. vol. 131. pp. 414–422.
47. *Guo Y., Liu Y., Georgiou T., Lew M.S.* A review of semantic segmentation using deep neural networks // International Journal of Multimedia Information Retrieval. 2017. vol. 7. no. 2. pp. 87–93.
48. *Tian Y. et al.* A fast incremental map segmentation algorithm based on spectral clustering and quadtree // Advances in Mechanical Engineering. 2018. vol. 10. no. 2. pp. 1687814018761296.
49. *Agus Z.A., Asosno A.* Image segmentation by histogram thresholding using hierarchical cluster analysis // Pattern Recognition Letters. 2006. vol. 27. pp. 1515–1521.
50. *Ward J.H.* Hierarchical grouping to optimize an objective function // J. Am. Stat. Assoc. 1963. vol. 58. no. 301. pp. 236–244.
51. *Khanykov I.G., Kharinov M.V.* Ward's pixel clustering for color image // GraphiCon-2017 – 27th International Conference on Computer Graphics and Vision. 2017. pp. 232–235.
52. *Khanykov I.G.* Technique for Acceleration of Classical Ward's Method for Clustering of Image Pixels // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2019. pp. 1–6.
53. *Mumford D., Shah J.* Boundary detection by minimizing functionals // Proceedings of IEEE Computer. 1985. pp. 22–26.
54. *Mumford D., Shah J.* Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems // Communications on pure and applied mathematics. 1989. vol. 42. no. 5. pp. 577–685.
55. *Харинов М.В., Ханьков И.Г.* Комбинированный метод улучшения сегментации изображения // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. 2015. № 9. С. 118–124.

Ненашев Вадим Александрович – канд. техн. наук, доцент, руководитель, лаборатория интеллектуальных технологий и моделирования сложных систем, кафедра вычислительных систем и сетей, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП). Область научных интересов: компьютерное моделирование, системы навигации и радиолокации, статистический анализ, комплексирование информации. Число научных публикаций – 50. nenashev@guar.ru; ул. Большая Морская, 67, 190000, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +78123947044.

Ханьков Игорь Георгиевич – младший научный сотрудник, лаборатория технологий больших данных социкиберфизических системах, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук». Область научных интересов: компьютерное зрение, разработка алгоритмов сегментации цифровых изображений. Число научных публикаций – 40. igk@iias.spb.su; 14 линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7812328191; факс: +78123284450.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00303).

V. NENASHEV, I. KHANYKOV

FORMATION OF A FUSED IMAGE OF THE LAND SURFACE BASED ON PIXEL CLUSTERING OF LOCATION IMAGES IN A MULTI-POSITION ONBOARD SYSTEM

Nenashev V., Khanykov I. Formation of a Fused Image of the Land Surface based on Pixel Clustering of Location Images in a Multi-position Onboard System.

Abstract. The paper proposes a method for fusing multi-angle images implementing the algorithm for quasi-optimal clustering of pixels to the original images of the land surface. The original multi-angle images formed by the onboard equipment of multi-positional location systems are docked into a single composite image and, using a high-speed algorithm for quasi-optimal pixel clustering, are reduced to several colors while maintaining characteristic boundaries. A feature of the algorithm of quasi-optimal pixel clustering is the generation of a series of partitions with gradually increasing detail due to a variable number of clusters. This feature allows you to choose an appropriate partition of a pair of docked images from the generated series.

The search for reference points of the isolated contours is performed on a pair of images from the selected partition of the docked image. A functional transformation is determined for these points. And after it has been applied to the original images, the degree of correlation of the fused image is estimated. Both the position of the reference points of the contour and the desired functional transformation itself are refined until the evaluation of the fusion quality is acceptable. The type of functional transformation is selected according to the images reduced in color, which later is applied to the original images. This process is repeated for clustered images with greater detail in the event that the assessment of the fusion quality is not acceptable. The purpose of present study is to develop a method that allows synthesizing fused image of the land surface from heteromorphic and heterogeneous images.

The paper presents the following features of the fusing method. The first feature is the processing of a single composite image from a pair of docked source images by the pixel clustering algorithm, what makes it possible to isolate the same areas in its different parts in a similar way. The second feature consists in determining the functional transformation by the isolated reference points of the contour on the processed pair of clustered images, which is later applied to the original images to combine them.

The paper presents the results on the synthesis of a fused image both from homogeneous (optical) images and from heterogeneous (radar and optical) images. A distinctive feature of the developed method is to improve the quality of synthesis, increase the accuracy and information content of the final fused image of the land surface.

Keywords: Pixel Clustering, Multi-angle Images, Synthesis of Fused Images, Location Onboard Systems, Full-dimension Images of the Land Surface, Reference Points on Contour, Information Integration, Unmanned Aerial Vehicle, Multi-position System

Nenashev Vadim – Ph.D., Professor, Head of Laboratory, Laboratory for Intelligent Technologies and Modeling of Complex Systems, Computer Systems and Networks Department, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Research interests: computer modeling, navigation and radar systems, statistical analysis, data fusion. The number of publications – 50. nenashev@guap.ru; 67, Bolshaya Morskaya str., 190000, St. Petersburg, Russia; office phone: +78123947044.

Khanykov Igor – Junior Researcher, Laboratory of Big Data Technologies for Sociocyber-Physical Systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. Research interests: computer vision, development of image segmentation algorithms. The number of publications – 40. igk@iias.spb.su; 39, 14 liniya V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7812328191; fax: +78123284450.

Acknowledgements. The reported study was funded by a grant of Russian Science Foundation (project № 19-79-00303).

References

1. Kim H.G., Park J.-S., Lee D.-H. Potential of Unmanned Aerial Sampling for Monitoring Insect Populations in Rice Fields. *Florida Entomol.* 2018. vol. 101. pp. 330–334.
2. Toro G.F., Tsourdos A. UAV sensors for environmental monitoring. Belgrade: MDPI. 2018. 661 p.
3. Sergeev A.M. et al. Discovering and Analyzing Binary Codes Based on Monocyclic Quasi-Orthogonal Matrices. *Smart Innovation, Systems and Technologies.* 2019. vol 143. pp. 113–123.
4. Kapranova E.A. et al. Distributed matrix methods of compression, masking and noise-resistant image encoding in a high-speed network of information exchange, information processing and aggregation. *SPIE Future Sensing Technologies.* 2019. pp. 111970T-1-111970T-7.
5. Shepeta A.P., Nenashev V.A. Modeling Algorithm for SAR Image Based on Fluctuations of Echo Signal of the Earth's Surface. *Proc. of SPIE Remote Sensing.* 2015. vol. 9642. pp. 96420X-1-96420X-8.
6. Klemm R. Novel Radar Techniques and Applications. Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar. Scitech Publishing. 2017. 951 p.
7. Chen K.-S. Principles of Synthetic Aperture Radar Imaging. A System Simulation Approach. CRC Press. 2016. 217 p.
8. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radio vision in the front viewing area of an airborne radar with a synthesized aperture of the antenna. *Radio Engineering.* 2004. vol. 1 pp. 47–49.
9. Shepeta A.P., Makhlin A.M., Nenashev V.A., Kryachko A.F. Performance of UWB Signal Detecting Circuits. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018. pp. 1–4.
10. Lombacher J., Hahn M., Dickmann J., Wöhler C. Object classification in radar using ensemble methods. 2017 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM). 2017. pp. 87–90.
11. Svinarsky M.V., Yarmolik S.N., Khramenkov A.S. Influence of the target observation angle on the efficiency of radar object classification. *Reports of the Belarusian state University of Informatics and Radioelectronics.* 2017. vol. 104. no. 2. pp. 31–38.
12. Klemm R. Novel Radar Techniques and Applications. Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion. Scitech Publishing. 2017. vol. 2. 553 p.
13. Fourati H. Multisensor Data Fusion: From Algorithms and Architectural Design to Applications. CRC Press. 2016. 639 p.
14. Khanykov I.G., Kharinov M.V., Patel C. Image Segmentation Improvement by Reversible Segment Merging. Int. Conf. on Soft Computing and its Engineering Applications, icSoftComp-2017, IEEE Gujarat Section Proceedings, at CHARUSAT. 2017.
15. Nenashev V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. The Problem of Determination of Coordinates of Unmanned Aerial Vehicles Using a Two-Position System Ground Radar. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). IEEE. 2018. pp. 256–280.

16. Nenashv V.A., Sentsov A.A., Shepeta A.P. Formation of Radar Image the Earth's Surface in the Front Zone Review Two-Position Systems Airborne Radar. 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2019. pp. 1–5.
17. Kapranova E.A., Nenashv V.A., Sergeev M.B. Compression and coding of images for satellite systems of Earth remote sensing based on quasi-orthogonal matrices. Proc. of SPIE, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV. 2018. vol. 10789. pp. 1078923-1–1078923-6.
18. Wang J., Wang Y. Modified SURF applied in Remote Sensing Image Stitching. School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology. Shijiazhuang. 2015. 256 p.
19. Sledevič T., Serackis A. SURF Algorithm Implementation on FPGA Department of Electronic Systems. Vilnius Gediminas Technical University. 2015. 76 p.
20. D'Addabbo A., Refice A., Francesco P. Lovergine, Guido Pasquariello «DAFNE: A Matlab toolbox for Bayesian multi-source remote sensing and ancillary data fusion, with application to flood mapping». *Computers & Geosciences*. 2018. vol. 112. pp. 64–75.
21. *Dabbiru L. et al.* Runway assessment via remote sensing. 1-4. 10.1109/AIPR.2015.7444545. 2015.
22. Seo D.K. et al. Fusion of SAR and Multispectral Images Using Random Forest Regression for Change Detection. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2018. vol. 7. 401 p.
23. Bigdeli B., Pahlavani P. High resolution multisensor fusion of SAR, optical and LiDAR data based on crisp vs. fuzzy and feature vs. decision ensemble systems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2016. vol. 52. pp. 126–136
24. Verdoliva L. et al. Optical-Driven Nonlocal SAR Despeckling. *Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015. pp. 314–318.
25. Kaplan G., Avdan U. Sentinel-1 and Sentinel-2 Data Fusion for Mapping and Monitoring Wetlands. Preprints 2018. 2018070244.
26. Dalla Mura M. et al. Challenges and Opportunities of Multimodality and Data Fusion in Remote Sensing. Proceedings of the IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2015. vol. 103(9). pp. 1585–1601.
27. Rajah P., Odindi J., Mutanga O. Feature level image fusion of optical imagery and Synthetic Aperture Radar (SAR) for invasive alien plant species detection and mapping». *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2018. vol. 10. pp. 198–208.
28. Shao Z., Fu H., Fu P., Yin L. Mapping Urban Impervious Surface by Fusing Optical and SAR Data at the Decision Level. *Remote Sens.* 2016. vol. 8(11). pp. 1–21.
29. Nsaibi M., Chaabane F. Image fusion of radar and optical remote sensing data for land cover classification. 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications. 2008. pp. 1–4.
30. Kedar M., Rege P.P. Wavelet Transform-Based Fusion of SAR and Multispectral Images. *Nanoelectronics, Circuits and Communication Systems. NCCS 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2018. vol. 642. pp. 256.
31. Tareen S.A.K., Saleem Z. A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK. 2018 International conference on computing, mathematics and engineering technologies (iCoMET). 2018. pp. 1–10.
32. Makarov A.S., Bolsunovskaya M.V. [Comparative analysis of methods for detecting special points in images at different lighting levels]. *Nauchno-tekhnickieskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika, telekommunikatsii i upravlenie – St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*. 2018. Issue 11. vol. 2. pp. 7–18. (in Russ.)
33. Efimov A.I. [Algorithm for step-by-step refinement of projective transformation for image alignment]. *Kompyuternaya optika – Computer optics*. 2016. Issue 40. vol. 2. pp. 258–265. (In Russ.).

34. Zaitoun N.M., Aqel M.J. Survey on Image Segmentation Techniques. *Procedia Computer Science*. 2015. vol. 65. pp. 797–806.
35. Jain S., Laxmi V. Color Image Segmentation Techniques: A Survey. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2017. pp. 189–197.
36. Vantaram S.R., Saber E. Survey of contemporary trends in color image segmentation. *Journal of Electronic Imaging*. 2012. vol. 21(4). pp. 248.
37. Dhanachandra N., Chanu Y.J. A survey on image segmentation methods using clustering techniques. *European Journal of Engineering Research and Science*. 2017. vol. 2. no. 1. pp. 15–20.
38. Fu K., Gong C., Gu I.Y.-H., Gu J. Normalized cut-based saliency detection by adaptive multi-level region merging. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2015. vol. 24(12). pp. 5671–5683.
39. Yi F., Moon I. Image segmentation: A survey of graph-cut methods. 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012). 2012.
40. Hore S. An Integrated Interactive Technique for Image Segmentation using Stack based Seeded Region Growing and Thresholding. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2016. vol.6. no.6. pp. 2773–2780.
41. Kumar N. Thresholding in salient object detection: a survey. *Multimedia Tools and Applications*. 2017. vol. 77(15). pp. 19139–19170.
42. Najman L., Schmitt M. Watershed of a continuous function. *Signal Processing*. 1994. vol. 38. no. 1. pp. 99–112.
43. Zhu Y.P., Li P. Survey on the Image Segmentation Algorithms // Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference. 2017. pp. 475–488.
44. Amer G.M.H., Abushaala A.M. Edge detection methods. 2015 2nd World Symposium on Web Applications and Networking (WSWAN). 2015. pp. 1–7.
45. Li C. et al. Image segmentation based on fuzzy clustering with cellular automata and features weighting. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. 2019(1).
46. Abdel-Khalek S., Ben I.A., Omer O.A., Obada, A.-S.F. A two-dimensional image segmentation method based on genetic algorithm and entropy. *Optik*. 2017. vol. 131. pp. 414–422.
47. Guo Y., Liu Y., Georgiou T., Lew M.S. A review of semantic segmentation using deep neural networks. *International Journal of Multimedia Information Retrieval*. 2017. vol. 7. no. 2. pp. 87–93.
48. Tian Y. et al. A fast incremental map segmentation algorithm based on spectral clustering and quadtree. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. vol. 10. no. 2. pp. 1687814018761296.
49. Agus Z.A., Asosno A. Image segmentation by histogram thresholding using hierarchical cluster analysis. *Pattern Recognition Letters*. 2006. vol. 27. pp. 1515–1521.
50. Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.* 1963. vol. 58. no. 301. pp. 236–244.
51. Khanykov I.G., Kharinov M.V. Ward's pixel clustering for color image. *GraphiCon-2017 – 27th International Conference on Computer Graphics and Vision*. 2017. pp. 232–235.
52. Khanykov I.G. Technique for Acceleration of Classical Ward's Method for Clustering of Image Pixels. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2019. pp. 1–6.
53. Mumford D., Shah J. Boundary detection by minimizing functionals. *Proceedings of IEEE Computer*. 1985. pp. 22–26.
54. Mumford D., Shah J. Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems. *Communications on pure and applied mathematics*. 1989. vol. 42. no. 5. pp. 577–685.
55. Kharinov M.V., Khanykov I.G. [The Combined Method of Improving Image Segmentation]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika, informatika – BSU bulletin. Mathematics, Informatics*. 2015. vol. 9. pp. 118–124. (In Russ.).

В.Н. ЯКИМОВ
**ПЕРИОДОГРАММНАЯ ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНОЙ
ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ БИНАРНО-
ЗНАКОВОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО КВАНТОВАНИЯ
СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОКОННЫХ ФУНКЦИЙ**

Якимов В.Н. Периодограммная оценка спектральной плотности мощности на основе бинарно-знакового стохастического квантования сигналов с использованием оконных функций.

Аннотация. Спектральный анализ сигналов используется как один из основных методов исследования систем и объектов различной физической природы. В условиях статистической неопределенности сигналы подвергаются случайным изменениям и зашумлениям. Анализ таких сигналов приводит к необходимости оценивания спектральной плотности мощности (СПМ). На практике для её оценивания широко используется периодограммный метод. Основу цифровых алгоритмов, реализующих этот метод, составляет дискретное преобразование Фурье. В этих алгоритмах операции цифрового умножения являются массовыми операциями. Применение оконных функций ведет к увеличению числа этих операций. Операции умножения относятся к наиболее трудоемким операциям. Они являются доминирующим фактором при определении вычислительных возможностей алгоритма и определяют его мультипликативную сложность.

В статье рассматривается задача снижения мультипликативной сложности вычисления периодограммной оценки СПМ с применением оконных функций. Задача решается на основе использования бинарно-знакового стохастического квантования для преобразования сигнала в цифровую форму. Такое двухуровневое квантование сигналов осуществляется без систематической погрешности. На основе теории дискретно-событийного моделирования, результат бинарно-знакового стохастического квантования во времени рассматривается как хронологическая последовательность существенных событий, определяемых сменой его значений. Использование дискретно-событийной модели для результата бинарно-знакового стохастического квантования обеспечило аналитическое вычисление операций интегрирования при переходе от аналоговой формы периодограммной оценки СПМ к математическим процедурам ее вычисления в дискретном виде. Эти процедуры стали основой для разработки цифрового алгоритма. Основными вычислительными операциями алгоритма являются арифметические операции сложения и вычитания. Уменьшение количества операций умножения снижает общую вычислительную трудоемкость оценивания СПМ. С целью исследования работы алгоритма были проведены численные эксперименты. Они осуществлялись на основе имитационного моделирования дискретно-событийной процедуры бинарно-знакового стохастического квантования. В качестве примера приведены результаты вычисления оценок СПМ с применением ряда наиболее известных оконных функций. Полученные результаты свидетельствуют, что использование разработанного алгоритма позволяет вычислять периодограммные оценки СПМ с высокой точностью и частотным разрешением в условиях присутствия аддитивного белого шума при низком отношении сигнал/шум. Практическая реализация алгоритма осуществлена в виде функционально самостоятельного программного модуля. Данный модуль может использоваться как отдельный компонент в составе комплексного метрологически значимого программного обеспечения для оперативного анализа частотного состава сложных сигналов.

Ключевые слова: спектральная плотность мощности, периодограммная оценка, бинарное стохастическое квантование, оконная функция, отсчет времени

1. Введение. Во многих случаях спектральный анализ сигналов рассматривается как основной метод проведения прикладных и экспериментальных исследований в самых разных областях современной науки и техники. Анализ частотного состава сигналов позволяет получить достоверную информацию о скрытых периодичностях, повторяющихся процессах, рабочем состоянии функциональных элементов технических систем и объектов различной физической природы. В частности это касается акустики, гидролокации, вибродиагностики, радиочастотной идентификации и др.

Математическую основу спектрального анализа составляет разложение непрерывного сигнала на составляющие его частотные компоненты в системе базисных гармонических функций на некотором диапазоне частот. Такое разложение предоставляет возможность исследовать частотные характеристики сигнала в пределах заданного диапазона частот. В условиях априорной статистической неопределенности, когда имеет место влияние неконтролируемых возмущающих факторов, параметры сигналов подвергаются случайным изменениям и зашумлению. При наличии данных обстоятельств динамика поведения сигналов не может быть точно предсказана во времени, и их обработка требует применения статистических подходов, направленных на получение оценок средних значений частотно-временных характеристик. При этом мощность наблюдаемого сигнала может быть представлена как непрерывная функция частоты. Анализ частотного состава таких сигналов приводит к необходимости оценивания спектральной плотности мощности (СПМ). Данный вид оценки частотного спектра позволяет получить представление о средней мощности сигнала и ее распределении по частотам в пределах полосы частот, имеющей практический интерес для исследователей [1].

На практике для оценивания СПМ широко используется периодограммный метод. Вычисление периодограммной оценки СПМ представляет собой классический подход к спектральному анализу. Он позволяет оценить непрерывный частотный спектр и идентифицировать наличие гармонических составляющих в составе сложного многокомпонентного сигнала по одной его реализации при допущении, что этот сигнал удовлетворяет условиям стационарности и эргодичности во времени [2, 3].

Согласно периодограммному методу, оценка СПМ осуществляется на конечном интервале времени на основе финитного преобразования Фурье центрированной, т.е. со средним значением равным нулю, реализации исследуемого сигнала. При этом с целью улучшения оценок СПМ применяется обработка сигналов с использованием

временных весовых функций, именуемых оконными функциями. Такая операция получила название оконного взвешивания. Выполнение операции оконного взвешивания направлено на уменьшение эффекта искажения и размывания оценок спектральных составляющих, обусловленного появлением боковых лепестков относительно основных частотных компонент из-за ограниченности времени анализа сигнала. С учетом оконных функций финитное преобразование Фурье вычисляется следующим образом [4]:

$$F_x(j2\pi f, T) = \int_0^T w(t) \overset{\circ}{x}(t) \exp(-j2\pi ft) dt, \quad (1)$$

где $\overset{\circ}{x}(t)$ – центрированная реализация исследуемого сигнала $X(t)$; $w(t)$ – оконная функция; T – длительность сегмента реализации сигнала, подвергаемого спектральному анализу.

Отметим, что для сигнала, имеющего постоянную составляющую, его центрированная реализация всегда может быть получена путем предварительной фильтрации и удаления среднего значения.

Статистическое усреднение по времени квадрата модуля финитного преобразования Фурье (1) обеспечивает получение периодограммной оценки СПМ следующего вида:

$$\hat{S}_{xx}(f) = \frac{1}{TW} |F_x(j2\pi f, T)|^2. \quad (2)$$

В (2) нормирующий множитель W характеризует среднюю мощность оконной функции и предназначен для корректировки спектральной оценки. Он устраняет эффект влияния мощности оконной функции на смещение в оценке СПМ вследствие выполнения операции взвешивания сигнала и равен:

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T w^2(t) dt. \quad (3)$$

В настоящее время предпочтение отдается спектральному анализу сигналов в дискретном виде. Этому способствовали преимущества цифровой обработки сигналов. Во-первых, современный уровень разви-

тия средств вычислительной техники и программной инженерии позволяет создавать высокотехнологичные аппаратно-программные системы, реализующие сложные в вычислительном отношении алгоритмы обработки сигналов. Во-вторых, цифровая обработка сигналов может эффективно обеспечить воспроизводимость, повторяемость и точность выполнения вычислительных процессов.

Поскольку цифровой спектральный анализ по своей сути является методом цифровой обработки сигналов, то конкретная реализация периодограммного метода оценивания СПМ в виде цифрового алгоритма зависит от используемого подхода к первичному преобразованию и представлению исследуемого сигнала в цифровой форме. Важным является также и то, каким образом осуществляется переход от аналоговых операций к дискретным процедурам обработки числовых отсчетов сигнала, так как это во многом определяет вычислительные свойства цифрового алгоритма.

Используемые на практике цифровые алгоритмы для вычисления периодограммной оценки СПМ традиционно разработаны на основе математического аппарата дискретного преобразования Фурье, предполагающего равномерную дискретизацию по времени анализируемого сигнала [1-3, 5]. При этом операция интегрирования при переходе к вычислениям в дискретном виде реализуется численным методом, основанном на понятии «интегральных сумм» [6, 7]. Полученные таким образом цифровые алгоритмы оценивания СПМ требуют выполнения значительного объема вычисленных операций. Одной из массовых арифметических операций в таких алгоритмах является операция цифрового умножения. К увеличению числа операций цифрового умножения приводит и применение оконных функций. Это объясняется тем, что необходимо выполнять процедуру взвешивания отсчетов анализируемого сигнала с отсчетами оконной функции в дискретном виде. Как известно, операции цифрового умножения являются наиболее трудоемкими вычислительными операциями. Они являются доминирующим фактором при определении времени выполнения алгоритма. Вычислительную сложность алгоритмов в зависимости от числа операций умножений называют мультипликативной сложностью. При выборе цифрового алгоритма практический интерес во многом представляет именно его мультипликативная сложность [8]. Использование алгоритмов, требующих многократного выполнения операций цифрового умножения, может привести к существенным временным затратам. Следствием этого является снижение оперативности вычисления оценок СПМ.

Повышение вычислительной эффективности цифровой обработки сигналов является активной областью современных исследований. На

практике решение этой проблемы обычно осуществляется четырьмя основными способами [9-13]. Во-первых, применяется прямой технологический способ увеличения скорости выполнения программной обработки данных, который заключается в повышении общей производительности технических средств, осуществляющих вычислительные процессы. Естественно, с увеличением компьютерной мощности скорость обработки числовых данных увеличивается. Однако при этом менее трудоемкие в вычислительном отношении алгоритмы обеспечат более высокую эффективность цифровой обработки данных. Во-вторых, разработчики вычислительных алгоритмов осуществляют специальную предварительную подготовку исходных данных в виде комбинационных схем и упорядоченных алгебраических структур. Здесь разработчикам алгоритмов приходится дополнительно решать задачи, связанные с минимизацией, декомпозицией, структурной оптимизацией множеств данных и другие. В-третьих, ускорение вычислительного процесса происходит путем поэтапного рефакторинга, приводящего к улучшению и упрощению структурной организации программного кода при строгом соблюдении условия сохранения его функционального назначения. В-четвертых, применяются различные методы для выполнения высокоуровневой и низкоуровневой оптимизации программного кода. В частности, отдельные модули или критические секции программного кода разрабатывают на ассемблере, что обеспечивает быстрый доступ к системным компонентам в составе вычислительных устройств и обмен данными между ними. Однако оптимизация программного кода (особенно это касается метрологически значимых модулей) может привести к ограничению его функционального назначения, а в некоторых случаях даже ограничить область возможного применения.

По большому счету ни один из перечисленных способов не позволяет кардинально решить проблему повышения эффективности вычислительных операций при цифровой обработке сигналов. Это можно объяснить тем, что вычислительные процедуры, прежде всего, будут определяться математической моделью решения задачи в дискретном виде. Именно математическая модель будет определять организационную структуру вычислительного алгоритма, подготовку и формат данных, подлежащих цифровой обработке, а также логику и порядок дискретных операций в процессе их обработки.

Из вышесказанного следует, что разработка на основе периодограммного метода математического обеспечения и синтез советуемого ему алгоритмического обеспечения, практическая реализация которого приводила бы к экономии вычислительных затрат и упрощению цифровых процедур обработки сигналов в процессе

оценки СПМ, является актуальной задачей. При этом решение данной задачи должно обеспечивать получение оценок СПМ с необходимой точностью и частотным разрешением.

2. Разработка математического обеспечения для периодограммной оценки СПМ на основе бинарно-знакового стохастического квантования сигнала. Процедуру представления непрерывных сигналов в дискретном виде разработчики цифровых алгоритмов традиционно рассматривают как самостоятельное действие, которое определено уже самой постановкой задачи перехода к обработке сигналов в числовом виде. При этом не учитывается тот факт, что такое преобразование может оказать существенное влияние на сложность разрабатываемого математического обеспечения и организацию алгоритма выполнения вычислительных процедур. Как правило, априори принимается тот факт, что подготовка к цифровой обработке массивов числовых данных осуществляется с использованием классического аналого-цифрового преобразования, когда осуществляются относительно взаимно независимые процедуры дискретизации сигнала с равномерным шагом по времени и многоуровневое квантование дискретных отсчетов. Основное требование, предъявляемое к такому аналого-цифровому преобразованию, заключается в обеспечении заданной точности и стабильности числового кодирования дискретных значений сигнала во всем динамическом диапазоне его изменения. Однако, в случае низкого разрешения по уровню, погрешность квантования будет сильно зависеть от частотно-временных свойств сигнала, что в конечном итоге проявится в виде искажения результата формирования его числовых отсчетов. При этом шум квантования может стать доминирующим над другими источниками шумов [14, 15].

В рабочих условиях проведения спектрального анализа (особенно это касается ситуаций с высокой степенью неопределенности) возникновение любых факторов, приводящих к искажению результата квантования, может стать причиной уменьшения динамического диапазона преобразования, что неизбежно приведет к увеличению неопределенности числовых значений отсчетов.

Как правило, на практике точность оцифровки сигнала обеспечивается за счет увеличения числа уровней квантования. Следствием этого является увеличение разрядности цифровых отсчетов сигнала. Такой подход приводит к тому, что в процессе выполнения обработки с использованием дискретного преобразования Фурье полученных таким образом числовых отсчетов увеличиваются затраты времени на вычисление оценок СПМ, что объясняется необходимостью выполнения операций многоуровневого цифрового умножения. В результате снижается оперативность цифрового

спектрального анализа. Отсюда следует, что представление непрерывного сигнала в дискретном виде следует рассматривать как первичный этап его обработки в ходе проведения цифрового спектрального анализа. При этом следует учитывать, что выбор способа такого представления и его математическая модель во многом определяют структурную композицию алгоритма последующей обработки получаемых данных и вычислительную эффективность его выполнения [16].

С целью улучшения вычислительных характеристик цифровых алгоритмов для представления сигналов в цифровой код используют подходы, основанные на их бинарном (двоичном) квантовании по уровню [17-25]. При этом наибольшая эффективность бинарного квантования может быть достигнута за счет рандомизации (искусственного зашумления) процедуры аналого-цифрового преобразования. С учетом теории статистического оценивания основу такого подхода составляет целенаправленное добавление к анализируемому сигналу однородного с ним искусственно сгенерированного вспомогательного случайного сигнала с известным законом распределения, рандомизирующего процесс квантования [26]. В этом случае статистические характеристики результата аналого-цифрового преобразования будут определяться вероятностными свойствами рандомизирующего сигнала. Принимая во внимание данное обстоятельство, для преобразования сигнала в цифровой код будем использовать бинарно-знаковое стохастическое квантование [27-30]. Результат такого квантования может быть представлен двумя значениями:

$$z(t) = \begin{cases} -1, & \overset{o}{x}(t) + \xi(t) < 0; \\ +1, & \overset{o}{x}(t) + \xi(t) \geq 0; \end{cases} \quad (4)$$

где $\xi(t)$ – вспомогательный рандомизирующий случайный сигнал.

С математической точки зрения данный вид бинарно-знакового стохастического квантования является достаточно простой процедурой. Его техническая реализация также не представляет особых трудностей по сравнению с многоуровневым квантованием. При этом оно обеспечивает выполнение двухуровневого грубого квантования непрерывных сигналов без систематической погрешности [27-29]. Формально в результате такого квантования получаем непрерывный двухуровневый сигнал со значениями -1 и $+1$.

В (4) вспомогательный случайный сигнал $\xi(t)$, выполняющий функцию рандомизации, фактически является стохастическим порогом

квантования. Этот сигнал, будучи однородным с анализируемым сигналом, имеет симметричную равномерную плотность распределения в пределах от $-\xi_{\max}$ до $+\xi_{\max}$, где $\xi_{\max} \geq |x(t)|_{\max}$. Здесь $|x(t)|_{\max}$ представляет собой максимально возможное по абсолютной величине значение, которое с высокой степенью вероятности, близкой к единице, может принять подвергаемая квантованию центрированная реализация сигнала на ограниченном интервале времени анализа.

В результате перехода к бинарно-знаковому стохастическому квантованию оценку СПМ будем искать в следующем виде:

$$\hat{S}_{XX}(f) = \frac{\xi_{\max}^2}{TW} \left| \int_0^T w(t)z(t) \exp(-j2\pi ft) dt \right|^2. \quad (5)$$

В (5) для интегрального преобразования введем обозначение:

$$A_{ZZ}(j2\pi f) = \int_0^T w(t)z(t) \exp(-j2\pi ft) dt. \quad (6)$$

Тогда получаем:

$$\hat{S}_{XX}(f) = \frac{\xi_{\max}^2}{TW} |A_{ZZ}(j2\pi f)|^2. \quad (7)$$

В (6) одним из сомножителей подынтегрального выражения является экспоненциальная функция с комплексным показателем. Используя формулу Эйлера, которая связывает комплексную экспоненту с тригонометрическими функциями, представим $A_{ZZ}(j2\pi f)$ как сумму действительной и мнимой частей:

$$A_{ZZ}(j2\pi f) = \operatorname{Re} [A_{ZZ}(j2\pi f)] - j \operatorname{Im} [A_{ZZ}(j2\pi f)], \quad (8)$$

где

$$\operatorname{Re} [A_{ZZ}(j2\pi f)] = \int_0^T z(t)w(t) \cos 2\pi f t dt, \quad (9)$$

$$\operatorname{Im} [A_{ZZ}(j2\pi f)] = \int_0^T z(t)w(t) \sin 2\pi f t dt. \quad (10)$$

Принимая во внимание (8), оценка СПИМ будет равна:

$$\hat{S}_{XX}(f) = \frac{\xi_{\max}^2}{TW} \left(\operatorname{Re}^2 [A_{ZZ}(j2\pi f)] + \operatorname{Im}^2 [A_{ZZ}(j2\pi f)] \right). \quad (11)$$

Согласно тригонометрическим формулам приведения будет справедливо равенство:

$$\sin 2\pi ft = \cos(2\pi ft - \pi/2). \quad (12)$$

С учетом (12) для (9) и (10) получаем обобщенное выражение:

$$B_{ZZ}(f, \varphi_0) = \int_0^T w(t)z(t)\cos(2\pi ft - \varphi_0)dt. \quad (13)$$

В (13) $\varphi_0 = 0$ или $\varphi_0 = \pi/2$. В соответствии с этим имеем:

$$\operatorname{Re} [A_{ZZ}(j2\pi f)] = B_{ZZ}(f, \varphi_0 = 0), \quad (14)$$

$$\operatorname{Im} [A_{ZZ}(j2\pi f)] = B_{ZZ}(f, \varphi_0 = \pi/2). \quad (15)$$

С учетом (14) и (15) для (11) получаем:

$$\hat{S}_{XX}(f) = \frac{\xi_{\max}^2}{TW} \left(B_{ZZ}^2(f, \varphi_0 = 0) + B_{ZZ}^2(f, \varphi_0 = \pi/2) \right). \quad (16)$$

Введем в рассмотрение функцию:

$$h(t, f, \varphi_0) = w(t)\cos(2\pi ft - \varphi_0). \quad (17)$$

Тогда (13) примет вид:

$$B_{ZZ}(f, \varphi_0) = \int_0^T z(t)h(t, f, \varphi_0)dt. \quad (18)$$

Как было отмечено выше, для бинарно-знакового стохастического квантования (4) имеем результат $z(t)$, который можно интерпрети-

ровать во времени как непрерывный двухуровневый сигнал со значениями -1 и $+1$. Смена этих значений во времени происходит последовательно, и исключена вероятность одновременного наступления моментов времени такой смены. Принимая это во внимание и основываясь на теории дискретно-событийного моделирования, процесс смены значений $z(t)$ во времени можно рассматривать как хронологическую последовательность существенных событий в ходе выполнения процедуры квантования. При этом интервалы между двумя последовательными такими событиями можно интерпретировать как время ожидания [31-35]. Исходя из этого, получена математическая модель для дискретно-временного представления $z(t)$ [29, 30]. В соответствии с этой моделью, если известно значение $z(t_0)$, где $t_0 = 0$ начальный момент времени квантования, то для представления $z(t)$ в цифровом виде в пределах интервала времени анализа $0 \leq t \leq T$ достаточно знать множество отсчетов времени $\{t_i^z : 1 \leq i \leq I-1\}$, в которые происходит смена его значений на этом интервале. При этом $t_0^z = t_0 = 0$ и $t_I^z = T$.

В (18) интервал интегрирования с пределами от нуля до T представим в виде множества подынтервалов с границами t_i^z и t_{i+1}^z . В пределах каждого из них имеем $z(t) = -1$ или $z(t) = +1$. С учетом этого интеграл в (18) по переменной t запишем как сумму интегралов:

$$B_{ZZ}(f, \varphi_0) = z(t_0) \sum_{i=0}^{I-1} (-1)^i \int_{t_i^z}^{t_{i+1}^z} h(t, f, \varphi_0) dt. \quad (19)$$

Примем во внимание теорему о непрерывности монотонной функции. Если две функции являются непрерывными и определены на одном и том же интервале, то непрерывной будет и функция, представляющая собой произведение этих функций на этом интервале. В свою очередь, если две функции интегрируемы на некотором интервале, то их произведение также интегрируемо [36]. В соответствии с этим из (17) следует, что для оконной функции $w(t)$, которая является непрерывной и интегрируемой на интервале времени $0 \leq t \leq T$, функция $h(t, f, \varphi_0)$ также будет непрерывной и интегрируемой функцией времени на этом же интервале. Отсюда следует, что существует такая непрерывная во времени функция $H(t, f, \varphi_0)$, которая является первообразной для функции $h(t, f, \varphi_0)$, и

для которой на интервале времени $0 \leq t \leq T$ выполняется условие дифференцируемости по переменной времени. Это означает, что такая функция $H(t, f, \varphi_0)$ имеет в любой точке интервала $0 \leq t \leq T$ производную по t , и при этом будет справедливо равенство [36]:

$$dH(t, f, \varphi_0) = h(t, f, \varphi_0) dt. \quad (20)$$

С учетом (20) после интегрирования по t будем иметь:

$$B_{ZZ}(f, \varphi_0) = z(t_0) \sum_{i=0}^I (-1)^{i+1} \lambda_i H(t_i^z, f, \varphi_0), \quad (21)$$

где $\lambda_i = 1$ для $i = 0$ и $i = I$; если $i \in [1, I-1]$, то $\lambda_i = 2$.

Отметим, что $z^2(t_0) = 1$. Исходя из этого, получаем:

$$B_{ZZ}^2(f, \varphi_0) = D_{ZZ}^2(f, \varphi_0), \quad (22)$$

$$D_{ZZ}(f, \varphi_0) = C(f, \varphi_0) + G(f, \varphi_0), \quad (23)$$

$$C(f, \varphi_0) = H(0, f, \varphi_0) + (-1)^I H(T, f, \varphi_0), \quad (24)$$

$$G(f, \varphi_0) = 2 \sum_{i=1}^{I-1} (-1)^i H(t_i^z, f, \varphi_0), \quad (25)$$

Соотношения (22)-(25) свидетельствуют, что нет необходимости знать даже одно начальное значение $z(t_0)$ результата бинарно-знакового стохастического квантования. Достаточно знать только множество отсчетов времени $\{t_i^z : 1 \leq i \leq I-1\}$, в которые происходит смена его значений на интервале времени анализа $0 \leq t \leq T$.

Примем во внимание (22). Тогда оценка СПМ (16) будет равна:

$$\hat{S}_{XX}(f) = \frac{\xi_{\max}^2}{TW} \left(D_{ZZ}^2(f, \varphi_0 = 0) + D_{ZZ}^2(f, \varphi_0 = \pi/2) \right). \quad (26)$$

Соотношение (26) с учетом промежуточных вычислений величин $C(f, \varphi_0)$, $G(f, \varphi_0)$ и $D_{ZZ}(f, \varphi_0)$ для $\varphi_0 = 0$ и $\varphi_0 = \pi/2$, определенных

соотношениями (23)-(25), обеспечивает вычисление с разрешением по частоте $\Delta f = 1/T$ оценок СПМ на частотах $f_k = k\Delta f$.

На практике для вычисления оценок СПМ с использованием соотношений (23)-(26) необходимо иметь численные значения отсчетов времени $\{t_i^z : 1 \leq i \leq I-1\}$. Получить численные оценки этих отсчетов можно на основе классического метода измерения длительности временных интервалов. Согласно этому методу, для получения оценки числового значения интервала времени с заданной точностью используются тактовые импульсы с образцовой частотой следования f_0 . Тогда $t_i^z = \eta_i^z \Delta t$, где $\Delta t = 1/f_0$. В соответствии с этим будем иметь множество отсчетов $\{\eta_i^z : 1 \leq i \leq I-1\}$, представляющих собой возрастающую последовательность целых чисел. Для t_0 и T соответственно будем иметь $\eta_0 = \eta_0^z = 0$ и $T = N\Delta t$. При этом $N = \eta_I^z$, $\Delta f = 1/N\Delta t$ и $f_k = k/N\Delta t$. В результате такого целочисленного представления отсчетов времени для (23)-(26) получаем:

$$\hat{S}_{XX}(f_k) = \xi_{\max}^2 \frac{\Delta f}{W} \left(D_{ZZ}^2(f_k, \varphi_0 = 0) + D_{ZZ}^2(f_k, \varphi_0 = \pi/2) \right), \quad (27)$$

$$D_{ZZ}(f_k, \varphi_0) = C(f_k, \varphi_0) + G(f_k, \varphi_0), \quad (28)$$

$$C(f_k, \varphi_0) = H(0, f_k, \varphi_0) + (-1)^I H(N, f_k, \varphi_0), \quad (29)$$

$$G(f_k, \varphi_0) = 2 \sum_{i=1}^{I-1} (-1)^i H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0). \quad (30)$$

Соотношения (27)-(30) определяют в математической форме структурную организацию и последовательность выполнения вычислительных процедур для получения оценок $\hat{S}_{XX}(f_k)$ в цифровом виде. Отметим, что вычисление оценок СПМ осуществляется на дискретных частотах $f_k = k\Delta f$ с максимально возможным частотным разрешением $\Delta f = 1/N\Delta t$, что определяется длительностью анализируемой реализации сигнала. Из (28)-(30) также следует, что основу математических

процедур вычисления оценок $\hat{S}_{XX}(f_k)$ составляют логические операции, определяющие организацию выполнения последовательности действий, и простые арифметические операции сложения и вычитания, которые должны выполняться в ходе обработки дискретных значений $H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0)$, где $\varphi_0 = 0$ и $\varphi_0 = \pi/2$.

3. Примеры функций $H(t, f, \varphi_0)$ для наиболее известных и применяемых классических оконных функций. В процессе проведения спектрального анализа необходимо понимать, что ни одна из оконных функций не является лучшей по всем своим свойствам. В каждом конкретном случае ее следует выбирать, учитывая требования пользователя и условия проведения спектрального анализа. В [37-39] подробно рассмотрены свойства и представлен сравнительный анализ оконных функций с точки зрения их частотных и метрологических характеристик. В данном разделе в качестве примера и для лучшего понимания организации вычислительных процедур приведены функции $H(t, f, \varphi_0)$ для ряда наиболее известных и применяемых на практике при спектральном анализе классических оконных функций. Здесь также для этих функций приведены дискретные по времени и частоте функции $H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0)$ и их значения $H(0, f_k, \varphi_0)$ и $H(N, f_k, \varphi_0)$ для $\varphi_0 = 0$ и $\varphi_0 = \pi/2$.

1) Естественное (прямоугольное) окно:

$$w(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T; \\ 0, & |t| > T. \end{cases} \quad (31)$$

$$H(t, f, \varphi_0) = \frac{\sin(2\pi ft - \varphi_0)}{2\pi f};$$

$$H(t, f, \varphi_0 = 0) = \frac{\sin 2\pi ft}{2\pi f}; \quad H(t, f, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{\cos 2\pi ft}{2\pi f};$$

$$H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0 = 0) = \frac{1}{2\pi k \Delta f} \sin \frac{2\pi k}{N} \eta_i^z;$$

$$H(0, f_k, \varphi_0 = 0) = 0; \quad H(N, f_k, \varphi_0 = 0) = 0;$$

$$H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{1}{2\pi k \Delta f} \cos \frac{2\pi k}{N} \eta_i^z;$$

$$H(0, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{1}{2\pi k \Delta f}; \quad H(N, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{1}{2\pi k \Delta f}.$$

2) Треугольное (Барлетта) окно:

$$w(t) = \begin{cases} 1 - \frac{|t|}{T}, & |t| \leq T; \\ 0, & |t| > T. \end{cases} \quad (32)$$

$$H(t, f, \varphi_0) = \left(1 - \frac{t}{T}\right) \frac{\sin(2\pi f t - \varphi_0)}{2\pi f} - \frac{1}{T} \frac{\cos(2\pi f t - \varphi_0)}{(2\pi f)^2};$$

$$H(t, f, \varphi_0 = 0) = \left(1 - \frac{t}{T}\right) \frac{\sin 2\pi f t}{2\pi f} - \frac{1}{T} \frac{\cos 2\pi f t}{(2\pi f)^2};$$

$$H(t, f, \varphi_0 = \pi/2) = -\left(1 - \frac{t}{T}\right) \frac{\cos 2\pi f t}{2\pi f} - \frac{1}{T} \frac{\sin 2\pi f t}{(2\pi f)^2};$$

$$H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0 = 0) = \frac{1}{2\pi k \Delta f} \left(\left(1 - \frac{\eta_i^z}{N}\right) \sin \frac{2\pi k}{N} \eta_i^z - \frac{1}{2\pi k} \cos \frac{2\pi k}{N} \eta_i^z \right);$$

$$H(0, f_k, \varphi_0 = 0) = -\frac{1}{(2\pi k)^2 \Delta f}; \quad H(N, f_k, \varphi_0 = 0) = -\frac{1}{(2\pi k)^2 \Delta f};$$

$$H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{1}{2\pi k \Delta f} \left(\left(1 - \frac{\eta_i^z}{N}\right) \cos \frac{2\pi k}{N} \eta_i^z + \frac{1}{2\pi k} \sin \frac{2\pi k}{N} \eta_i^z \right);$$

$$H(0, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{1}{2\pi k \Delta f}; \quad H(N, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = 0.$$

3) Косинусное окно:

$$w(t) = \begin{cases} \cos \frac{\pi t}{2T}, & |t| \leq T; \\ 0, & |t| > T. \end{cases} \quad (33)$$

$$H(t, f, \varphi_0) = \frac{\sin(0,5\pi(4f - \Delta f)t - \varphi_0)}{\pi(4f - \Delta f)} + \frac{\sin(0,5\pi(4f + \Delta f)t - \varphi_0)}{\pi(4f + \Delta f)};$$

$$H(t, f, \varphi_0 = 0) = \frac{\sin 0,5\pi(4f - \Delta f)t}{\pi(4f - \Delta f)} + \frac{\sin 0,5\pi(4f + \Delta f)t}{\pi(4f + \Delta f)};$$

$$H(t, f, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{\cos 0,5\pi(4f - \Delta f)t}{\pi(4f - \Delta f)} - \frac{\cos 0,5\pi(4f + \Delta f)t}{\pi(4f + \Delta f)};$$

$$H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0 = 0) = \frac{1}{\pi\Delta f} \left(\frac{\sin \frac{\pi(4k-1)}{2N} \eta_i^z}{4k-1} + \frac{\sin \frac{\pi(4k+1)}{2N} \eta_i^z}{4k+1} \right);$$

$$H(0, f_k, \varphi_0 = 0) = 0; \quad H(N, f_k, \varphi_0 = 0) = -\frac{1}{\pi\Delta f} \frac{2}{16k^2 - 1};$$

$$H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{1}{\pi\Delta f} \left(\frac{\cos \frac{\pi(4k-1)}{2N} \eta_i^z}{4k-1} + \frac{\cos \frac{\pi(4k+1)}{2N} \eta_i^z}{4k+1} \right);$$

$$H(0, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{1}{\pi\Delta f} \frac{8k}{16k^2 - 1}; \quad H(N, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = 0.$$

4) Окна Хана, Хэмминга, Блэкмана и Наттолла. Обобщенная математическая форма оконных функций этого семейства определяется в виде суммы косинусов:

$$w(t) = \begin{cases} a_0 + \sum_{n=1}^M a_n \cos \frac{n\pi t}{T}, & |t| \leq T; \\ 0, & |t| > T. \end{cases} \quad (34)$$

$$H(t, f, \varphi_0) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^M a_n \left(\frac{\sin(\pi(2f - n\Delta f)t - \varphi_0)}{2f - n\Delta f} + \frac{\sin(\pi(2f + n\Delta f)t - \varphi_0)}{2f + n\Delta f} \right);$$

$$H(t, f, \varphi_0 = 0) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^M a_n \left(\frac{\sin \pi(2f - n\Delta f)t}{2f - n\Delta f} + \frac{\sin \pi(2f + n\Delta f)t}{2f + n\Delta f} \right);$$

$$H(t, f, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^M a_n \left(\frac{\cos \pi(2f - n\Delta f)t}{2f - n\Delta f} + \frac{\cos \pi(2f + n\Delta f)t}{2f + n\Delta f} \right);$$

$$H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0 = 0) = \frac{1}{2\pi\Delta f} \sum_{n=0}^M a_n \left(\frac{\sin \pi \frac{2k-n}{N} \eta_i^z}{2k-n} + \frac{\sin \pi \frac{2k+n}{N} \eta_i^z}{2k+n} \right);$$

$$H(0, f_k, \varphi_0 = 0) = 0; \quad H(N, f_k, \varphi_0 = 0) = 0;$$

$$H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{1}{2\pi\Delta f} \sum_{n=0}^M a_n \left(\frac{\cos \pi \frac{2k-n}{N} \eta_i^z}{2k-n} + \frac{\cos \pi \frac{2k+n}{N} \eta_i^z}{2k+n} \right);$$

$$H(0, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{2k}{\pi\Delta f} \sum_{n=0}^M \frac{a_n}{4k^2 - n^2};$$

$$H(N, f_k, \varphi_0 = \pi/2) = -\frac{2k}{\pi\Delta f} \sum_{n=0}^M (-1)^n \frac{a_n}{4k^2 - n^2}.$$

Значения коэффициентов a_n для окон Хана, Хэмминга, Блэкмана и Наттолла представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов a_n для окон Хана, Хэмминга, Блэкмана и Наттолла

Окно	M	a_0	a_1	a_2	a_3
Хана	1	0,5	0,5	-	-
Хэмминга	1	0,54	0,46	-	-
Блэкмана	2	0,42	0,5	0,08	-
Наттолла	3	0,355768	0,487396	0,144232	0,012604

4. Постановка и результаты численных экспериментов. Соотношения (27)-(30) положены в основу разработки алгоритмического обеспечения для вычисления периодограммной оценки СПМ в дискретном виде. На рисунке 1 представлена упрощенная схема алгоритма, определяющего последовательность выполнения основных действий, реализующих эти соотношения.

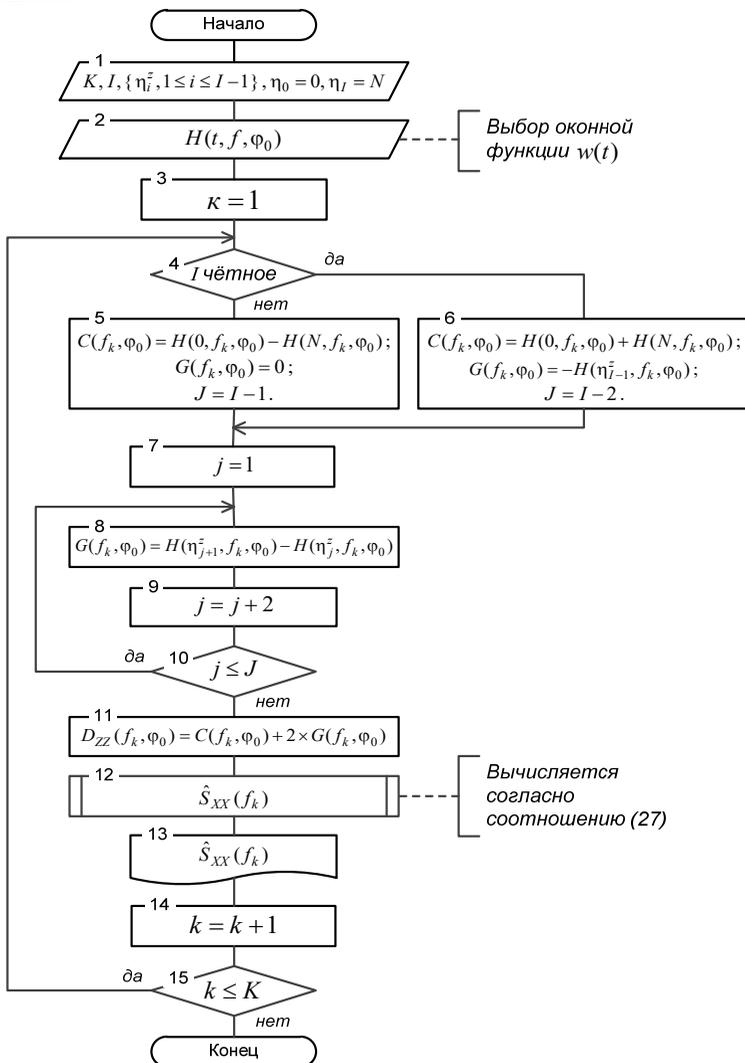


Рис. 1. Краткая запись схемы алгоритма вычисления оценок СПМ

Практическая реализация данного алгоритма предполагает, что вычисление отсчетов $H(\eta_i^z, f_k, \varphi_0)$ для $\varphi_0 = 0$ и $\varphi_0 = \pi/2$ осуществляется в параллельном режиме. Здесь также предполагается, что исходные данные, соответствующие применяемой оконной функции, задаются при выборе ее вида (блок 2 на схеме алгоритма).

В процессе решения поставленной задачи важным этапом стала программная реализация разработанного математического и алгоритмического обеспечения, а также постановка и проведение численных экспериментов с использованием данного программного обеспечения с целью исследования потенциальных возможностей полученных решений по вычислению периодограммной оценки СПМ. В соответствии с этим был разработан специализированный программный модуль. Проектирование этого модуля было осуществлено с ориентацией на его использование в составе интегрированного метрологически значимого прикладного программного обеспечения систем, предназначенных для комплексного анализа сложных сигналов [40, 41].

Численные эксперименты по исследованию функциональных возможностей модуля и характеристик оценок СПМ, вычисляемых с его использованием, проводились с применением наборов тестовых моделей с заданной частотной структурой спектра, которые имитировали реализации сложных сигналов. Преобразование таких моделей в числовой код отсчетов $\{\eta_i^z : 1 \leq i \leq I - 1\}$ осуществлялось на основе имитационного моделирования дискретно-событийной процедуры бинарно-знакового стохастического квантования.

Тестовая модель, используемая для имитации централизованной реализации многокомпонентного сложного сигнала, состояла из заданного числа статистически независимых гармонических компонент и имела нулевую постоянную составляющую. В процессе эксперимента имитировалась ситуация, когда такая модель целенаправленно подвергалась искажению аддитивным шумовым сигналом $e(t)$. С этой целью использовался белый шум, имеющий нулевое среднее значение и дисперсию σ_e^2 . Значения частот гармонических компонент задавались в пределах от нуля до 0,5. Они интерпретировались как нормированные частоты $f_k^H = f_k / 2F_{\max}$ относительно верхней граничной частоты F_{\max} диапазона вычисления оценки СПМ. Такой подход к заданию частот позволил формализовать процесс исследования потенциальных возможностей разработанного математического и алгоритмического обеспечения по оценке частотных спектров для моделей сигнала с раз-

личными параметрами гармонических компонент в единой нормированной полосе частот. Задание значений амплитуд A_k^H гармонических компонент осуществлялось в диапазоне от нуля до единицы. Они также интерпретировались как нормированные. Что касается начальных фаз φ_k гармонических компонент, то они имели значения от $-\pi$ до $+\pi$. Для их задания использовался генератор случайных чисел с равномерным законом распределения.

Тестовая стратегия численных экспериментов была направлена на экспертную оценку и детальное исследование способностей алгоритма, связанных с идентификацией и частотным разрешением гармонических компонент. В соответствии с этим численные эксперименты осуществлялись с использованием различных комбинаций тестовых наборов моделей. В общем случае одна часть гармонических компонент в составе модели имела амплитуды, дающие резкие пики в спектре, а другая часть была с малыми амплитудами. Такой состав гармонических компонент использовался для оценки способности обнаруживать присутствие слабых спектральных составляющих при доминировании в спектре сильных составляющих на фоне широкополосного шума. С помощью данной модели также было удобно исследовать способность алгоритма различать гармонические составляющие, частоты которых в спектре близки между собой, и тем самым оценивать его разрешающую способность по частоте. В частности, такая модель реализации сигнала содержала двенадцать гармонических компонент, параметры которых представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры гармонических компонент

k	A_k^H	f_k^H	A_k^2 / A_{\max}^2 , дБ
1	0,15	0,12	-16,48
2	0,3	0,15	-10,46
3	0,5	0,20	-6,02
4	0,75	0,22	-2,50
5	1,0	0,24	0
6	0,55	0,25	-5,19
7	0,3	0,26	-10,46
8	0,25	0,30	-12,04
9	0,15	0,33	-16,48
10	0,35	0,4	-9,12
11	0,9	0,41	-0,92
12	0,5	4,3	-6,02

При этом аддитивный шумовой сигнал имел дисперсию $\sigma_e^2 = 1$. Фрагмент реализации этой модели представлен на рисунке 2. Нормированные оценки СПМ для рассматриваемой модели реализации сигнала представлены на рисунках 3-8. Они получены с применением естественного, треугольного и косинусного окон, а также окон Ханна, Хэмминга и Блэкмана.

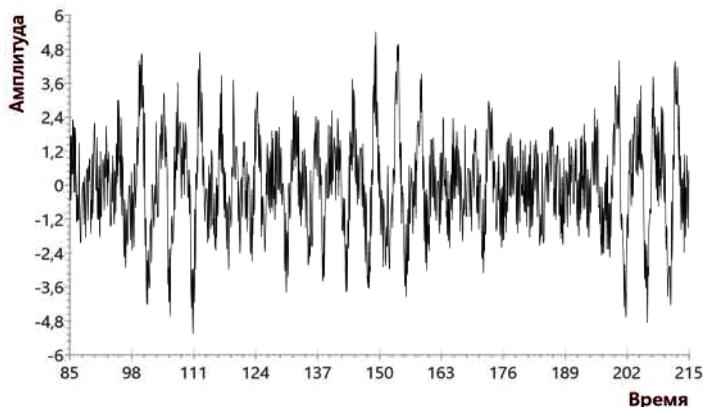


Рис. 2. Фрагмент реализации модели зашумленного многокомпонентного сигнала

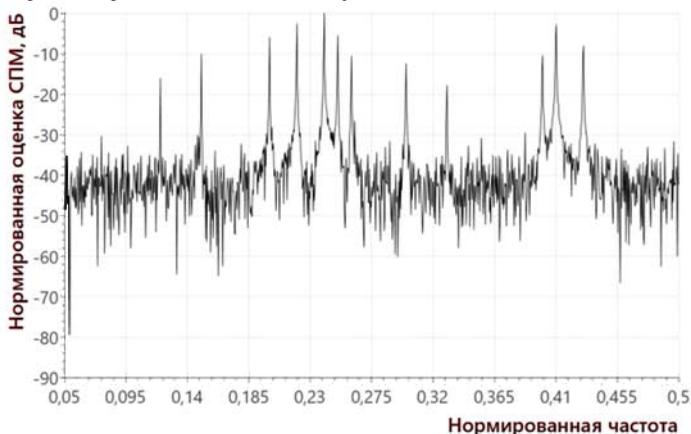


Рис. 3. Нормированная оценка СПМ. Естественное окно

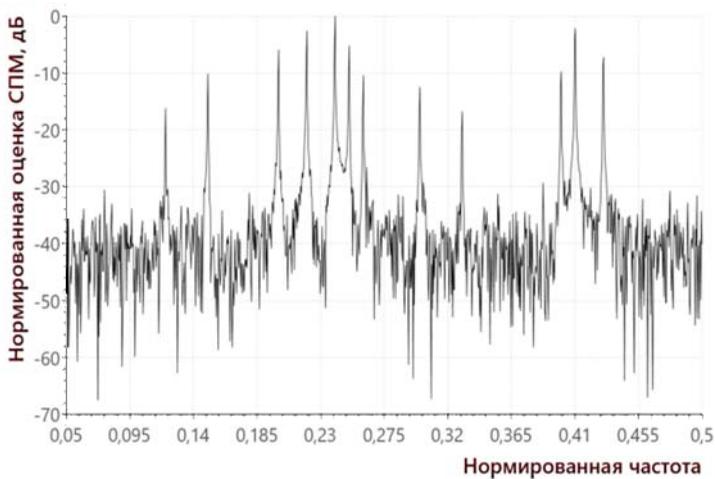


Рис. 4. Нормированная оценка СПМ. Треугольное окно

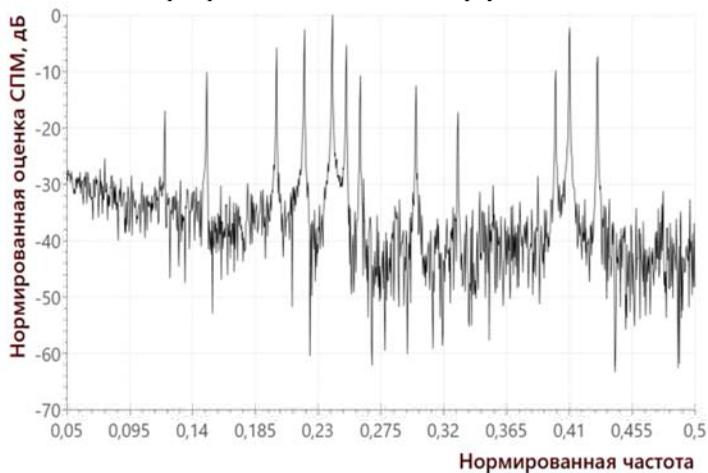


Рис. 5. Нормированная оценка СПМ. Косинусное окно

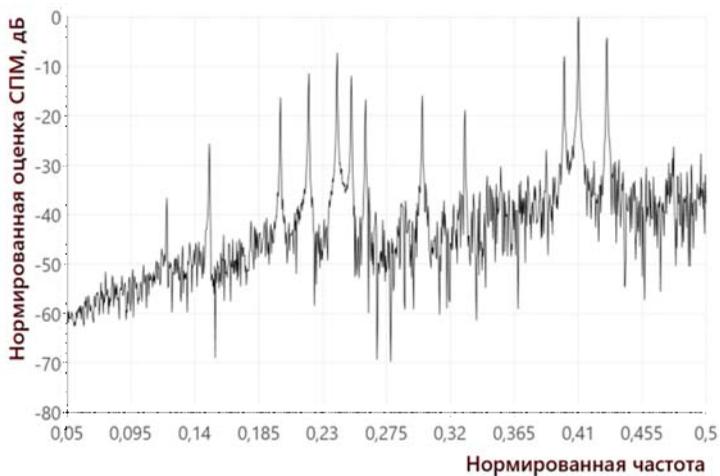


Рис. 6. Нормированная оценка СПМ. Окно Ханна

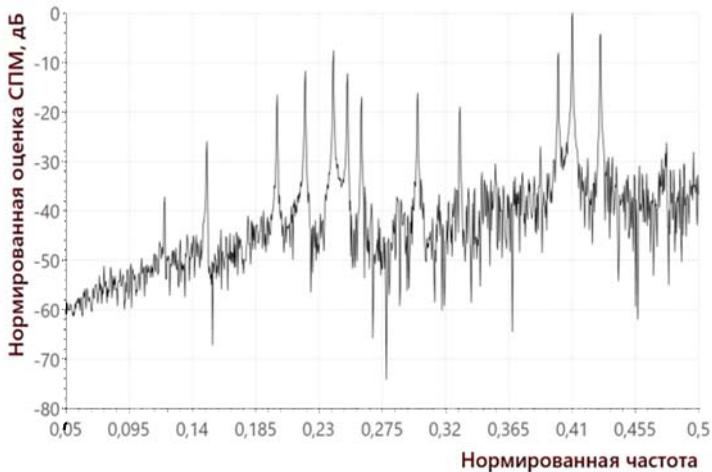


Рис. 7. Нормированная оценка СПМ. Окно Хэмминга

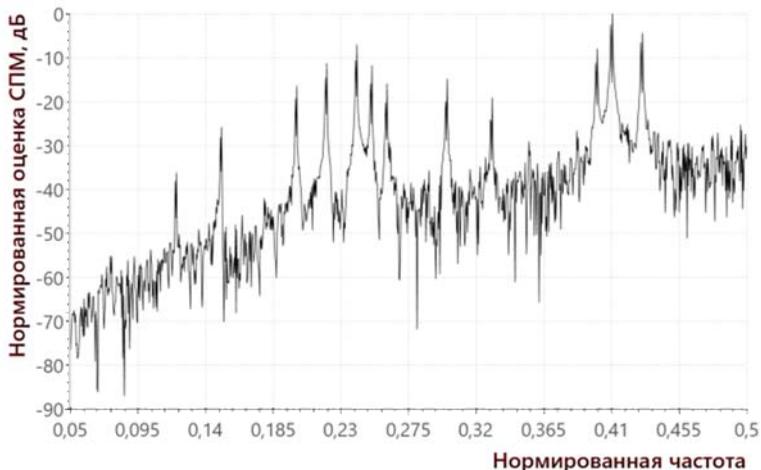


Рис. 8. Нормированная оценка СПМ. Окно Блэкмана

Разрешение спектральных компонент, с которым они вычислены, составляет 0,0005 единиц нормированной частоты. На графиках хорошо видно, что алгоритм обеспечил уверенное распознавание всех двенадцати гармонических компонент модели. Распределение спектральных линий по частоте соответствует данным, представленным в таблице 2. Эффект взаимного маскирования спектральных линий отсутствует. Они четко различимы в пределах всего частотного диапазона. Ложные спектральные линии на графиках отсутствуют. Спектральная оценка аддитивного шума не превышает -30 дБ.

Экспериментальные исследования свидетельствуют о хорошей разрешающей способности по частоте разработанного алгоритма, а также о том, что он обеспечивает вычисление статистически устойчивых спектральных оценок к внешнему шумовому воздействию. Однако нетрудно видеть, что оконные функции дают несколько различающиеся результаты вычисления оценок СПМ. Надо понимать и учитывать, что выбор конкретной оконной функции представляет собой принятие взаимно приемлемого компромиссного решения, связанного с обеспечением требуемого разрешения по частоте и точности определения пикового уровня спектральных компонент. Отдавая предпочтение той или иной оконной функции, необходимо следовать рекомендациям по ее использованию в зависимости от области проводимых исследований и частотного состава (низкочастотный или высокочастотный) анализируемого сигнала. Это означает, что необходимо следовать определенной

стратегии выбора и применения оконных функций в процессе обработки сигнала при спектральном анализе [42-46].

5. Заключение. В статье рассмотрена поэтапная разработка математического и алгоритмического обеспечения, повышающего эффективность вычисления дискретной периодограммной оценки СПМ с применением оконных функций. Основой такой разработки послужило бинарно-знаковое стохастическое квантование для преобразования сигнала в цифровой код. Получены математические соотношения, не требующие в своей основе выполнения большого числа операций умножения, что ведет к снижению мультипликативной сложности процедур оценивания СПМ. Данные математические соотношения послужили основой для разработки вычислительного алгоритма получения периодограммной оценки СПМ. Принципиально важной особенностью этого алгоритма является то, что основными операциями определяемых им процедур являются арифметические операции сложения и вычитания, а также операции логической обработки дискретных значений функций $H(t, f, \varphi_0)$. Особое значение для повышения эффективности вычислительных процедур имеет и то, что в процессе спектрального анализа функции $H(t, f, \varphi_0)$ являются известными. Вид этих функций определяется исключительно видом оконных функций. Согласно полученному математическому решению, они представляют собой первообразные функции для интегрального косинус-преобразования оконных функций и вычисляются аналитически. Множество таких функций может быть сформировано предварительно с учетом набора применяемых оконных функций и оформлено в виде специальных коллекций или динамических библиотек прикладных подпрограмм. Аналитическое вычисление интегральных операторов позволило исключить свойственную классическим цифровым алгоритмам периодограммной оценки СПМ погрешность, вызванную переходом от операций интегрирования к дискретным операциям суммирования. Результаты проведенных численных экспериментов дали основание подтверждения того, что разработанный подход позволяет с высокой точностью и частотным разрешением получать периодограммные оценки СПМ в условиях присутствия аддитивного шумового сигнала при низком отношении сигнал/шум. Программная реализация вычислительного алгоритма выполнена в виде программного модуля, который может найти применение как составной компонент интегрированного метрологически значимого программного обеспечения многофункциональных систем для оперативного частотно-временного анализа сложных многокомпонентных сигналов.

Литература

1. *Alessio S.M.* Digital Signal Processing and Spectral Analysis for Scientists: Concepts and Applications // Springer. 2016. 900 p.
2. *Marple Jr.S.L.* Digital Spectral Analysis with Applications: Second edition // Dover Publications Inc. 2019. 432 p.
3. *Oppenheim A.V., Schaffer R.W.* Discrete-Time Signal Processing: Third edition // Pearson Higher Education. 2010. 1108 p.
4. *Bendat J.S., Piersol A.G.* Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Fourth edition // Wiley. 2010. 621 p.
5. *Percival D.B., Walden A.T.* Spectral Analysis for Univariate Time Series // Cambridge University Press. 2020. 692 p.
6. *Фухтенгольц Г.М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления.. 8-изд. // М.: Физматлит. 2003. Т. 2. 864 с.
7. *Oberguggenberger M., Ostermann A.* Analysis for Computer Scientists Foundations, Methods and Algorithms // Springer. 2018. 378 p.
8. *Ульянов М.В.* Ресурсно-эффективные компьютерные алгоритмы. Разработка и анализ // М.: Физматлит. 2008. 304 с.
9. *Kleinberg J., Tardos E.* Algorithm Design // Pearson. 2006. 838 p.
10. *Blahut R.E.* Fast Algorithms for Signal Processing // Cambridge University Press. 2010. 453 p.
11. *Britanak V., Rao K.R.* Cosine-/Sine-Modulated Filter Banks: General Properties, Fast Algorithms and Integer Approximations // Springer. 2018. 645 p.
12. *Madisetti V.K.* The Digital Signal Processing Handbook, Second edition: Digital Signal Processing Fundamentals // CRC Press, Taylor and Francis Group. 2010. 904 p.
13. *Stepanov A.A. Rose D.E.* From Mathematics to Generic Programming // Addison-Wesley Professional. 2015. 292 p.
14. *Kester W.* (Editor). Analog-Digital Conversion // Analog Devices. 2004. 1138 p.
15. *Pelgrom M.* Analog-to-Digital Conversion // Springer. 2017. 548 p.
16. *Bhattacharyya S.S., Deprettere E.F., Leupers R., Takala J.* Handbook of Signal Processing Systems // Springer. 2019. 1200 p.
17. *Papadopoulos H.C., Wornell G.W., Oppenheim A.V.* Sequential Signal Encoding From Noisy Measurements Using Quantizers with Dynamic Bias Control // IEEE Transactions on information theory. 2001. vol. 47. no. 3. pp. 978–1002.
18. *Fang J., Shen Y., Yang L., Li H.* Adaptive One-Bit Quantization for Compressed Sensing // Signal Processing. 2016. vol. 125. pp. 145–155.
19. *Isla J., Celga F.* The Use of Binary Quantization for the Acquisition of Low SNR Ultrasonic Signals: a Study of the Input Dynamic Range // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2016. vol. 63. no. 9. pp. 1474–1482.
20. *Isla J., Celga F.* Simultaneous Transmission and Reception on All Elements of an Array: Binary Code Excitation // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2019. vol. 475. no. 2225. pp. 1–23.
21. *Zhai Q., Wang Y.* Noise Effect on Signal Quantization in an Array of Binary Quantizers // Signal Processing. 2018. vol. 152. pp. 265–272.
22. *Diao J.-D., Guo J., Sun C.-Y.* Event-Triggered Identification of Fir Systems with Binary-Valued Output Observations // Automatica. 2018. vol. 98. pp. 95–102.
23. *Wang G., Zhu J., Xu Z.* Asymptotically Optimal One-bit Quantizer Design for Weak-Signal Detection in Generalized Gaussian Noise and Lossy Binary Communication Channel // Signal Processing. 2019. vol. 154. pp. 207–216.
24. *Wang G. et al.* Signal Amplitude Estimation and Detection From Unlabeled Binary Quantized Samples // IEEE Transactions on Signal Processing. 2018. vol. 66. no. 16. pp. 4291–4303.

25. Guo J., Wang L.Y., Yin G. Zhao Y., Zhang J.F. Identification of Wiener Systems with Quantized Inputs and Binary-Valued Output Observations // *Automatica*. 2017. vol. 78. pp. 280–286.
26. Горбунов Ю.Н., Куликов Г.В., Шнак А.В. Радиолокация: стохастический подход / Под ред. Ю.Н.Горбунова // М.: Горячая линия-Телеком. 2016. 520 с.
27. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения // М.: Энергоиздат. 1982. 320 с.
28. Max J. Methodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Tome 1: Principes generaux et methodes classiques // Masson, Paris. 1996. 354 p.
29. Якимов В.Н. Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // Известия самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. №4(7). С. 1346–1353.
30. Yakimov V.N. Direct Spectral Power Density Estimation from a Discrete-Time Representation of Stochastic Analog Quantization for an Analog Random Process // *Measurement Techniques*. 2009. vol. 52. no. 3. pp. 223–230.
31. Law A.M. Simulation Modeling and Analysis: Fifth edition // McGraw-Hill Education. 2015. 804 p.
32. Zeigler B.P., Muzy A., Kofman E. Theory of Modeling and Simulation Discrete Event and Iterative System Computational Foundations // Academic Press. 2019. 667 p.
33. Hu X., Wu P. A Data Assimilation Framework for Discrete Event Simulations // *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. 2019. vol. 29. no. 3. pp. 17:1–17:26.
34. Robinson S. Conceptual modelling for simulation: Progress and grand challenges // *Journal of Simulation*. 2020. vol. 14. no. 1. pp. 1–20.
35. Blas M. J., Gonnet S. Computer-aided design for building multipurpose routing processes in discrete event simulation models // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2021. vol. 24. no. 1. pp. 22–34.
36. Фиктенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т.1. 8-изд. // М.: Физматлит. 2003. 680 с.
37. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis With the Discrete Fourier Transform // *Proceedings of the IEEE*. 1978. vol. 66. no. 1. pp. 51–83.
38. Prabhu K.M.M. Window Functions and Their Applications in Signal Processing // CRC Press, Taylor and Francis Group. 2014. 382 p.
39. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. Изд. 2-е. // М.: Техносфера. 2016. 208 с.
40. Yakimov V.N., Zaberzhinskij B.E., Mashkov A.V. Bukanova Yu.V. Multi-threaded Approach to Software High-speed Algorithms for Spectral Analysis of Multi-component Signals // *Proceedings of IEEE XXI International Conference on Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*. 2019. pp. 698–701.
41. Yakimov V.N., Gorbachev O.V. Firmware of the Amplitude Spectrum Evaluating System for Multicomponent Processes // *Instruments and Experimental Techniques*. 2013. vol. 56. no. 5. pp. 540–545.
42. Mohindru P., Khanna R., Bhatia S.S. Spectral Analysis of Generalized Triangular and Welch Window Functions using Fractional Fourier Transform // *Automatika: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*. 2016. vol. 57. no. 1. pp. 221–229.
43. Zaytsev G.V., Khzmalyan A.D. A Family of Optimal Window Functions for Spectral Analysis with the Spectrum Sidelobe Falloff Rate Multiple of 12 dB per Octave // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2020. vol. 65. no. 5. pp. 502–515.
44. Rahman M.S., Sugiura Y., Shimamura T. Utilization of Windowing Effect and Accumulated Autocorrelation Function and Power Spectrum for Pitch Detection in Noisy Environments // *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. 2020. vol. 15. no. 11. pp. 1681–1690.

45. *Smith W.H.F.* Spectral Windows for Satellite Radar Altimeters // *Advances in Space Research*. 2018. vol. 62. no. 6. pp. 1576–1588.
46. *Mirri D., Iuculano G., Traverso P.A., Pasin G.* Performance Evaluation Of Cascaded Rectangular Windows in Spectral Analysis // *Measurement*. 2004. vol. 36. no. 1. pp. 37–52.

Якимов Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации и управления технологическими процессами института автоматки и информационных технологий, Самарский государственный технический университет (СамГТУ). Область научных интересов: методы и средства статистических измерений, диагностика технического состояния и испытания систем, цифровая обработка сигналов, корреляционный и спектральный анализ сигналов, математическое и имитационное моделирование. Число научных публикаций — 280. yvnr@hotmail.com; ул. Молодогвардейская, 244, 443100, Самара, Россия; р.т. +7(846) 279-0354.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00228-а).

V. YAKIMOV

PERIODOGRAM ESTIMATING THE SPECTRAL POWER DENSITY BASED UPON SIGNALS' BINARY-SIGN STOCHASTIC QUANTIZATION USING WINDOW FUNCTIONS

Yakimov V. Periodogram Estimating the Spectral Power Density Based upon Signals' Binary-Sign Stochastic Quantization Using Window Functions.

Abstract. Spectral analysis of signals is used as one of the main methods for studying systems and objects of various physical natures. Under conditions of a priori statistical uncertainty, the signals are subject to random changes and noise. Spectral analysis of such signals involves the estimation of the power spectral density (PSD). One of the classical methods for estimating PSD is the periodogram method. The algorithms that implement this method in digital form are based on the discrete Fourier transform. Digital multiplication operations are mass operations in these algorithms. The use of window functions leads to an increase in the number of these operations. Multiplication operations are among the most time consuming operations. They are the dominant factor in determining the computational capabilities of an algorithm and determine its multiplicative complexity.

The paper deals with the problem of reducing the multiplicative complexity of calculating the periodogram estimate of the PSD using window functions. The problem is solved based on the use of binary-sign stochastic quantization for converting a signal into digital form. This two-level signal quantization is carried out without systematic error. Based on the theory of discrete-event modeling, the result of a binary-sign stochastic quantization in time is considered as a chronological sequence of significant events determined by the change in its values. The use of a discrete-event model for the result of binary-sign stochastic quantization provided an analytical calculation of integration operations during the transition from the analog form of the periodogram estimation of the SPM to the mathematical procedures for calculating it in discrete form. These procedures became the basis for the development of a digital algorithm. The main computational operations of the algorithm are addition and subtraction arithmetic operations. Reducing the number of multiplication operations decreases the overall computational complexity of the PSD estimation. Numerical experiments were carried out to study the algorithm operation. They were carried out on the basis of simulation modeling of the discrete-event procedure of binary-sign stochastic quantization. The results of calculating the PSD estimates are presented using a number of the most famous window functions as an example. The results obtained indicate that the use of the developed algorithm allows calculating periodogram estimates of PSD with high accuracy and frequency resolution in the presence of additive white noise at a low signal-to-noise ratio. The practical implementation of the algorithm is carried out in the form of a functionally independent software module. This module can be used as a part of complex metrologically significant software for operational analysis of the frequency composition of complex signals.

Keywords: Power Spectral Density, Periodogram Estimate, Binary Stochastic Quantization, Window Function, Timing

Yakimov Vladimir — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Professor, Department of Automation and Control of Technological Processes, Samara State Technical University. Research interests: methods and means of statistical measurements, diagnostics of technical condition and testing of systems, digital signal processing, correlation and spectral analysis of signals, mathematical and simulation modeling. The number of publications — 280. yvnr@hotmail.com; 244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia; office phone: +7(846) 279-0354.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 19-08-00228-a).

References

1. Alessio S.M. Digital Signal Processing and Spectral Analysis for Scientists: Concepts and Applications. Springer. 2016. 900 p.
2. Marple Jr.S.L. Digital Spectral Analysis with Applications: Second edition. Dover Publications Inc. 2019. 432 p.
3. Oppenheim A.V., Schaffer R.W. Discrete-Time Signal Processing: Third edition. Pearson Higher Education. 2010. 1108 p.
4. Bendat J.S., Piersol A.G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Fourth edition. Wiley. 2010. 621 p.
5. Percival D.B., Walden A.T. Spectral Analysis for Univariate Time Series. Cambridge University Press. 2020. 692 p.
6. Fichtenholz G.M. *Kurs differentsialnogo i integralnogo ischisleniya* [Course of differential and integral calculus]. Moscow: Fizmatlit. 2003. Issue 2. 864 p. (In Russ.).
7. Oberguggenberger M., Ostermann A. Analysis for Computer Scientists Foundations, Methods and Algorithms. Springer. 2018. 378 p.
8. Ul'janov M.V. *Resursno-jeffektivnye komp'yuternye algoritmy. Razrabotka i analiz* [Resource-efficient computer algorithms. Development and analysis]. Moscow: Fizmatlit. 2008. 304 p. (In Russ.).
9. Kleinberg J., Tardos E. Algorithm Design. Pearson. 2006. 838 p.
10. Blahut R.E. Fast Algorithms for Signal Processing. Cambridge University Press. 2010. 453 p.
11. Britanak V., Rao K.R. Cosine-/Sine-Modulated Filter Banks: General Properties, Fast Algorithms and Integer Approximations. Springer. 2018. 645 p.
12. Madisetti V.K. The Digital Signal Processing Handbook, Second edition: Digital Signal Processing Fundamentals. CRC Press, Taylor and Francis Group. 2010. 904 p.
13. Stepanov A.A., Rose D.E. From Mathematics to Generic Programming. Addison-Wesley Professional. 2015. 292 p. 310.
14. Kester W. Analog-Digital Conversion. Analog Devices. 2004. 1138 p.
15. Pelgrom M. Analog-to-Digital Conversion. Springer. 2017. 548 p.
16. Bhattacharyya S.S., Deprettere E.F., Leupers R., Takala J. Handbook of Signal Processing Systems. Springer. 2019. 1200 p.
17. Papadopoulos H.C., Wornell G.W., Oppenheim A.V. Sequential Signal Encoding From Noisy Measurements Using Quantizers with Dynamic Bias Control. *IEEE Transactions on information theory*. 2001. vol. 47. no. 3. pp. 978–1002.
18. Fang J., Shen Y., Yang L., Li H. Adaptive One-Bit Quantization for Compressed Sensing. *Signal Processing*. 2016. vol. 125. pp. 145–155.
19. Isla J., Celga F. The Use of Binary Quantization for the Acquisition of Low SNR Ultrasonic Signals: a Study of the Input Dynamic Range. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2016. vol. 63. no. 9. pp. 1474–1482.
20. Isla J., Celga F. Simultaneous Transmission and Reception on All Elements of an Array: Binary Code Excitation. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2019. vol. 475. no. 2225. pp. 1–23.
21. Zhai Q., Wang Y. Noise Effect on Signal Quantization in an Array of Binary Quantizers. *Signal Processing*. 2018. vol. 152. pp. 265–272.
22. Diao J.-D., Guo J., Sun C.-Y. Event-Triggered Identification of Fir Systems with Binary-Valued Output Observations. *Automatica*. 2018. vol. 98. pp. 95–102.
23. Wang G., Zhu J., Xu Z. Asymptotically Optimal One-bit Quantizer Design for Weak-Signal Detection in Generalized Gaussian Noise and Lossy Binary Communication Channel. *Signal Processing*. 2019. vol. 154. pp. 207–216.
24. Wang G. et al. Signal Amplitude Estimation and Detection From Unlabeled Binary Quantized Samples. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2018. vol. 66. no. 16. pp. 4291–4303.
25. Guo J. et al. Identification of Wiener Systems with Quantized Inputs and Binary-Valued Output Observations. *Automatica*. 2017. vol. 78. pp. 280–286.
26. Gorbunov Yu.N. Kulikov G.V., Shpak A.V. *Radiolokacija: stohasticheskij podhod* [Radar: a stochastic approach]. Moscow: Gorjachaja Linija-Telekom. 2016. 520 p. (In Russ.).

27. Mirskii G.Ya. *Harakteristiki stohasticheskoy vzaimosvjazi i ih izmerenija* [Characteristics of stochastic interconnections and their measurement]. Moscow: Energoizdat. 1982. 320 p.
28. Max J. Methodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques. Tome 1: Principes generaux et methodes classiques. Masson, Paris. 1996.354 p.
29. Yakimov V.N. [Digital complex statistical analysis based on the sign-function representation of random processes]. *Izvestija samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk – Izvestia of Samara scientific center of the Russian academy of sciences*. 2016. vol. 18. no. 4(7). pp. 1346–1353. (In Russ.).
30. Yakimov V.N. Direct Spectral Power Density Estimation from a Discrete-Time Representation of Stochastic Analog Quantization for an Analog Random Process. *Measurement Techniques*. 2009. vol. 52. no. 3. pp. 223–230.
31. Law A.M. Simulation Modeling and Analysis: Fifth edition. McGraw-Hill Education. 2015. 804 p.
32. Zeigler B.P., Muzy A., Kofman E. Theory of Modeling and Simulation Discrete Event and Iterative System Computational Foundations. Academic Press. 2019. 667 p.
33. Hu X., Wu P. A Data Assimilation Framework for Discrete Event Simulations. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. 2019. vol. 29. no. 3. pp. 17:1–17:26.
34. Robinson S. Conceptual modelling for simulation: Progress and grand challenges. *Journal of Simulation*. 2020. vol. 14. no. 1. pp. 1–20.
35. Blas M. J., Gonnet S. Computer-aided design for building multipurpose routing processes in discrete event simulation models. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2021. vol. 24. no. 1. pp. 22–34.
36. Fichtenholz G.M. *Kurs differentsialnogo i integralnogo ischisleniya* [Course of differential and integral calculus]. Moscow: Fizmatlit. 2003. vol. 1. 680 p. (In Russ.).
37. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis With the Discrete Fourier Transform. *Proceedings of the IEEE*. 1978. vol. 66. no. 1. pp. 51–83.
38. Prabhu K.M.M. Window Functions and Their Applications in Signal Processing. CRC Press, Taylor and Francis Group. 2014. 382 p.
39. Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V. *Okonnye funkcii dlya garmonicheskogo analiza signalov* [Windows functions for harmonic analysis of signals]. Ed. 2nd. Moscow: Tekhnosfera. 2016. 208 p. (In Russ.).
40. Yakimov V.N., Zaberzhinskij B.E., Mashkov A.V., Bukanova Yu.V. Multi-threaded Approach to Software High-speed Algorithms for Spectral Analysis of Multi-component Signals. Proceedings of IEEE XXI International Conference on Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). 2019. pp. 698–701.
41. Yakimov V.N., Gorbachev O.V. Firmware of the Amplitude Spectrum Evaluating System for Multicomponent Processes. *Instruments and Experimental Techniques*. 2013. vol. 56. no. 5. pp. 540–545.
42. Mohindru P., Khanna R., Bhatia S.S. Spectral Analysis of Generalized Triangular and Welch Window Functions using Fractional Fourier Transform. *Automatika: Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*. 2016. vol. 57. no. 1. pp. 221–229.
43. Zaytsev G.V., Khzmalyan A.D. A Family of Optimal Window Functions for Spectral Analysis with the Spectrum Sidelobe Falloff Rate Multiple of 12 dB per Octave. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2020. vol. 65. no. 5. pp. 502–515.
44. Rahman M.S., Sugiura Y., Shimamura T. Utilization of Windowing Effect and Accumulated Autocorrelation Function and Power Spectrum for Pitch Detection in Noisy Environments. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. 2020. vol. 15. no. 11. pp. 1681–1690.
45. Smith W.H.F. Spectral Windows for Satellite Radar Altimeters. *Advances in Space Research*. 2018. vol. 62. no. 6. pp. 1576–1588.
46. Mirri D., Iuculano G., Traverso P.A., Pasin G. Performance Evaluation Of Cascaded Rectangular Windows in Spectral Analysis. *Measurement*. 2004.vol. 36. no.1. pp.37–52.

А.А. БАТЕНКОВ, К.А. БАТЕНКОВ, А.Б. ФОКИН
**ФОРМИРОВАНИЕ СЕЧЕНИЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ
СЕТЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ИХ УСТОЙЧИВОСТИ
С РАЗЛИЧНЫМИ МЕРАМИ СВЯЗНОСТИ**

Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Формирование сечений телекоммуникационных сетей для анализа их устойчивости с различными мерами связности.

Аннотация. Одними из актуальных задач в области телекоммуникационных сетей выступают задачи, связанные с анализом их устойчивости. Наиболее подходящей моделью сети для подобного рода задач оказывается модель, использующая постулаты теории графов. При этом предположение о случайном характере отказов отдельных звеньев телекоммуникационной сети позволяет ее рассматривать в виде обобщенной модели Эрдеша–Реньи. Хорошо известно, что вероятность выхода из строя элементов может трактоваться в форме коэффициента готовности и коэффициента оперативной готовности, а также в виде других показателей, характеризующих работоспособность элементов телекоммуникационной сети. Большинство подходов рассматривает лишь случай двухполюсной связности, когда необходимо обеспечить взаимодействие двух конечных адресатов. В современных телекоммуникационных сетях на первый план выходят услуги типа виртуальных частных сетей, для которых организуются многоточечные соединения, не укладывающиеся в понятие двухполюсной связности. В этой связи в работе предлагается расширить подобный подход для анализа многополюсной и всеполюсной связностей. Так, подход для двухполюсной связности базируется на методе, использующем в качестве основы матрицу связностей, и, по сути, предполагающий последовательный перебор всех сочетаний вершинных сечений, начиная с истока и стока. Данный способ приводит к включению в общий состав сечений не минимальных, что потребовало введения дополнительной процедуры проверки добавляемого сечения на избыточность. Подход для всеполюсной связности аналогичен использованному при формировании множества минимальных всеполюсных сечений и отличается лишь процедурой отбора используемых для образования матрицы сечений комбинаций, из всего множества которых сохраняются лишь те, которые содержат полюсные вершины. В качестве тестовой сети связи используется магистральная сеть Ростелеком, развернутая с целью формирования потоков в направлении "Европа – Азия". Показано, что многополюсные сечения являются наиболее общим понятием относительно двухполюсных и всеполюсных. Несмотря на возможность подобного обобщения, в практических приложениях целесообразно рассматривать именно частные случаи вследствие их меньшей вычислительной сложности.

Ключевые слова: сеть связи, граф, структура, вероятность связности, двухполюсная связность, многополюсная связность, всеполюсная связность.

1. Введение. Проблема анализа устойчивости является довольно востребованной как в области телекоммуникаций [1-6], так и в других отраслях, занимающихся разработкой и эксплуатацией сложно разветвленных сетей [7-9].

В современных телекоммуникационных сетях на первый план выходят услуги типа виртуальных частных сетей, для которых организируются многоточечные соединения, не укладывающиеся в понятие двухполюсной связности. В качестве типового примера можно рассмотреть магистрального оператора Ростелеком (рис. 1), которому обычно требуется предоставить услугу виртуальной сети для распределенного географически потребителя, что подразумевает его подключения сразу в нескольких вершинах графа (обычно более, чем в двух, например, в вершинах 2, 26 и 45). Тогда для оператора оказывается востребованной задача расчета надежности сети, в которой адресатами будут выступать данные вершины. В результате классический подход к анализу двухполюсной связности оказывается отчасти несостоятельным при подобной трактовке проблемы, поскольку требует анализа сразу нескольких вероятностей (между 2 и 26, 2 и 45, 26 и 45 вершинами), каждая из которых будет характеризовать устойчивость лишь в конкретном направлении. В этой связи в работе предлагается расширить подобный подход для анализа многополюсной и всеполюсной связностей.

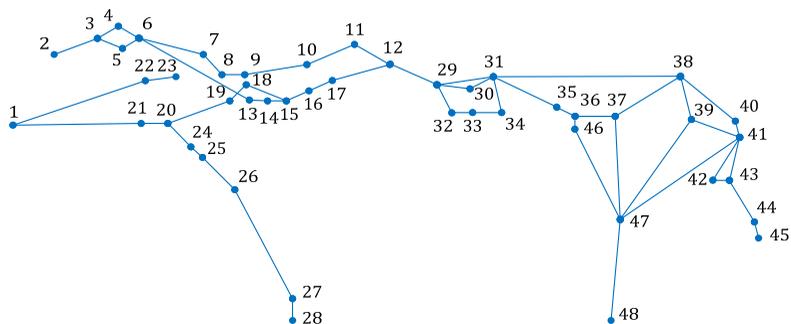


Рис. 1. Граф – модель магистральной сети Ростелеком

С точки зрения теоретических предпосылок существующий математический аппарат анализа надежности сетей достаточно хорошо описывает методы непосредственного расчета вероятности связности сети на основе сформированного множества типовых подграфов сети. Здесь можно упомянуть такие методы, как прямой перебор состояний элементов системы связи, прямой перебор состояний связности и несвязности системы связи, приведение к простейшим структурам, оценка на основе метода декомпозиции (теоремы разложения Шеннона–Мура), оценка на основе преобразований булевой алгебры (логико-вероятност-

ный метод), объединение связанных подграфов или сечений с поглощением, метод двудольных графов. Однако проблеме синтеза множеств типовых состояний (путей, деревьев, сечений) посвящено не так много работ. Кроме того, обычно рассматриваются алгоритмы формирования сечений и анализируется их вычислительная сложность, глубоко не вдаваясь в подробности их математического описания, что требует определенной интуиции при разработке и отладке программ. В этой связи в настоящей работе сделана попытка математической формализации алгоритмов формирования множеств сечения для различных мер связности при условии их некоторой модификации с целью снижения вычислительной сложности.

Наиболее подходящей моделью сети для подобного рода задач оказывается модель, использующая постулаты теории графов [10]. При этом предположение о случайном характере отказов отдельных звеньев телекоммуникационной сети позволяет ее рассматривать в виде обобщенной модели Эрдеша–Реньи [11]. В ней рассматривается случайный граф G , в котором жестко задано множество вершин $V = \{1, \dots, v\}$ с мощностью v . Естественно, что случайными в нем являются только ребра, что вполне согласуется с предположением об абсолютной устойчивости сетевых устройств. В классическом подходе анализируются исключительно графы, в которых отсутствуют кратные ребра (мультиграфы), петли (псевдографы) и направленные ребра (орграфы). Всего потенциальных ребер в графе G $l = C_n^2$ штук. Вероятность существования ребра (работоспособности линии связи) между вершинами i и j обозначена через $p_{i,j} \in [0,1]$ и не зависит от всех остальных $l-1$ ребер. Отметим, что данная вероятность может рассматриваться и как коэффициент готовности и коэффициент оперативной готовности [3], и как другие показатели, характеризующие работоспособность элементов телекоммуникационной сети [4]. Предполагая, что L – случайное множество ребер, существующее после реализации отдельного опыта, случайный граф G приобретает форму обобщенной модели Эрдеша–Реньи, т. е. $G = (V, L)$. Заметим, что вероятность p_G существования конкретного графа G в результате опыта есть:

$$p_G = \prod_{(i,j) \in L} p_{i,j} \prod_{(i,j) \notin L} (1 - p_{i,j}).$$

Хорошо известно, что вероятность выхода из строя элементов может трактоваться в форме коэффициента готовности и коэффициента

оперативной готовности [12], а также в виде других показателей, характеризующих работоспособность элементов телекоммуникационной сети [13]. В результате вероятность $p(S)$ обладания случайным графом G некоторым свойством трактуется как сумма вероятностей p_G существования графов, принадлежащих множеству S , для которого этого свойства выполняется, то есть

$$p(S) = \sum_{G \in S} p_G.$$

При анализе устойчивости телекоммуникационной сети под рассматриваемым свойством обычно понимают связность сети. Следовательно, вероятность $p(S)$ связности сети оценивается как сумма вероятностей существования p_G всех связных графов (на заданном множестве вершин), формирующих множество S .

Основываясь на представлении о понятии стохастической связности сети как соответствии некоторого случайного графа свойству связности между заданным набором вершин, традиционно выделяют три меры связности: двухполюсная, многополюсная и всеполюсная [10, 14]. Для всех данных мер множество S графов, для которого выполняется свойство связности, имеет следующий вид:

$$S = \{G : \exists S_i \subseteq G\}.$$

То есть множество S состоит из всех графов G , для которых существует хотя бы один подграф S_i , содержащийся в графе G .

Следует отметить, что процедуры определения множества S графов, для которого выполняется свойство связности, оказываются весьма нетривиальными задачами, иногда даже более трудоемкими, чем последующее вычисление вероятности связности. Кроме того, фактически случайный граф в данном контексте распадается на совокупность детерминированных составляющих, определяющих данное множество S . В настоящей работе предлагаются алгоритмы, позволяющие для произвольного графа телекоммуникационной сети и трех типов связности формировать подобное множество S , элементами которого являются соответствующие сечения. В последующем на их основе оказывается возможным рассчитывать вероятность связности сети.

2. Формирование множества минимальных двухполюсных сечений. Сам по себе термин сечение, или разрез, обозначает набор

ребер, удаление которых приводит к нарушению связности исходного графа [10, 15]. Отметим, что здесь под связностью в общем случае понимается многополюсная связность, а в частных – двухполюсная и всеполюсная [16, 17]. Минимальное же сечение является, по сути, тем же самым сечением, но включение (работоспособность) любого из его ребер приводит к связности исходного графа. Таким образом, минимальное сечение – это набор ребер, только полное удаление которых приводит к нарушению связности исходного графа. Отметим, что в литературе, посвященной анализу надежности сложных систем, обычно слово "минимальное" опускают, считая это самим собой разумеющимся. Здесь и далее, если нет неоднозначности в толковании понятия *минимальное сечение*, также будем использовать термин *сечение*. Отдельно следует остановиться на термине *вершинное сечение*, являющимся минимальным сечением, приводящим к изоляции данной вершины от всех остальных элементов графа.

Рассматриваемый подход базируется на методе, использующем в качестве основы матрицу связностей, и предполагающем последовательный перебор всех сочетаний вершинных сечений, начиная с истока и стока [10, 18]. Отметим, что данный способ приводит к включению в общий состав сечений не минимальных, что потребовало введения дополнительной процедуры проверки добавляемого сечения на безызбыточность.

Формально процедуру формирования множества минимальных двухполюсных сечений целесообразно разбить на три этапа. На первом синтезируют $v-1$ множество вершинных сечений, выделяя в отдельный блок сечение истока и стока. На втором находят декартово произведение сечений, не являющихся истоком и стоком, вплоть до $v-3$ полученного множества с учетом неповторяемости ребер, отсутствия ребер, принадлежащих истоку, и невключенности всех ребер сечения стока в получаемое множество. На заключительном третьем вычисляют декартово произведение полученных на втором этапе произведений на вершинное сечение истока, контролируя уникальность ребер.

Исходными данными является матрица смежностей $\mathbf{A} = \{a_{i,j}\}_{i,j=1,v}$ случайного графа G , на основе которой с использованием соотношений:

$$a'_{1,j} = a'_{j,1} = \begin{cases} \sum_{r=1}^j a_{1,r}, & a_{1,j} = 1, \\ 0, & a_{1,j} = 0, \end{cases}$$

$$j = 1, \dots, v,$$

$$a'_{i,j} = a'_{j,i} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{r=k}^v a_{k,r} + \sum_{r=k}^j a_{i,r}, & a_{i,j} = 1, \\ 0, & a_{i,j} = 0, \end{cases}$$

$$i = 2, \dots, v, j = 1, \dots, v,$$

достаточно легко вычисляется модифицированная матрица смежностей \mathbf{A}' . Заданное направление связи образуется двумя вершинами: истоком с номером v_s и стоком с номером v_t .

Процесс формирования множества вершинных сечений разбивается на два этапа. Так, необходимо образовать две матрицы, одна из которых включает только сечения истока и стока, а вторая – все остальные. Таким образом, целесообразно первоначально образовать двухэлементный вектор, содержащий номера полюсных вершин (истока и стока):

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} v_s \\ v_t \end{bmatrix}.$$

Тогда вектор, содержащий номера оставшихся неполюсных вершин включает $v - 2$ элемента:

$$\mathbf{k}' = \{\{i\} : i \notin \mathbf{k}, i = 1, \dots, v\}.$$

Следовательно и матрица полюсных вершинных сечений $\mathbf{C}' = \{c'_{i,j}\}_{\substack{i=1,\dots,l \\ j=1,2}}$ и неполюсных $\mathbf{C} = \{c_{i,j}\}_{\substack{i=1,\dots,l \\ j=1,v-2}}$ аналогичны по структуре. Данные матрицы также формируются путем последовательной процедуры сравнения элементов модифицированной матрицы \mathbf{A}' смежностей с индексами образуемых матриц \mathbf{C}' или \mathbf{C} сечений:

$$c'_{i,j} = \left\{ a_{k,r} : a'_{k,r} = i, k = 1, \dots, v, r = \begin{cases} v_s, j = 1, \\ v_t, j = 2, \end{cases} \right\}, i = 1, \dots, l, \quad (1)$$

$$c_{i,j} = \left\{ a_{k,r} : a'_{k,j} = i, k = 1, \dots, v, r = \begin{cases} j, j < \min(v_s, v_t), \\ j-1, \min(v_s, v_t) < j < \max(v_s, v_t), \\ j-2, j > \max(v_s, v_t), \end{cases} \right\},$$

$$i = 1, \dots, l, j = 1, \dots, v-2.$$

Формирование декартовых произведений неполюсных сечений в случае матричного представления сечений несколько упрощается и формализуется в алгебраическом виде. Так, на первом шаге образуются вектора \mathbf{w}_k , являющиеся, по сути, векторами неполюсных вершинных сечений, обязательно содержащие ребра сечения истока и не включающие все ребра сечения стока:

$$\mathbf{w}_k = \left\{ \mathbf{C}^i : \max(\mathbf{C}^i + \mathbf{C}^1) = 2, \min(\mathbf{C}^i - \mathbf{C}^2) \neq 0, i = 1, \dots, v-2 \right\}. \quad (2)$$

Проверка тождества $\max(\mathbf{C}^i + \mathbf{C}^1) = 2$ эквивалентна выявлению неуникальных ребер сечения истока \mathbf{C}^1 в неполюсном сечении \mathbf{C}^i , неравенства $\min(\mathbf{C}^i - \mathbf{C}^2) \neq 0$ – присутствия в сечении \mathbf{C}^i всех ребер сечения стока \mathbf{C}^2 .

На последующих шагах образуются вектора \mathbf{w}_k , являющиеся декартовыми произведениями до порядка $v-3$ неполюсных вершинных сечений \mathbf{C}^i . При этом дополнительно к контролю содержания ребер сечения истока и невключенности всех ребер сечения стока удаляются повторяющиеся ребра:

$$\mathbf{w}_k = \left\{ \mathbf{c}' : \mathbf{c}' = 1_l - \text{sign}(\mathbf{c} - 1_l) \odot \text{sign}(\mathbf{c} - 1_l), \right.$$

$$\mathbf{c} = \sum_{i_1=1}^{v-2} \sum_{i_2=i_1+1}^{v-2} \dots \sum_{i_r=i_{r-1}+1}^{v-2} \sum_{j=1}^r \mathbf{C}^{i_j}, i_j \leq v-2, \quad (3)$$

$$\left. \max(\mathbf{c} + \mathbf{C}^1) = 2, \min(\mathbf{c} - \mathbf{C}^2) \neq 0, r = 2, \dots, v-3 \right\},$$

где $\mathbf{x}' = \{x'_i\} = \text{sign}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|}$ – вектор, полученный из исходного вектора $\mathbf{x} = \{x_i\}$, каждый элемент которого:

$$x'_i = \frac{x_i}{|x_i|},$$

⊙ – произведение Адамара [19].

Здесь вычисление вектора $\mathbf{c}' = 1_l - \text{sign}(\mathbf{c} - 1_l) \odot \text{sign}(\mathbf{c} - 1_l)$ эквивалентно удалению повторяющихся ребер из декартового произведения сечений, представленного в форме суммы всех возможных перестановок векторов сечений $\mathbf{c} = \sum_{i_1=1}^{v-2} \sum_{i_2=i_1+1}^{v-2} \dots \sum_{i_r=i_{r-1}+1}^{v-2} \sum_{j=1}^r \mathbf{C}^{i_j}$.

Заключительный шаг состоит в вычислении декартового произведения полученных векторов \mathbf{w}_k на вектор сечения истока \mathbf{C}^1 с одновременным удалением неуникальных ребер и проверкой добавляемого сечения на безызбыточность и добавлении сечений истока и стока:

$$\mathbf{W} = \mathbf{C}', \quad (4)$$

$$\mathbf{W}^{k+2} = \left\{ \mathbf{w} : \mathbf{w} = 1_l - (\mathbf{w}_k + \mathbf{C}^1 - 1_l) \odot (\mathbf{w}_k + \mathbf{C}^1 - 1_l), \right. \\ \left. \min(\mathbf{W}^i - \mathbf{w}) \neq 0, \min(\mathbf{w} - \mathbf{W}^i) \neq 0, i = 1, \dots, k-1 \right\}, \quad (5)$$

$$k = 1, \dots, \text{rows}(\mathbf{w}).$$

Здесь проверка тождественности неравенства $\min(\mathbf{W}^i - \mathbf{w}) \neq 0$ эквивалентна выявлению факта принадлежности множества ребер добавляемого сечения \mathbf{w} множеству ребер уже добавленного сечения \mathbf{W}^i , а неравенства $\min(\mathbf{w} - \mathbf{W}^i) \neq 0$ – наоборот.

3. Формирование множества минимальных всеполюсных сечений. Рассматриваемый подход базируется на методе, использующем в качестве основы матрицу связностей, предполагающем последовательный перебор всех сочетаний вершинных сечений, не включая одну из вершин, считающую терминальной [10, 20, 21]. В отличие от процедур, используемых в данном методе, выполняющих проверки на инцидентность соседних вершинных сечений, а также на связность графа, полученного после

удаления заданной комбинации вершинных сечений, более простым решением оказался контроль добавляемого сечения на уникальность.

Формально процедуру формирования множества минимальных всеполюсных сечений целесообразно разбить на три этапа. На первом синтезируют ν множеств вершинных сечений. На втором анализируют на уникальность полученные вершинные сечения и формируют исходное множество сочетаний вершинных сечений, состоящее из $\nu - 1$ множеств вершинных сечений, обычно удаляя из рассмотрения сечение первой вершины. На третьем образуют все сочетания отобранных $\nu - 1$ множеств вершинных сечений, последовательно сохраняя только уникальные сочетания сечений.

Исходными данными является матрица смежностей $\mathbf{A} = \{a_{i,j}\}_{i,j=1,\nu}$ случайного графа G , на основе которой вычисляется модифицированная матрица смежностей \mathbf{A}' .

В рамках данного подхода множество вершинных сечений целесообразно представлять в виде вектора–строки номеров вершинных сечений $\mathbf{C}_1 = \mathbf{c}^T = \{c'_i\}_{i=1,\dots,\nu-1}$, состоящего из номеров вершин, образующих множество анализируемых сечений. Поскольку удобно не рассматривать сечение именно первой вершины, то:

$$c'_i = i + 1, i = 1, \dots, \nu - 1. \quad (6)$$

Первое уникальное всеполюсное сечение графа – это сечение этой первой вершины, т. е. первый столбец матрицы \mathbf{W} всеполюсных сечений формируется путем анализа первого столбца матрицы \mathbf{A} смежностей:

$$w_{i,1} = \{a_{j,1} : a'_{j,1} = i, j = 1, \dots, \nu\}, i = 1, \dots, l. \quad (7)$$

Оставшиеся $\nu - 1$ вершинных сечений образуют столбцы матрицы \mathbf{W} всеполюсных сечений только в случае их уникальности. Для этого первоначально для каждого k -го сечения вычисляется вспомогательный вектор $\mathbf{w} = \{w_i\}_{i=1,\dots,l}$, являющийся вектором, идентифицирующим это вершинное сечение:

$$w_i = \{a_{j,k} : a'_{j,k} = i, j = 1, \dots, \nu\}, i = 1, \dots, l, k = 2, \dots, \nu, \quad (8)$$

который и проверяется на неповторяемость:

$$\mathbf{W}^k = \left\{ \mathbf{w} : \min(\mathbf{w} - \mathbf{W}^i) \neq 0, i = 1, \dots, k-1 \right\}. \quad (9)$$

Далее на каждом шаге образуются сочетания вершинных сечений в форме матриц \mathbf{C}_r сочетаний порядка r , $r = 1, \dots, v-1$. При этом разрешенные комбинации не включают в себя потенциально не образующие минимальные сечения. Так для каждой вершины есть предел перебора номеров вершин, определяемый номером максимальной инцидентной вершины и задаваемый в виде вектора $\mathbf{c} = \{c_i\}_{i=1, \dots, v-1}$, каждый элемент которого рассчитывается на основе матрицы \mathbf{A} смежностей:

$$c_i = \left\{ \max(j) : a_{i+1, j} = 1, j = 1, \dots, v \right\}, i = 1, \dots, v-1. \quad (10)$$

В результате матрицы \mathbf{C}_r сочетаний формируются на основе последовательного перебора сначала по номерам i столбцов предыдущих матриц, а затем по номерам j всех допустимых вершинных сечений:

$$\mathbf{C}_r^k = \left\{ \left[\begin{array}{c} \mathbf{C}_{r-1}^i \\ c_j \end{array} \right] : i = 1, \dots, \text{cols}(\mathbf{C}_{r-1}), [\mathbf{C}_{r-1}^i]_{r-1} < c_j [\mathbf{C}_{r-1}^i]_{r-1}, \right. \\ \left. j = [\mathbf{C}_{r-1}^i]_{r-1} + 1, \dots, c_j [\mathbf{C}_{r-1}^i]_{r-1} \right\}. \quad (11)$$

Также на каждом шаге проверяется уникальность добавляемого сечения. Для этого для каждого k -го сочетания вычисляется вспомогательный вектор $\mathbf{w} = \{w_i\}_{i=1, \dots, l}$, являющийся вектором, идентифицирующим это сочетание:

$$w_i = \left\{ \mathbf{w} : w = \sum_{r'=1}^r a_{j, [\mathbf{C}_k^{r'}]_{r'}} a'_{j, [\mathbf{C}_k^{r'}]_{r'}} = i, j = 1, \dots, v \right\}; \\ i = 1, \dots, l, k = 2, \dots, v, \quad (12)$$

Далее из него удаляются повторяющиеся ребра:

$$\mathbf{w}' = \mathbf{1}_l - \text{sign}(\mathbf{1}_l - \mathbf{w}) \odot \text{sign}(\mathbf{1}_l - \mathbf{w}) \quad (13)$$

и выполняется проверка на неповторяемость:

$$\mathbf{W}^k = \left\{ \mathbf{w}' : \min(\mathbf{w}' - \mathbf{W}^i) \neq 0, i = 1, \dots, k-1 \right\}. \quad (14)$$

4. Формирование множества минимальных многополюсных сечений. Рассматриваемый подход аналогичен использованному при формировании множества минимальных всеполюсных сечений и отличается лишь процедурой отбора используемых для образования матрицы сечений комбинаций. При этом из всего множества сечений сохраняются лишь содержащие полюсные вершины.

Исходными данными является также матрица смежностей $\mathbf{A} = \{a_{i,j}\}_{i,j=1,v}$ случайного графа G .

В рамках данного подхода также рассчитывается вектор–строка номеров вершинных сечений $\mathbf{C}_1 = \mathbf{c}'^T = \{c'_i\}_{i=1,\dots,v-1}$ на основе соотношения (6).

Далее образуют вектор, содержащий номера вершин, не являющихся полюсами. Так, если номера вершин–полюсов v_i образуют вектор $\mathbf{k} = \{k_i\}_{i=1,\dots,v'}$, то вектор $\mathbf{k}' = \{k'_i\}_{i=1,\dots,v-v'}$:

$$\mathbf{k}' = \{ \{i\} : i \notin \mathbf{k}, i = 1, \dots, v \}$$

включает номера только неполюсных вершин.

Первый столбец матрицы \mathbf{W} всеполюсных сечений формируется путем анализа не только первого столбца матрицы \mathbf{A} смежностей, но и в том случае, если первая вершина является полюсом:

$$w_{i,1} = \left\{ a_{j,1} : i \in \mathbf{k}, a'_{j,1} = i, j = 1, \dots, v \right\}, i = 1, \dots, l. \quad (15)$$

Оставшиеся $v-1$ вершинных сечений образуют столбцы матрицы \mathbf{W} всеполюсных сечений только в случае их уникальности и принадлежности к множеству полюсов. Для этого аналогично формуле (8) первоначально для каждого k -го сечения вычисляется вспомогательный вектор $\mathbf{w} = \{w_i\}_{i=1,\dots,l}$, идентифицирующий это вершинное сечение:

$$w_i = \left\{ a_{j,k} : i \in \mathbf{k}, a'_{j,k} = i, j = 1, \dots, v \right\}, i = 1, \dots, l, k = 2, \dots, v, \quad (16)$$

который и проверяется на неповторяемость в соответствии с равенством (9).

Процедуры (10)–(11) выполняются идентично и в результате формируются матрицы \mathbf{C}_r сочетаний.

При расчете вспомогательного вектора $\mathbf{w} = \{w_i\}_{i=1, \dots, l}$ дополнительно к выражению (12) необходимо проверять на принадлежность используемых вершин к множеству полюсов:

$$w_i = \left\{ w : w = \sum_{r'=1}^r a_{j, \left[\mathbf{c}_k^{k'} \right]_{r'}} , i \in \mathbf{k}, a'_{j, \left[\mathbf{c}_k^{k'} \right]_{r'}} = i, j = 1, \dots, v \right\}; \quad (17)$$

$$i = 1, \dots, l, k = 2, \dots, v,$$

Удаление повторяющихся ребер и проверка на уникальность производятся по тем же соотношениям (13)–(14). В результате данных процедур формируется матрица многополюсных сечений \mathbf{W} .

5. Реализация предложенных процедур на примере простейшей сети. Рассмотрим реализацию предложенных процедур на примере формирования минимальных двухполюсных сечений. Структура сети представлена на рисунке 2. Источник и сток на рисунке также отмечены квадратами: $v_s = 1$, $v_t = 5$. Таким образом, вектор полюсов \mathbf{k} равен:

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} 1 \\ 5 \end{bmatrix}.$$

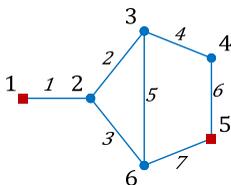


Рис. 2. Двухполюсный граф исследуемой сети связи

Вектор неполюсных вершин равен:

$$\mathbf{k}' = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 6 \end{bmatrix}.$$

Матрица смежностей графа данной задается формулой:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

а модифицированная матрица – выражением:

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 2 & 0 & 4 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 7 \\ 0 & 3 & 5 & 0 & 7 & 0 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

В соответствии с процедурой (1) рассматривается матрица полюсных вершинных сечений размером 7×2 :

$$\mathbf{C}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

и матрица неполюсных вершинных сечений размером 7×4 :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

Согласно выражениям (2)-(3) порядок вычисляемых декартовых произведений равен трем:

$$\mathbf{w}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{w}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{w}_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{w}_4 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{w}_5 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{w}_6 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Отметим, что из всех исходных столбцов матрицы C сохраняется только первый $\{1\} - \mathbf{w}_1$, поскольку все оставшиеся ($\{2\}$, $\{3\}$, $\{4\}$) не включают ни одного ребра сечения истока. Комбинации пар также остаются только те, в которых фигурирует первый столбец матрицы C , т. е. $\{1, 2\} - \mathbf{w}_2$, $\{1, 3\} - \mathbf{w}_3$ и $\{1, 4\} - \mathbf{w}_4$. Аналогично сохраняются оставшиеся комбинации из трех столбцов, включающие только первый столбец, за исключением комбинации $\{1, 3, 4\}$, которая полностью включает сечение сток, т. е. $\{1, 2, 3\} - \mathbf{w}_5$, $\{1, 2, 4\} - \mathbf{w}_6$.

Итоговая матрица двухполюсных сечений формируется в соответствии с соотношениями (4)-(5) и имеет размер 7×7 :

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Отметим, что только вектор \mathbf{w}_3 оказывается избыточным, поскольку содержится в сечении \mathbf{W}^3 (\mathbf{w}_1). Все остальные сечения образуют столбцы матрицы \mathbf{W} из векторов \mathbf{w}_k путем обнуления элемента первой строки, идентифицирующего единственное ребро сечения истока \mathbf{W}^1 .

Множество двухполюсных сечений изображено на рисунке 3.

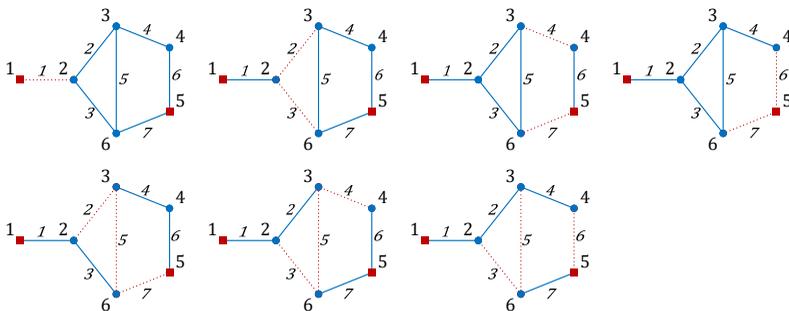


Рис. 3. Двухполюсные сечения в направлении 1-5 графа, представленного на рисунке 2

Далее рассмотрим реализацию предложенных процедур на примере формирования минимальных всеполюсных сечений. Структура сети представлена на рисунке 4. Матрица смежностей графа данной задается формулой (18), а модифицированная матрица – выражением (19). Вектор-строка вершинных сечений согласно выражению (6) имеет вид:

$$C_1 = c^{1T} = [23456].$$

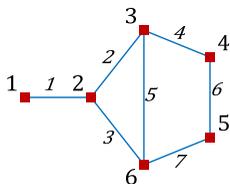


Рис. 4. Всеполюсный граф исследуемой сети связи

Первое уникальное всеполюсное сечение графа в соответствии с формулой (7) формирует исходную матрицу всеполюсных сечений, пока состоящую только из одного столбца:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Далее в этом столбце добавляются только четыре из оставшихся пяти вершинных сечений, вычисляемых на основе соотношений (8)-(9), поскольку сечение второй вершины оказывается не минимальным и поглощается сечением первой вершины:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Вектор \mathbf{c} пределов перебора рассчитывается с использованием выражения (10):

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 6 \\ 6 \\ 5 \\ 6 \\ 5 \end{bmatrix}.$$

Матриц \mathbf{C}_r сочетаний согласно процедуре (11) образуется всего пять, причем первая из них \mathbf{C}_1 определена ранее как вектор-строка вершинных сечений:

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 6 & 4 & 5 & 6 & 5 & 6 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 4 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 5 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 5 & 6 & 5 & 6 & 6 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_4 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 4 & 4 \\ 4 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & 6 & 6 & 6 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_5 = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix}.$$

Отметим, что здесь перебор вариантов для четвертой вершины всегда заканчивается только четвертой, что существенно сокращает количество перебираемых комбинаций.

Далее в соответствии с выражениями (12)-(14) образуются оставшиеся столбцы матрицы всеполюсных сечений:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, \mathbf{W}^1 получено из первого вершинного сечения, т. е. из $\{1\}$, $\mathbf{W}^2 - \{3\}$ (\mathbf{C}_1^2), $\mathbf{W}^3 - \{4\}$ (\mathbf{C}_1^3), $\mathbf{W}^4 - \{5\}$ (\mathbf{C}_1^4), $\mathbf{W}^5 - \{6\}$ (\mathbf{C}_1^5), остальные столбцы рассчитаны из комбинаций: \mathbf{W}^6 из третьего и четвертого, т. е. $\{3, 4\}$ (\mathbf{C}_2^5), $\mathbf{W}^7 - \{4, 5\}$ (\mathbf{C}_2^8), $\mathbf{W}^8 - \{5, 6\}$ (\mathbf{C}_2^9), $\mathbf{W}^9 - \{3, 4, 5\}$ (\mathbf{C}_3^6), $\mathbf{W}^{10} - \{4, 5, 6\}$ (\mathbf{C}_3^8), $\mathbf{W}^{11} - \{3, 4, 5, 6\}$ (\mathbf{C}_4^4). Отметим, что ни одна из комбинаций, содержащая сечение второй вершины, не порождает минимальное сечение, поскольку данное сечение включает в себя сечение первой вершины.

Множество всеполюсных сечений изображено на рисунке 5.

Наконец, рассмотрим реализацию предложенных процедур на примере формирования минимальных многополюсных сечений. Структура сети представлена на рисунке 6. Полюсами данного графа являются первая, четвертая и пятая вершины. Таким образом, вектор полюсов:

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} 1 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix}.$$

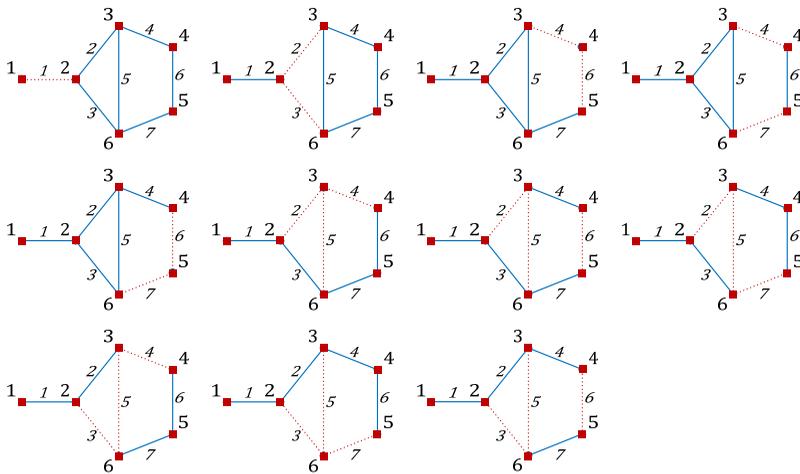


Рис. 5. Всеполусные сечения графа, представленного на рисунке 4

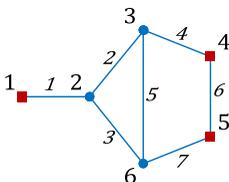


Рис. 6. Многополюсный граф (полюсы – первая, четвертая и пятая вершины) исследуемой сети связи

Матрица смежностей графа данной задается формулой (18), а модифицированная матрица – выражением (19). Вектор-строка вершинных сечений согласно выражению (6) имеет вид:

$$C_1 = \mathbf{c}^T = [23456].$$

Первое уникальное многополюсное сечение графа в соответствии с формулой (15) формирует исходную матрицу многополюсных сечений, поскольку первая вершина является полюсом по условию:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Далее к этому столбцу добавляются только две из оставшихся пяти вершинных сечений, вычисляемых на основе соотношений (16) и (9), поскольку вторая, третья и шестая вершины не являются полюсами:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Вектор \mathbf{c} пределов перебора рассчитывается аналогично с использованием выражения (10):

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 6 \\ 6 \\ 5 \\ 6 \\ 5 \end{bmatrix}.$$

Матриц \mathbf{C}_r сочетаний согласно процедуре (11) также образуется всего пять:

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 6 & 4 & 5 & 6 & 5 & 6 \end{bmatrix},$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 4 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 5 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 6 & 5 & 6 & 5 & 6 & 6 \end{bmatrix},$$

$$C_4 = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 4 & 4 \\ 4 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & 6 & 6 & 6 \end{bmatrix},$$

$$C_5 = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix}.$$

Далее в соответствии с выражениями (17), (13)-(14) образуются оставшиеся столбцы матрицы всеполюсных сечений:

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, W^1 получено из первого вершинного сечения, т. е. из $\{1\}$, $W^2 - \{4\}$ (C_1^3), $W^3 - \{5\}$ (C_1^4), остальные столбцы рассчитаны из комбинаций: W^4 из третьего и четвертого, т. е. $\{3, 4\}$ (C_2^5), $W^5 - \{4, 5\}$ (C_2^8), $W^6 - \{5, 6\}$ (C_2^9), $W^7 - \{3, 4, 5\}$ (C_3^6), $W^8 - \{4, 5, 6\}$ (C_3^8), $W^9 - \{3, 4, 5, 6\}$ (C_4^4). Отметим, что также ни одна из комбинаций, содержащая сечение второй вершины, не порождает минимальное сечение, а кроме того, вершинные сечения третьей и шестой вершины не порождают многополюсное сечение.

Множество многополюсных сечений изображено на рисунке 7.

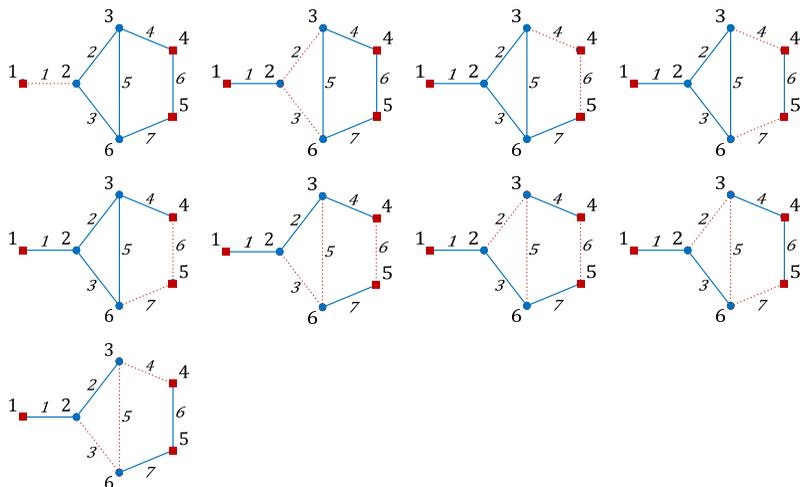


Рис. 7. Многополюсные сечения графа (полюсы – первая, четвертая и пятая вершины), представленного на рисунке 6

6. Пример формирования множества сечений для магистральной сети Ростелеком. В качестве тестовой сети связи используется магистральная сеть Ростелеком, развернутая с целью формирования потоков в направлении "Европа – Азия" [16, 17]. Помеченный граф рассматриваемой сети связи представлен на рисунке 1.

Для двухполюсной связности оказывается возможным провести анализ для магистральной сети (рис. 1) целиком даже на основе сечений. На рисунке 8 представлены результаты формирования множества сечений для всех пар узлов, образующих направления связи. Здесь и далее на рисунках показаны все полученные величины в ходе расчетов, конкретные диапазоны изменения величин по оси абсцисс для каждого из рисунков детализируются в пояснениях. Нумерация n сечений задана сначала по номеру стока j при фиксированном истоке i , а затем и по номеру истока i , то есть номер сечения вычисляется по формуле:

$$n = j + v(i-1) - \frac{i(i+1)}{2}, i = 1, 2, \dots, v-1, j = i+1, i+2, \dots, v.$$

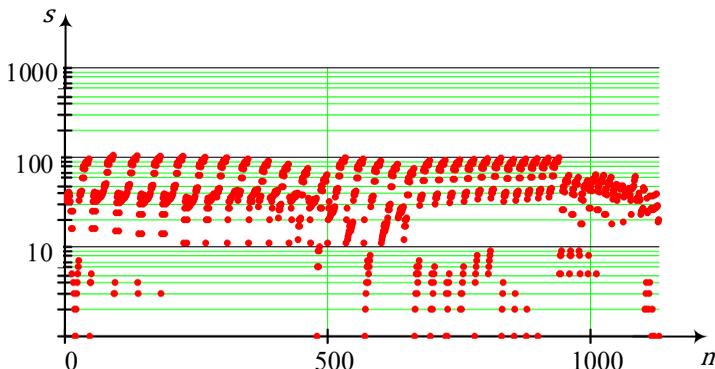


Рис. 8. Зависимость числа s сформированных сечений между заданными парами вершин от порядкового номера n сечения

Отметим, что максимальное количество сечений равно 105 в направлении связи 2 – 48 ($n = 92$).

Оценка вычислительной сложности подобного рода алгоритмов является весьма неоднозначной задачей, вследствие зависимости числа выполняемых циклов от разветвленности графа. В связи с этим в настоящей работе приводятся оценки вычислительной сложности алгоритмов на основе анализа временных затрат на работу алгоритма для графа магистральной сети Ростелеком (рис. 1). Здесь и далее используется программная реализация алгоритмов в пакете MathCad, а расчеты проводятся в операционной системе Windows 8.1 на базе аппаратного обеспечения Intel® Core(TM) i5–3570 CPU @ 3.40GHz 3.80 GHz с оперативной памятью 4 Гбайт.

Временные затраты на формирование сечений представлены на рисунке 9. Стоит отметить, что здесь также время выполнения подобных вычислений не слишком велико и не превысило десяти секунд (максимальное значение характерно для наиболее богатых сечениями направлений связи) и составляет 8,238 с. Тем не менее, несмотря на почти в четыре раза меньшее число сечений, чем путей, максимальное время расчетов возросло более, чем на порядок, что связано, прежде всего, с более затратной процедурой перебора вершинных сечений.

Анализ временных затрат с точки зрения их зависимости от числа формируемых сечений (рис. 10) также показал наличие устойчивого тренда – с ростом количества сечений увеличиваются и требования к временным ресурсам. На рисунке отчетливо прослеживается тенденция возрастания не только минимального времени выполнения процедуры

для заданного числа формируемых подграфов при увеличении их количества, но и максимального времени для значительного числа сечений. Данное обстоятельство также связано с громоздкостью процедуры перебора вершинных сечений. Аналогично процедуре формирования путей, для незначительных по числу сечений направлений связи существуют отдельные выбросы, характеризующиеся значительным временем выполнения, определяемые как особенностями самого графа, так и порядком нумерации вершин [22–24].

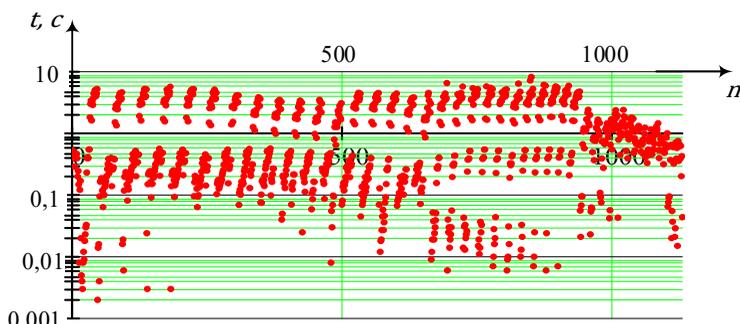


Рис. 9. Зависимость времени t выполнения процедуры формирования путей от их порядкового номера n

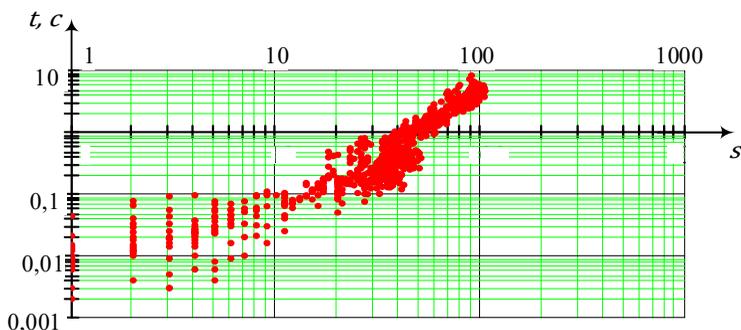


Рис. 10. Зависимость времени t выполнения процедуры формирования сечений от их количества s

Проведенный сравнительный анализ временных затрат формирования сечений показал существенные преимущества предложенного способа, поскольку для исследуемой сети выполнить расчеты оказалось невозможным на имеющихся вычислительных средствах с

помощью известного подхода на основе матрицы смежностей [10, 18]. В результате для его реализуемости потребовалось разбивать граф (рисунок 7) на совокупность разрозненных подграфов, имеющих одинаковые точки сочленения. Только в этом случае оказалось возможным формировать сечения для каждого из подграфов в отдельности. На рисунке 11 показана зависимость выигрыша Δt по времени, определяемая как разность между временем формирования сечений предложенным способом t_r и методом поиска на основе матрицы связностей t_i (cut sets enumeration using connection matrix), изложенным в [18], на основе выражения

$$\Delta t = t_i - t_r. \quad (20)$$

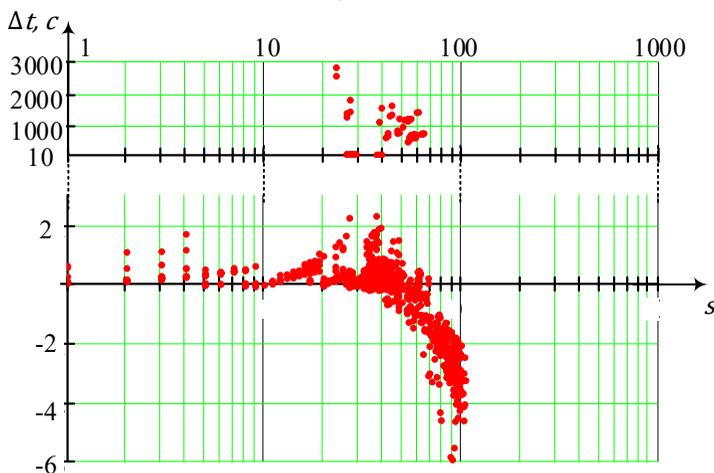


Рис. 11. Зависимость выигрыша Δt по времени выполнения процедуры формирования сечений от их количества s

Отсюда наглядно подтверждаются существенные преимущества предложенного способа, поскольку лишь для значительного количества сечений наблюдается проигрыш по времени вычислений, что объясняется использованием дополнительных процедур разбиения графа на составляющие. Кроме того, для ряда наборов сечений характерны выигрыши, достигающие величин в несколько тысяч секунд. В данных случаях задействованные ресурсы практически приближаются к имеющимся в распоряжении.

В данном случае формирование сечений для всего графа (рис. 7) оказалось возможным только на основе предложенного способа. Для более подробного анализа рассматриваются также и усеченные случаи,

когда исследуется подграф с заданным количеством ребер. На рисунке 12 представлены результаты формирования сечений. Исследования проводились для подграфов, составленных из первых n ребер до 57-го включительно ($n = 1, 2, \dots, 57$), а также для подграфов, включающих только последние фиксированные ребра от 57-го до первого ($n = 58, 59, \dots, 114$). Отметим, что при $n = 57, 114$ получаются идентичные исходные графы. Кроме того, для ряда подграфов ($n = 64, 65, 86, 87, \dots, 102$) число сечений оказалось равным нулю, что свидетельствует о несвязности данных подграфов.

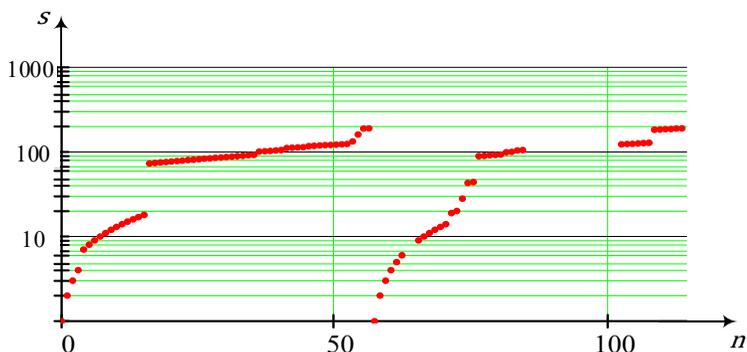


Рис. 12. Зависимость числа s сформированных всеполюсных сечений от порядкового номера n подграфа

Отметим, что максимальное количество всеполюсных сечений равно 190 для исходного графа магистральной сети ($n = 57, 114$).

Временные затраты на формирование всеполюсных сечений представлены на рисунке 13. Отсюда видно, что в зависимости от степени разветвленности графа (количества ребер) время выполнения операций варьируется в широких пределах – от близкого к нулю при числе сечений порядка единиц до величины в несколько минут (216 секунд) при максимальном числе сечений равным 190.

Анализ временных затрат с точки зрения их зависимости от числа формируемых всеполюсных сечений (рис. 14) показывает наличие устойчивого тренда – с ростом количества сечений увеличиваются и требования к временным ресурсам. Аналогично процедуре формирования двухполюсных сечений здесь прослеживается тенденция возрастания не только минимального времени выполнения процедуры для заданного числа формируемых подграфов при увеличении их количества, но и максимального времени для значительного числа сечений. Данное

обстоятельство также связано, прежде всего, с громоздкостью процедуры перебора вершинных сечений. Следует также отметить наличие отдельных выбросов, характеризующихся сравнительно меньшими временами выполнения, определяемыми особенностями самого графа, а не его разветвленностью [25–27].

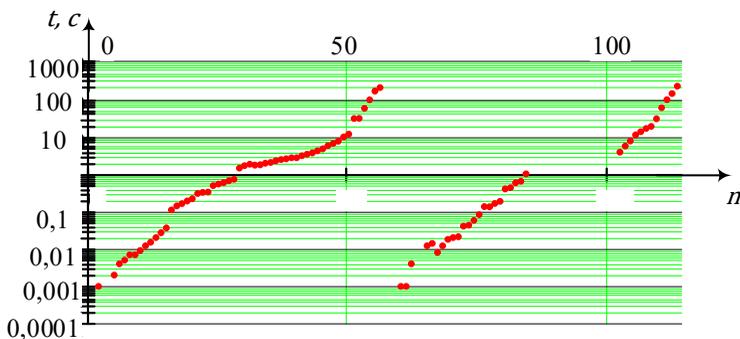


Рис. 13. Зависимость времени t выполнения процедуры формирования всеполюсных сечений от порядкового номера n подграфа

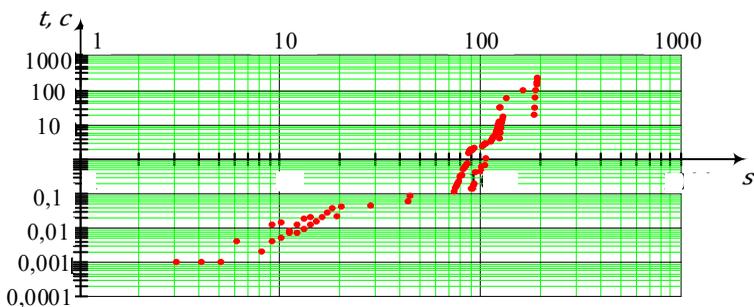


Рис. 14. Зависимость времени t выполнения процедуры формирования всеполюсных сечений от их количества s

Проведенный сравнительный анализ временных затрат формирования всеполюсных сечений показал преимущества предложенного способа для графов с числом сечений деревьев более ста. В качестве известного метода использован метод, генерирующий комбинации вершинных сечений из наборов меньшего порядка (generation of node set combination from its lower order node-sets [10, 20, 21]). На рисунке 15 показана зависимость выигрыша Δt по времени, определяемая как разность между временем форми-

рования всеполюсных сечений предложенным способом t_r и методом поиска, генерирующим комбинации вершинных сечений на основе наборов меньших порядков t_s , на основе выражения (20).

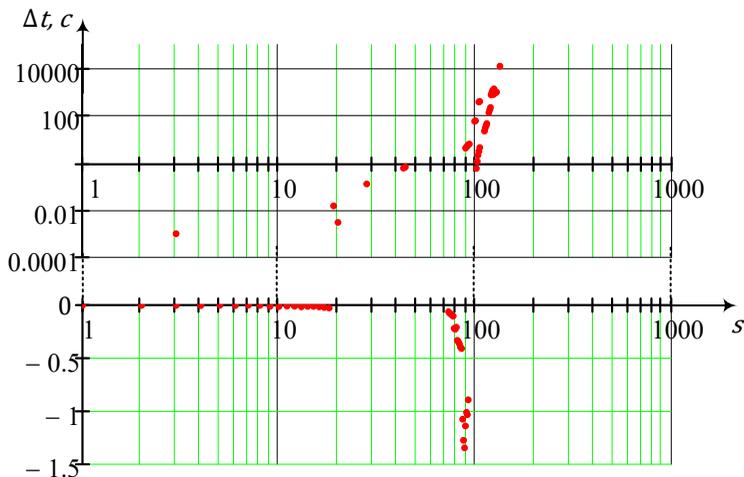


Рис. 15. Зависимость выигрыша Δt по времени выполнения процедуры формирования всеполюсных сечений от их количества s

Отсюда следует, что для не слишком разветвленных графов, содержащих не более ста сечений, предложенный способ несколько проигрывает по времени вычислений (менее полутора секунд), вследствие необходимости проведения дополнительной процедуры проверки сечений на уникальность. В то же время за счет снижения избыточности неминимальных сечений для подграфов с числом сечений более ста выигрыш по времени оказывается весьма существенным (до нескольких десятков тысяч секунд). Кроме того, для подграфов с количеством всеполюсных сечений более 133 ($n = 55, 56, 57, 109, 110, \dots, 114$) вычисления на основе известного метода привели к превышению допустимого времени выполнения (более суток), в то время как предложенный способ успешно справился с задачей за приемлемое время, не превышающее четырех минут (рисунки 12-14).

В данном случае исследование всего исходного графа магистральной сети (рис. 1) оказалось доступным. На рисунке 16 представлены результаты формирования многополюсных сечений. Количество полюсов варьировалось от минимально допустимого числа, равного

двум, и соответствующего случаю анализа направления связи до максимального, не эквивалентного остовому дереву, то есть 18. Для каждого фиксированного количества полюсов десять раз случайно выбрасывался набор вершин. Таким образом, всего рассмотрено 170 вариантов подграфов ($n = 1, 2, \dots, 170$).

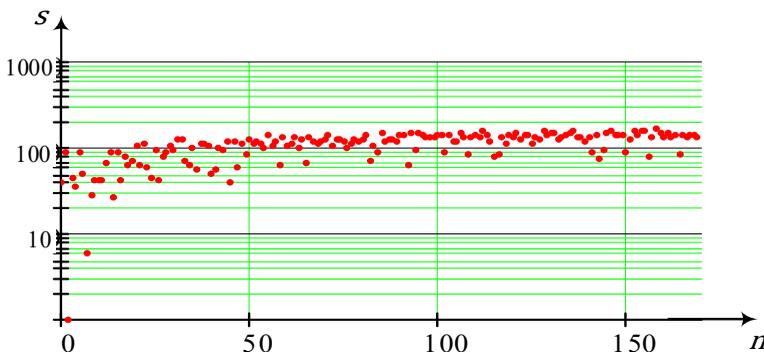


Рис. 16. Зависимость числа s сформированных многополюсных сечений от порядкового номера n подграфа

Отметим, что максимальное количество остовых деревьев сечений 164 для 17-ти полюсного подграфа ($n = 159$). Однако результаты показывают, что количество сечений хотя и растет при увеличении номера рассматриваемого подграфа, но не столь стремительно, как для случая многополюсных деревьев.

Временные затраты на формирование многополюсных сечений представлены на рисунке 17. Видно, что время на выполнение данной процедуры проявляет тенденцию, отмеченную для количества сечений, – хотя временные затраты и возрастают, но рост оказывается незначительным. Данное обстоятельство является следствием необходимости проведения для всех типов подграфов процедуры отбора используемых для образования матрицы сечений комбинаций, вычислительные затраты на которую существенно снизить за счет уменьшения количества сечений практически не представляется возможным [28]. Отметим также, что временные затраты близки по абсолютным значениям к величине времени выполнения процедуры формирования всеполюсных сечений (рис. 12, 13).

Анализ временных затрат с точки зрения их зависимости от числа формируемых многополюсных сечений (рис. 18) показывает наличие устойчивого тренда – с ростом количества деревьев увеличиваются и

требования к временным ресурсам. Однако, очевидно, что относительный временной проигрыш оказывается весьма незначительным по причинам, описанным выше.

Время выполнения процедур формирования многополюсных сечений весьма слабо зависит от количества полюсов в исходном графе (рис. 19). Увеличение полюсности графа очень незначительно влияет на количество проверяемых комбинаций, что и приводит к подобному поведению графиков.

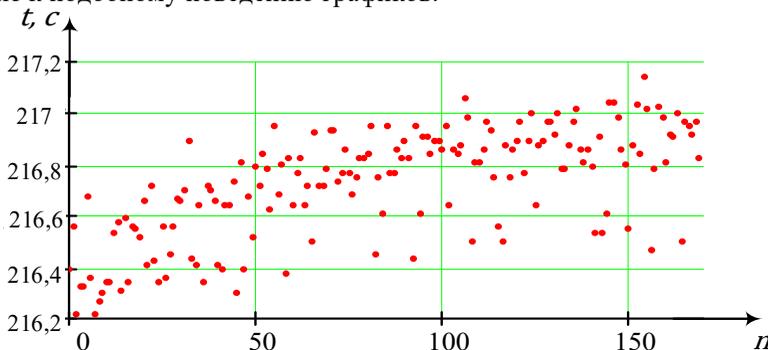


Рис. 17. Зависимость времени t выполнения процедуры формирования многополюсных сечений от порядкового номера n подграфа

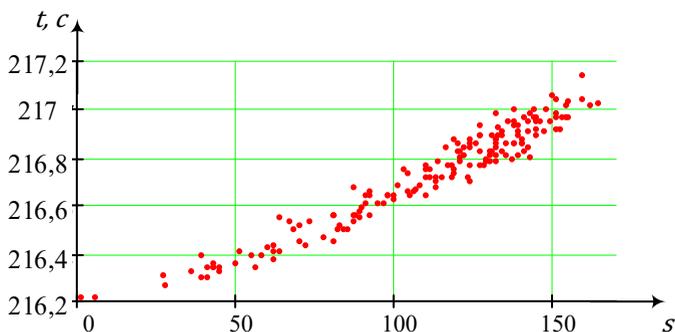


Рис. 18. Зависимость времени t выполнения процедуры формирования многополюсных сечений от их количества s

Подчеркнем, что приведенный подход аналогичен процедуре формирования всеполюсных сечений, с той лишь разницей, что для образования матрицы сечений комбинаций из всего множества сохраняются лишь те, которые содержат полюсные вершины [29–31]. По-

скольку для известного метода, генерирующего комбинации вершинных сечений из наборов меньшего порядка (generation of node set combination from its lower order node sets [10, 20, 21]), получить результаты для графа магистральной сети (рис. 7) оказалось невозможным, то можно констатировать существенные преимущества предложенного метода с точки зрения вычислительных затрат.

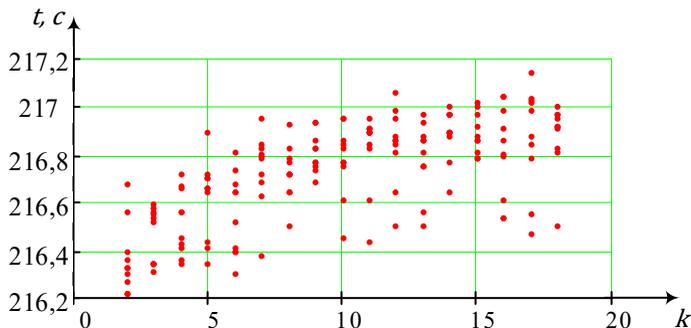


Рис. 19. Зависимость времени t выполнения процедуры формирования многополюсных сечений от количества их полюсов k

7. Заключение. Следует отметить, что многополюсные сечения являются наиболее общим понятием относительно двухполюсных и всеполюсных [32, 33]. Несмотря на возможность подобного обобщения, в практических приложениях целесообразно рассматривать именно частные случаи вследствие их меньшей вычислительной сложности [34-36].

Наиболее часто используемые методы анализа и синтеза сетей связи подразумевают рассмотрение вероятностного показателя устойчивости – вероятности связности. Основной упор при этом делается на исследовании влияния показателей надежности линий связи на устойчивость сети в целом. При этом в качестве технических параметров выступают коэффициент готовности для оценки надежности и коэффициент оперативной готовности для живучести. Значения этих двух параметров регламентируются действующим в настоящее время ГОСТ [12] и определяются характеристиками используемых систем передачи, среды распространения и категорией (приоритетом) пользователей. В результате при соответствующей замене вероятности связности на коэффициенты готовности или оперативной готовности оказывается воз-

можно применять существующие методы анализа вероятности связности для оценки устойчивости (надежности и живучести) реальных телекоммуникационных сетей, исходными данными для работы которых (методов) будут являться способы формирования сечений, предложенные в настоящей работе.

Литература

1. Xu S., Qian Y., Hu R.Q. Reliable and resilient access network design for advanced metering infrastructures in smart grid // IET Smart Grid. 2018. pp. 1–7.
2. Xu S., Qian Y., Hu R.Q. A data-driven preprocessing scheme on anomaly detection in big data applications // Proc. in 2017 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). 2017. pp. 785.
3. Ye F. et al. Reliable energy-efficient uplink transmission for neighborhood area networks in smart grid' // IEEE Trans. Smart Grid. 2015. vol. 6(5). pp. 2179–2188.
4. Ye F., Qian Y., Hu R.Q. Energy efficient self-sustaining wireless neighborhood area network design for smart grid // IEEE Trans. Smart Grid. 2015. vol. 6(1). pp. 220–229.
5. Ye F. et al. Design and analysis of a wireless sensor based monitoring network for transmission lines in smart grid' // Wirel. Commun. Mob. Comput. 2016. vol. 16(10). pp. 1209–1220.
6. Xu S., Qian Y. Quantitative study of reliable communication infrastructure in smart grid NAN' // Proc. in Design of Reliable Communication Networks. 2015. pp. 9394.
7. Zuev K.M., Wu S., Beck J.L. Network reliability problem and its efficient solution by Subset Simulation // Probabilistic Engineering Mechanics. 2015. vol. 40. pp. 25–35.
8. Zhang H.C. et al. Connection effect on amplitude death stability of multi-module floating airport // Ocean Eng. 2017. pp. 46–56.
9. Pino W., Gomes T., Kooij R. A Comparison between Two All-Terminal Reliability Algorithms // Journal of Advances in Computer Networks. 2015. vol. 3. no. 4. December. pp. 284–290.
10. Chaturvedi S.K. Network Reliability Measures and Evaluation // Scrivener Publishing LLC. 2016. 237 p.
11. Райгородский А.М. Модели случайных графов и их применения // Труды МФТИ. 2010. Т. 2. № 4. С. 130–140.
12. ГОСТ Р 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. Введ. 2008–12–18. Москва : Стандартинформ. 2009. 16 с.
13. Острейковский В.А. Теория надежности : Учеб для вузов // М.: Высш. шк. 2003. 463 с.
14. Paredes R. Network Reliability Estimation in Theory and Practice // Preprint submitted to Reliability Engineering & System Safety. 2018. 26 p.
15. Зыков А.А. Основы теории графов // М.: Наука. 1987. 384 с.
16. Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Методы формирования множеств состояний телекоммуникационных сетей для различных мер связности // Труды СПИИРАН. 2020. № 3(19). С. 644–673.
17. Батенков К.А. Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний // Труды СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 5. С. 1093–1118.
18. Ahmad S.H. Enumeration of Minimal Cutsets of an Undirected Graph // Microelectronics Reliability. 1990. vol. 30(1). pp. 23–26.
19. Магнус Я.Р. Матричное дифференциальное исчисление с приложениями к статистике и эконометрике // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2002. 496 с.
20. Mishra R.A. Cutsets based Unified Framework to Evaluate Network Reliability Measures // IEEE Transaction on Reliability. 2009. vol. 56(4). pp. 658–666.

21. *Mishra R.* Global Reliability Evaluation using g-Minimal Cutsets / R. Mishra, S. K. Chaturvedi // International Journal of Performability Engineering. 2009. vol. 5(3). pp. 251–258.
22. *Gharavi H., Hu B.* Multigate communication network for smart grid // Proc. IEEE. 2011. vol. 99(6). pp. 1028–1045.
23. *Lin M., Ting C.* A polynomial-time algorithm for computing K-terminal residual reliability of d-trapezoid graphs' // Inf. Process. Lett. 2015. vol. 115(2). pp. 371–376.
24. *Paredes R.* Network Reliability Estimation in Theory and Practice // Preprint submitted to Reliability Engineering & System Safety. 2018. 26 p.
25. *Housni K.* An Efficient Algorithm for Enumerating all Minimal Paths of a Graph // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2019. vol. 10. pp. 450–460.
26. *Lin Y.K., Yeh C.T.* Determine the optimal double-component assignment for a stochastic computer network // Omega. 2012. vol. 40. no. 1. pp. 120–130.
27. *Lin Y.K.* A novel algorithm to evaluate the performance of stochastic transportation systems // Expert Systems with Applications. 2010. vol. 37. no. 2. pp. 968–973.
28. *Bai G.H., Tian Z.G., Zuo M.J.* An improved algorithm for finding all minimal paths in a network // Reliability Engineering and System Safety. 2016. vol. 150. pp. 1–10.
29. *Батенков К.А.* Числовые характеристики структур сетей связи // Труды СПИИРАН. 2017. № 4(53). С. 5–28.
30. *Батенков К.А., Батенков А.А.* Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости // Труды СПИИРАН. 2018. № 3(58). С. 128–159.
31. *Батенков К.А.* Синтез детерминированных нелинейных дискретных отображений непрерывных каналов связи // Труды СПИИРАН. 2016. № 2(45). С. 75–101.
32. *Zuev K.M., Wu S., Beck J.L.* Network reliability problem and its efficient solution by Subset Simulation // Probabilistic Engineering Mechanics. 2015. vol. 40. pp. 25–35.
33. *Zhang H.C. et al.* Connection effect on amplitude death stability of multi-module floating airport // Ocean Eng. 2017. pp. 46–56.
34. *Pino W., Gomes T., Kooij R.* A Comparison between Two All-Terminal Reliability Algorithms // Journal of Advances in Computer Networks. 2015. vol. 3. no. 4. pp. 284–290.
35. *Silva J. et al.* An effective algorithm for computing all-terminal reliability bounds' // Networks. 2015. vol. 66(4). pp. 282–295.
36. *Pino W., Gomes T., Kooij R.* A Comparison between Two All-Terminal Reliability Algorithms // Journal of Advances in Computer Networks. 2015. vol. 3. no. 4. pp. 284–290.

Батенков Александр Александрович – д-р техн. наук, профессор, профессор, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. Область научных интересов: статистическая теория связи, модели и методы обработки сигналов, вычислительные алгоритмы. Число научных публикаций – 110. pustur@yandex.ru; ул. Комсомольская, 95, 302026, Орел, Россия; р.т.: 8-9065701666.

Батенков Кирилл Александрович – д-р техн. наук, доцент, сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: статистическая теория связи, модели и методы обработки сигналов, анализ качества сетей связи. Число научных публикаций – 152. pustur@yandex.ru; ул. Приборостроительная, 35, 302015, Орел, Россия; р.т.: (4862) 54-97-63.

Фокин Александр Борисович – сотрудник, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Область научных интересов: анализ качества сетей связи. Число научных публикаций – 5. pustur@yandex.ru; ул. Приборостроительная, 35, 302015, Орел, Россия; р.т.: (4862) 54-97-63.

A. BATENKOV, K. BATENKOV, A. FOKIN

FORMING THE TELECOMMUNICATION NETWORKS' CROSS-SECTIONS TO ANALYZE THE LATTER STABILITY WITH DIFFERENT CONNECTIVITY MEASURES

Batenkov A., Batenkov K., Fokin A. Forming the Telecommunication Networks' Cross-Sections to Analyze the Latter Stability with Different Connectivity Measures.

Abstract. The problem of stability analysis and its components of reliability and survivability is quite popular both in the field of telecommunications and in other industries involved in the development and operation of complex networks. The most suitable network model for this type of problem is a model that uses the postulates of graph theory. At the same time, the assumption of the random nature of failures of individual links of the telecommunications network allows it to be considered in the form of a generalized Erdos-Renyi model. It is well known that the probability of failure of elements can be interpreted in the form of a readiness coefficient and an operational readiness coefficient, as well as in the form of other indicators that characterize the performance of elements of a telecommunications network. Most approaches consider only the case of bipolar connectivity, when it is necessary to ensure the interaction of two end destinations. In modern telecommunications networks, services such as virtual private networks come to the fore, for which multipoint connections are organized that do not fit into the concept of bipolar connectivity. In this regard, we propose to extend this approach to the analysis of multi-pole and all-pole connections. The approach for two-pole connectivity is based on a method that uses the connectivity matrix as a basis, and, in fact, assumes a sequential search of all combinations of vertex sections, starting from the source and drain. This method leads to the inclusion of non-minimal cross-sections in the general composition, which required the introduction of an additional procedure for checking the added cross-section for non-excess. The approach for all-pole connectivity is based on a method that uses the connectivity matrix as a basis, and, in fact, assumes a sequential search of all combinations of vertex sections, not including one of the vertices considered terminal. A simpler solution was to control the added section for uniqueness. The approach for multipolar connectivity is similar to that used in the formation of the set of minimal all-pole sections and differs only in the procedure for selecting the combinations used to form the cross-section matrix, of which only those containing pole vertices are preserved. As a test communication network, the Rostelecom backbone network is used, deployed to form flows in the direction of "Europe-Asia". It is shown that multipolar sections are the most general concept with respect to two-pole and all-pole sections. Despite the possibility of such a generalization, in practical applications it is advisable to consider particular cases due to their lower computational complexity.

Keywords: Communication Network, Graph, Structure, Connectivity Probability, Bipolar Connectivity, Multipolar Connectivity, All-pole Connectivity

Batenkov Aleksandr – Ph.D., Dr.Sci., Professor, Professor, Oryol State University named after I.S. Turgenev. Research interests: statistical communication theory, models and methods of signal processing, computational algorithms. The number of publications – 110. pustur@yandex.ru; 95, Komsomolskaya str., 302026, Oryol, Russia.

Batenkov Kirill – Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Employee, Academy of Federal Guard Service. Research interests: statistical communication theory, models and methods of signal processing, communications network quality analysis. The number of publications – 152. pustur@yandex.ru; 35, Priborostroitel'naya str., 302015, Oryol, Russia.

Fokin Aleksandr – Employee, Academy of Federal Guard Service. Research interests: communications network quality analysis. The number of publications – 5. pustur@yandex.ru; 35, Priborostroitel'naya str., 302015, Oryol, Russia.

References

1. Xu S., Qian Y., Hu R.Q. Reliable and resilient access network design for advanced metering infrastructures in smart grid. *IET Smart Grid*. 2018. pp. 1–7.
2. Xu S., Qian Y., Hu R.Q. A data-driven preprocessing scheme on anomaly detection in big data applications. Proc. in 2017 IEEE Conf. on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). 2017. pp. 785.
3. Ye F. et al. Reliable energy-efficient uplink transmission for neighborhood area networks in smart grid'. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2015. vol. 6(5). pp. 2179–2188.
4. Ye F., Qian Y., Hu R.Q. Energy efficient self-sustaining wireless neighborhood area network design for smart grid. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2015. vol. 6(1). pp. 220–229.
5. Ye F. et al. Design and analysis of a wireless sensor based monitoring network for transmission lines in smart grid'. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 2016. vol. 16(10). pp. 1209–1220.
6. Xu S., Qian Y. Quantitative study of reliable communication infrastructure in smart grid NAN'. Proc. in Design of Reliable Communication Networks. 2015. pp. 9394.
7. Zuev K.M., Wu S., Beck J.L. Network reliability problem and its efficient solution by Subset Simulation. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2015. vol. 40. pp. 25–35.
8. Zhang H.C. et al. Connection effect on amplitude death stability of multi-module floating airport. *Ocean Eng.* 2017. pp. 46–56.
9. Pino W., Gomes T., Kooij R. A Comparison between Two All-Terminal Reliability Algorithms. *Journal of Advances in Computer Networks*. 2015. vol. 3. no. 4. pp. 284–290.
10. Chaturvedi S.K. Network Reliability Measures and Evaluation. Scrivener Publishing LLC. 2016. 237 p.
11. Raigorodskiy A.M. [Random graph models and their applications]. *Trudy MFTI – Proceedings of MIPT*. 2010. Issue 2. vol. 4. pp. 130–140. (In Russ.).
12. GOST R 53111–2008. [Stability of the public communication network. Requirements and verification methods]. M.: Standardinform. 2009. 16 p. (In Russ.).
13. Ostreikovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti* [Reliability Theory]. M.: Vyssh. shk. 2003. 463 p. (In Russ.).
14. Paredes R. Network Reliability Estimation in Theory and Practice // Preprint submitted to Reliability Engineering & System Safety. 2018. 26 p.
15. Zykov A.A. *Osnovy teorii grafov* [Fundamentals of graph theory]. M: Nauka. 1987. 384 p. (In Russ.).
16. Batenkov K.A., Batenkov A.A., Fokin A.B. [Methods for generating sets of telecommunication network States for various connectivity measures]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2020. Issue 3(19). pp. 644–673 (In Russ.).
17. Batenkov K.A. [Accurate and boundary estimates of the connectivity probabilities of communication networks based on the method of full iteration of typical States]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2019. Issue 18(5). pp. 1093–1118. (In Russ.).
18. Ahmad S.H. Enumeration of Minimal Cutsets of an Undirected Graph. *Microelectronics Reliability*. 1990. vol. 30(1). pp. 23–26.

19. Magnus J.R., Neudecker H. *Matrichnoe differencial'noe ischislenie s prilozheniyami k statistike i ekonometrike* [Matrix Differential Calculus with Applications in Statistics and Econometrics]. M.: FIZMATLIT. 2019. 482 p. (In Russ.).
20. Mishra R.A. Cutsets based Unified Framework to Evaluate Network Reliability Measures. *IEEE Transaction on Reliability*. 2009. vol. 56(4). pp. 658–666.
21. Mishra R. Global Reliability Evaluation using g-Minimal Cutsets / R. Mishra, S. K. Chaturvedi. *International Journal of Performability Engineering*. 2009. vol. 5(3). pp. 251–258.
22. Gharavi H., Hu B. Multigate communication network for smart grid. *Proc. IEEE*. 2011. vol. 99(6). pp. 1028–1045.
23. Lin M., Ting C. A polynomial-time algorithm for computing K-terminal residual reliability of d-trapezoid graphs'. *Inf. Process. Lett.* 2015. vol. 115(2). pp. 371–376.
24. Paredes R. Network Reliability Estimation in Theory and Practice. Preprint submitted to Reliability Engineering & System Safety. 2018. 26 p.
25. Housni K. An Efficient Algorithm for Enumerating all Minimal Paths of a Graph. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2019. vol. 10. pp. 450–460.
26. Lin Y.K., Yeh C.T. Determine the optimal double-component assignment for a stochastic computer network. *Omega*. 2012. vol. 40. no. 1. pp. 120–130.
27. Lin Y.K. A novel algorithm to evaluate the performance of stochastic transportation systems. *Expert Systems with Applications*. 2010. vol. 37. no. 2. pp. 968–973.
28. Bai G.H., Tian Z.G., Zuo M.J. An improved algorithm for finding all minimal paths in a network. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016. vol. 150. pp. 1–10.
29. Batenkov K.A. [Numerical characteristics of the structures of communication networks]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2017. vol. 4(53). pp. 5–28. (In Russ.).
30. Batenkov K.A., Batenkov A.A. [Analysis and synthesis of communication network structures based on deterministic stability indicators]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2018. vol. 3(58). pp. 128–159. (In Russ.).
31. Batenkov K.A. [Synthesis of deterministic nonlinear discrete mappings of continuous communication channels]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 2(45). pp. 75–101. (In Russ.).
32. Zuev K.M., Wu S., Beck J.L. Network reliability problem and its efficient solution by Subset Simulation. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2015. vol. 40. pp. 25–35.
33. Zhang H.C. et al. Connection effect on amplitude death stability of multi-module floating airport. *Ocean Eng.* 2017. pp. 46–56.
34. Pino W., Gomes T., Kooij R. A Comparison between Two All-Terminal Reliability Algorithms. *Journal of Advances in Computer Networks*. 2015. vol. 3. no. 4. pp. 284–290.
35. Silva J. et al. An effective algorithm for computing all-terminal reliability bounds'. *Networks*. 2015. vol. 66(4). pp. 282–295.
36. Pino W., Gomes T., Kooij R. A Comparison between Two All-Terminal Reliability Algorithms. *Journal of Advances in Computer Networks*. 2015. vol. 3. no. 4. pp. 284–290.

М.В. БОБЫРЬ, А.Е. АРХИПОВ, А.С. ЯКУШЕВ
**РАСПОЗНАВАНИЕ ОТТЕНКА ЦВЕТОВОЙ МЕТКИ НА
ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ**

Бобырь М.В., Архипов А.Е., Якушев А.С. Распознавание оттенка цветовой метки на основе нечёткой кластеризации.

Аннотация. Рассматривается задача определения текущего положения пневматических исполнительных механизмов. Решение поставленной задачи достигается введением системы технического зрения, позволяющей на основе метода нечеткой кластеризации определять в режиме реального времени координаты центра цветовой метки, установленной на исполнительных механизмах мехатронного комплекса и позицию её смещения. Целью работы является повышение точности распознавания цветовой метки для прецизионного позиционирования исполнительных механизмов мехатронного комплекса и повышение быстродействия дефазификатора за счет распараллеливания вычислительных процедур в нем.

Интеллектуализация процесса распознавания цветового оттенка производится на основе нечёткой кластеризации. Сначала строится нечеткая модель, позволяющая в зависимости от входных параметров интенсивности цвета по каждому из каналов RGB и составляющей цветового тона выделять на изображении заданный цвет. Затем осуществляется бинаризация цветного изображения и подавление шумов.

При моделировании нечеткой системы авторами были применены две модели дефазификации: на основе метода центра тяжести и на основе отношения площадей. Модель, реализованная на основе метода отношения площадей, позволяет убрать зоны нечувствительности, которые присутствуют в модели центра тяжести. Метод на основе отношения площадей определяет принадлежность пикселей к заданному цветовому тону, и после этого расположение цветовой метки в кадре изображения определяется на основе определения центра тяжести распознанных пикселей цветовой метки. В последующем, при перемещении исполнительного механизма в продольном направлении, система технического зрения определяет расположение цветовой метки в новом кадре. Разность положений цветовой метки на исходном и текущем изображениях позволяет определить расстояние смещения цветовой метки.

С целью исследования влияния шума на точность распознавания были использованы цифровые фильтры: медианный, Гауссовский, матричный и биномиальный. Анализ точности данных фильтров показал, что лучший результат получен при использовании Гауссовского фильтра. Оценка производилась на основе показателя сигнал-шум. Реализация математической модели распознавания цветовой метки выполнена в среде Matlab/Simulink. Экспериментальные исследования работоспособности системы технического зрения с предложенной нечёткой моделью кластеризации проводились на пневматическом мехатронном комплексе. В ходе экспериментов на корпусе цилиндра закреплялась цветровая метка, после чего цилиндр перемещался по направляющим в продольном направлении. В процессе перемещения выполнялась видеофиксация и распознавание изображений. Для определения точности распознавания цветовой метки рассчитаны коэффициенты PSNR и RMSE, которые составили 38,21 и 3,14 соответственно. Точность определения смещения на основе разработанной модели распознавания цветových меток достигла 99,7 %. Быстродействие дефазификатора увеличилось до 590 нс.

Ключевые слова: нечёткая кластеризация, распознавание цветового оттенка, нечёткая логика, RMSE, PSNR, MAPE

1. Введение. В настоящее время в условиях развития вычислительных устройств и современных средств автоматизации особая роль

в гибких автоматизированных производствах (ГАП) уделяется вопросам определения текущего местоположения исполнительных механизмов мехатронных комплексов. Как правило, в современных мехатронных комплексах для определения их местоположения используются герконовые датчики, которые передают показания управляющему контроллеру. Контроллер, обрабатывая полученные данные, фиксирует местоположения исполнительных механизмов. При таком построении ГАП требуется большое количество следящих датчиков, но главным недостатком подобных систем управления является то, что они позволяют фиксировать местоположение исполнительных механизмов только в тех местах, где они установлены, так как данные датчики обладают инерционностью. Герконовый датчик представляет собой герконовый контакт, который срабатывает от воздействия магнита. Магнит в пневматических системах закрепляется внутри исполнительных механизмов (такие как пневматические цилиндры). Герконовые датчики имеют широкий пространственный диапазон срабатывания, т.е. геркон сработает при приближении магнита на определенном расстоянии и будет замкнутым продолжительное время при перемещении цилиндра. Как результат - цилиндр может проехать нужное нам положение, поэтому точность позиционирования за счет герконов не велика.

Для повышения быстродействия подобных систем в ГАП используются системы технического зрения (СТЗ). Сфера применения СТЗ широкая, например, они позволяют распознавать речь человека и преобразовывать её в управляющие сигналы [1]. Требования, предъявляемые к СТЗ, установленным в робототехнических комплексах, детально рассмотрены в работах [2, 3, 4]. В статье [5] предлагается метод распознавания фрагментированных изображений листьев, основанный на сумме признаков и объединении нечетких цветовых и краевых текстурных гистограмм. Для распознавания используется цветовая и фактурная техника, причем используются все три цветовые характеристики: тон (H – hue), насыщенность (S – saturation) и значение (V – value). Задача распознавания и выделения цветовых оттенков в СТЗ актуальна и рассмотрена в следующих работах [6, 7, 8]. Активно ведутся научные исследования, связанные с повышением точности распознавания изображений, некоторые алгоритмы рассмотрены в работах [9-12]. Их использование оправдано наличием шумов в получаемых изображениях [13-15].

Одним из возможных решений задачи распознавания цветовых меток является использование дескрипторов FAST или FAST-ER [16, 17]. Указанные методы используют оригинальные меры на

основе определения суммы абсолютных разностей между центральной точкой и точками окружности. Это приводит к тому, что угловые точки распознаваемых прямоугольных меток будут неопределенны, поэтому их контур будет трудно выделить. Также при реализации дескрипторов FAST или FAST-ER в вычислениях используются операции, связанные с расчетом логарифмов и построением бинарных деревьев. Поэтому скорость вычисления в подобных алгоритмах составляет не менее нескольких миллисекунд. Для повышения быстродействия необходимо использовать многопостовую и конвейерную реализацию вычислений, например, использовать программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Следует отметить, что реализация логарифмических операций на ПЛИС затруднительна и будет выполняться более чем за несколько сотен тактовых импульсов генератора.

При построении нечетких систем особую роль играет выбор метода дефаззификации (например, метод центра тяжести; среднего, первого или последнего максимумов; центра сумм; высот). К недостаткам данных методов относят: влияние результата дефаззификации только на нечеткое множество с наибольшей степенью активации; сужение интервала дефаззификации; нечувствительность метода при активации только одной выходной функции принадлежности [18]. Устранение данных проблем возможно за счет применения модели отношения площадей [19, 20].

Нами была предпринята попытка использовать для распознавания цветowych меток нечеткую логику, позволяющую исключать в своей структуре сложные математические вычисления. С этой целью нами был реализован на ПЛИС дефаззификатор, позволяющий реализовать нечеткий вывод за 59 тактовых импульсов генератора. В результате время его работы составило 590 нс [21].

При обработке изображений неизбежно возникают шумы, искажающие обрабатываемое и исходное изображения. Для компенсации шумов используются различные фильтры. В нашей работе мы исследовали четыре цифровых фильтра для фильтрации шумов на видеоизображениях и оценивали их на основе коэффициентов MARE и Accuracy. Также был разработан экспериментальный вычислительный комплекс, который позволил на основе предложенной модели нечеткой кластеризации цветов определять реальные координаты местоположения исполнительных механизмов мехатронного комплекса в режиме реального времени.

2. Постановка задачи. Поставим задачу повышения точности исполнительных механизмов мехатронного комплекса на основе

оценки показателей MAPE (Mean Absolute Percentage Error – средняя абсолютная ошибка в процентах) и Accuracy, рассчитываемых по формулам:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|L_i - L_{\text{set}i}|}{L_i} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$(1 - \text{MAPE}) \cdot 100 \rightarrow 100\%, \quad (2)$$

где L_i – расстояние смещения цветовой метки, определенное СТЗ; $L_{\text{set}i}$ – фактическое расстояние смещение цветовой метки; n – число измерений в эксперименте; i – номер измерения ($i = 1 \dots n$).

Также поставим задачу повышения точности распознавания цветовой метки на основе оценивания коэффициентов PSNR (Peak Signal-To-Noise Ratio – пикового отношения сигнал/шум) и RMSE (Root Mean Square Error – корень из среднеквадратичной ошибки), вычисляемые по формулам:

$$\text{PSNR} = 20 \log \left(\frac{\text{MAX}}{\text{RMSE}} \right) \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{hw} \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^w (I_{Fij} - I_{Fsetij})^2} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где MAX – максимальное значение пикселя из значений RGB (для 8-ми битного изображения MAX = 255); w – ширина кадра в пикселях; h – высота кадра в пикселях; I_{Fij} – значение бинаризованного пикселя после фильтрации с координатами i, j ; I_{Fsetij} – эталонное значение бинаризованного пикселя с координатами i, j .

Следует отметить, что с помощью формулы (3) определялось отношение количества точек на эталонном изображении и количество точек, которое определялось с помощью нашего метода. При этом источником шума является ПЗС (CMOS) матрица видеокамеры.

При фильтрации изображения использовалась следующая формула:

$$I_F = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{l=1}^3 \sum_{p=1}^3 I_{Bl,p} \cdot \frac{MAX+1}{k} \cdot m_{l,p} \geq T \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (5)$$

где I_F – значение бинаризованного пикселя после фильтрации; $I_{Bl,p}$ – значение бинаризованного пикселя; l, p – размеры окна фильтрации (3x3); k – коэффициент, позволяющий привести значения к диапазону от 0 до 1; T – пороговое значение; $m_{l,p}$ – матричные коэффициенты фильтров; 256 – коэффициент, использующийся для перевода вещественных чисел диапазона от 0 до 1 в целочисленные значения в диапазоне от 0 до 256.

Числовые значения матричных коэффициентов фильтров сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Значения матричных коэффициентов фильтров $m_{l,p}$

Тип филь-тра	Логический	Линейный		
	Медианный	Матричный	Гауссовский	Биномиальный
к	1	16	6	2.6
Матричные коэффициенты филь-тра	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.75 & 0.5 \\ 0.75 & 1 & 0.75 \\ 0.5 & 0.75 & 0.5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0.2 & 1 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix}$
Порог	$T \in [2, 8]$	$T \in [60, 120]$	$T \in [60, 120]$	$T \in [110, 170]$

Следует уточнить, что для логического медианного фильтра умножение на 256 не производится. В остальных трех фильтрах параметр k применяется для нормализации значений, полученных после фильтрации в один диапазон. Например, для Гауссовского фильтра k определяется суммой коэффициентов матрицы, например, $k=(4 \cdot 0.5+4 \cdot 0.75+1)=6$.

Также следует уточнить, что мы используем логический медианный фильтр, который не соответствует классическому определению, но это действительно медианный фильтр, представленный в виде матрицы для унификации представления фильтра. В классическом медианном фильтре значения отсчетов внутри окна сортируются в порядке возрастания и в качестве выхода фильтра берется значение, находящееся в середине списка. В нашем случае фильтрация применяется к бинарному изображению, где используется два логических значения «0» и «1». Поэтому в логическом медианном фильтре нет необходимости в сортировке – значение на выходе

фильтра зависит только от количества единичных значений в сетке размером 3×3 . Более того, за счет варьирования порогового значения T существует возможность выбирать в качестве значения фильтра не только средний элемент, но и предыдущий или последующий.

3. Метод распознавания цветовой метки и вычисления её смещения. Рассмотрим математическую нечёткую MISO-модель кластеризации распознавания цветового оттенка. Её входными параметрами являются три основных цвета и значение тона R, G, B, H (красный, зеленый, синий, цветовой тон) [18, 19]. Выходная переменная – CS (цветовой оттенок до кластеризации, color shade). Для входных переменных выбраны функции принадлежности треугольного вида, а для выходной – синглтонной формы. Для распознавания цветового оттенка используются две модели: RGB и HSV . Конвертация из RGB выполняется по формуле, представленной в работе [19].

Обоснование выбора переменной H для нечеткой модели заключается в следующем. Если рассмотреть палитру цветов (например, с помощью программы Paint), то для одного и того же диапазона величин цветового оттенка H видно, (например, для розового цвета) что цвет меняет оттенок от насыщенного розового до серого. Также для одного и того же диапазона величин H яркость будет меняться в зависимости от освещенности времени суток (например, утром, днем и вечером уровень освещенности цветовой метки будет разным), такие же изменения будут происходить при наличии различных источников света). Поэтому при использовании только 3-х основных цветов (RGB) экспериментальным путем мы установили, что возникает шум, который приводит к тому, что точность определения цвета не превышает 60%.

Распознавание цветового оттенка производится за шесть шагов.

Шаг 1. Формирование функций принадлежности.

Входная переменная R (0-256) разделена на три нечетких набора: [низкая (R_1), средняя (R_2), высокая (R_3)] и $R = [R_1; R_2; R_3]$, выражается в векторной форме. На рисунке 1а представлены функции принадлежности для переменной R .

Пример получения функции принадлежности входного параметра R рассчитывается по формуле (6):

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \begin{cases} 0, & R \leq 0; \\ \frac{R-0}{64-0}, & 0 \leq R \leq 64; \\ \frac{128-R}{128-64}, & 64 \leq R \leq 128; \\ 0, & 128 \leq R. \end{cases} \\
 R_2 &= \begin{cases} 0, & R \leq 64; \\ \frac{R-64}{128-64}, & 64 \leq R \leq 128; \\ \frac{196-R}{196-128}, & 128 \leq R \leq 196; \\ 0, & 196 \leq R. \end{cases} \\
 R_3 &= \begin{cases} 0, & R \leq 128; \\ \frac{R-128}{196-128}, & 128 \leq R \leq 196; \\ \frac{256-R}{256-196}, & 196 \leq R \leq 256; \\ 0, & 256 \leq R. \end{cases}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Входная переменная G (0-256) разделена на три нечетких набора: [низкая (G_1), средняя (G_2), высокая (G_3)] и $G = [G_1; G_2; G_3]$, выражается в векторной форме. На рисунке 1б представлены функции принадлежности для переменной G . Входная переменная B (0-256) разделена на три нечетких набора: [низкая (B_1), средняя (B_2), высокая (B_3)] и $B = [B_1; B_2; B_3]$, выражается в векторной форме. На рисунке 1в представлены функции принадлежности для переменной B . Входная переменная H (0-360) разделена на три нечетких набора: [низкая (H_1), средняя (H_2), высокая (H_3)] и $H = [H_1; H_2; H_3]$, выражается в векторной форме. На рисунке 1г представлены функции принадлежности для переменной H .

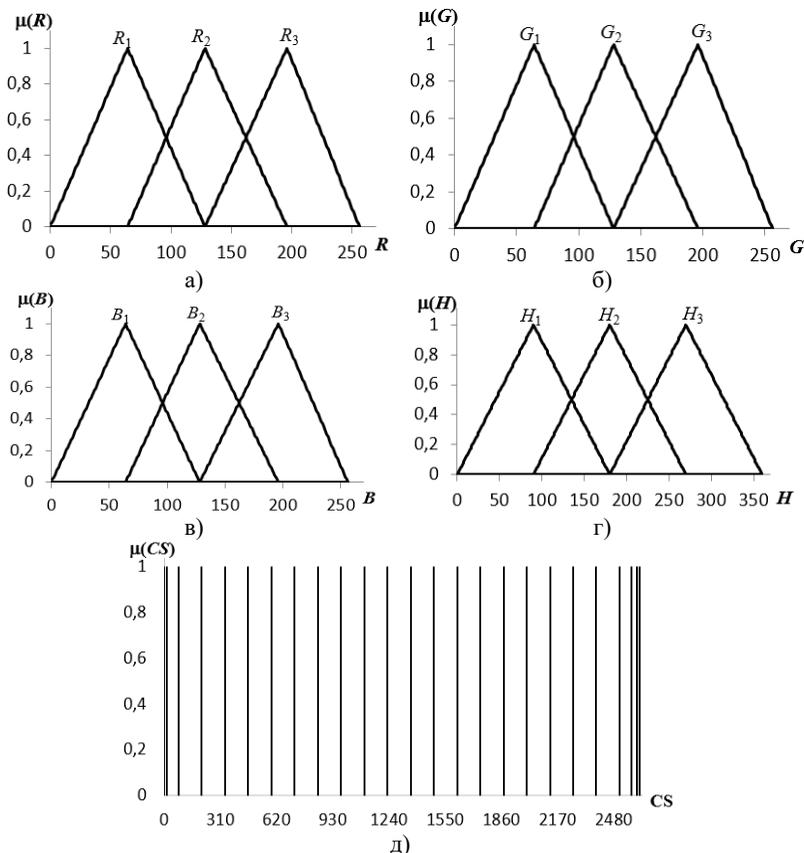


Рис. 1. Графики функций принадлежности для параметров: а) R , б) G , в) B , г) H , д) CS

Выходная переменная CS (цветовой оттенок после кластеризации) разделена на 25 нечетких наборов: [красный (CS_1), красный (CS_2), красный (CS_3), оранжевый (CS_4), оранжевый (CS_5), жёлтый (CS_6), жёлтый (CS_7), зелёный (CS_8), зелёный (CS_9), голубой (CS_{10}), голубой (CS_{11}), синий (CS_{12}), синий (CS_{13}), синий (CS_{14}), фиолетовый (CS_{15}), фиолетовый (CS_{16}), фиолетовый (CS_{17}), розовый (CS_{18}), розовый (CS_{19}), розовый (CS_{20}), розовый (CS_{21}), розовый (CS_{22}), розовый (CS_{23}), розовый (CS_{24}), розовый (CS_{25})] и $CS = [CS_1; CS_2; CS_3; CS_4; CS_5; CS_6; CS_7; CS_8; CS_9; CS_{10}; CS_{11}; CS_{12}; CS_{13}; CS_{14}; CS_{15}; CS_{16}; CS_{17}; CS_{18}; CS_{19}; CS_{20}; CS_{21}; CS_{22}; CS_{23}; CS_{24}; CS_{25}]$, выражается в векторной форме.

Шаг 2. Синтез нечётких правил. Нечёткие правила задаются в виде:

If R is R_i , G is G_i , B is B_i , H is H_i , Then CS is CS_i .

В упрощенном виде правила представляются в форме $R_i, G_i, B_i, H_i, \rightarrow CS_i$. Учитывая рекомендации [16], число нечетких правил для модели составило $r^k=3^4=81$ (где r – количество функций принадлежности у нечеткой переменной, k – количество нечетких переменных). С учетом правила нечеткой композиции восемьдесят одно нечеткое правило сворачивается на двадцать пять уровней кластеризации (см. формулу 7):

$$\begin{aligned}
 M_1 &= (\min(R_1, G_1, B_1, H_1)); \\
 M_2 &= (\min(R_2, G_1, B_1, H_1)); \\
 M_3 &= \max(\min(R_3, G_1, B_1, H_1); \min(R_1, G_2, B_1, H_1)); \\
 M_4 &= \max(\min(R_1, G_1, B_2, H_1); \min(R_2, G_2, B_1, H_1)); \\
 M_5 &= \max(\min(R_2, G_1, B_2, H_1); \min(R_3, G_2, B_1, H_1); \min(R_1, G_3, B_1, H_1)); \\
 M_6 &= \max(\min(R_3, G_1, B_2, H_1); \min(R_1, G_2, B_2, H_1); \min(R_2, G_3, B_1, H_1)); \\
 M_7 &= \max(\min(R_1, G_1, B_3, H_1); \min(R_2, G_2, B_2, H_1); \min(R_3, G_3, B_1, H_1); \min(R_1, G_1, B_1, H_2)); \\
 M_8 &= \max(\min(R_2, G_1, B_3, H_1); \min(R_3, G_2, B_2, H_1); \min(R_1, G_3, B_2, H_1); \min(R_2, G_1, B_1, H_2)); \\
 M_9 &= \max(\min(R_3, G_1, B_3, H_1); \min(R_1, G_2, B_3, H_1); \min(R_2, G_3, B_2, H_2); \\
 &\quad \min(R_3, G_1, B_1, H_2); \min(R_1, G_2, B_1, H_2)); \\
 M_{10} &= \max(\min(R_2, G_2, B_3, H_1); \min(R_3, G_3, B_2, H_1); \min(R_1, G_1, B_2, H_2); \min(R_2, G_2, B_1, H_2)); \\
 M_{11} &= \max(\min(R_3, G_2, B_3, H_1); \min(R_1, G_3, B_3, H_1); \min(R_2, G_1, B_2, H_2); \\
 &\quad \min(R_3, G_2, B_1, H_2); \min(R_1, G_3, B_1, H_2)); \\
 M_{12} &= \max(\min(R_2, G_3, B_3, H_1); \min(R_3, G_1, B_2, H_2); \min(R_1, G_2, B_2, H_2); \min(R_2, G_3, B_1, H_2)); \\
 M_{13} &= \max(\min(R_3, G_3, B_3, H_1); \min(R_1, G_1, B_3, H_2); \min(R_2, G_2, B_2, H_2); \\
 &\quad \min(R_3, G_3, B_1, H_2); \min(R_1, G_1, B_1, H_3)); \\
 M_{14} &= \max(\min(R_2, G_1, B_3, H_2); \min(R_3, G_2, B_2, H_2); \min(R_1, G_3, B_2, H_2); \\
 &\quad \min(R_2, G_1, B_1, H_3)); \\
 M_{15} &= \max(\min(R_3, G_1, B_3, H_2); \min(R_1, G_2, B_3, H_2); \min(R_2, G_3, B_2, H_2); \\
 &\quad \min(R_3, G_1, B_1, H_3); \min(R_1, G_2, B_1, H_3)); \\
 M_{16} &= \max(\min(R_2, G_2, B_3, H_2); \min(R_3, G_3, B_2, H_2); \min(R_1, G_1, B_2, H_3); \min(R_2, G_2, B_1, H_3)); \\
 M_{17} &= \max(\min(R_3, G_2, B_3, H_2); \min(R_1, G_3, B_3, H_2); \min(R_2, G_1, B_2, H_3); \\
 &\quad \min(R_3, G_2, B_1, H_3); \min(R_1, G_3, B_1, H_3)); \\
 M_{18} &= \max(\min(R_2, G_3, B_3, H_2); \min(R_3, G_1, B_3, H_3); \min(R_1, G_2, B_2, H_3); \\
 &\quad \min(R_2, G_3, B_1, H_3)); \\
 M_{19} &= \max(\min(R_3, G_3, B_3, H_2); \min(R_1, G_1, B_3, H_3); \min(R_2, G_2, B_2, H_3); \\
 &\quad \min(R_3, G_3, B_1, H_3)); \\
 M_{20} &= \max(\min(R_2, G_1, B_3, H_3); \min(R_3, G_2, B_2, H_3); \min(R_1, G_3, B_2, H_3)); \\
 M_{21} &= \max(\min(R_3, G_1, B_3, H_3); \min(R_1, G_2, B_3, H_3); \min(R_2, G_3, B_2, H_3)); \\
 M_{22} &= \max(\min(R_2, G_2, B_3, H_3); \min(R_3, G_3, B_2, H_3)); \\
 M_{23} &= \max(\min(R_3, G_2, B_3, H_3); \min(R_1, G_3, B_3, H_3)); \\
 M_{24} &= (\min(R_2, G_3, B_3, H_3)); \\
 M_{25} &= (\min(R_3, G_3, B_3, H_3)).
 \end{aligned}$$

Шаг 3. Вычисление чёткого значения цветового оттенка CS до кластеризации. Для решения этой задачи возможно использовать различные методы дефаззификации [23, 24, 2,]:

– дефаззификатор на основе метода центра тяжести:

$$CS = \frac{\sum_{i=1}^{25} M_i \cdot CS_i}{\sum_{i=1}^{25} M_i}; \quad (7)$$

– дефаззификатор на основе метода отношения площадей [18, 19]:

$$CS = \begin{cases} CS_{25} - \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^{25} M_i}{n} \right) \cdot (CS_{25} - CS_1) \right) & \text{если } R > 128 \\ \left(\left(\frac{\sum_{i=1}^{25} M_i}{n} \right) \cdot (CS_{25} - CS_1) \right) + CS_1, & \text{если } R < 128 \end{cases}, \quad (8)$$

где CS_i – границы цветового оттенка до кластеризации согласно цветовому спектру (Таблица 1, столбец «Граница»).

Поясним вывод формулы (8).

1. Определение общей площади функций принадлежности выходной переменной $S_{\text{общ}}$. Используя выражение для расчета площади треугольника получим:

$$S_{\text{общ}} = n \cdot \frac{h \cdot b_1}{2},$$

где n – число термов выходной функции принадлежности ($n = 25$), h – высота функции принадлежности ($h = 1$); b_1 – основание функции принадлежности (для треугольной функции принадлежности) или разность между границами соседних термов (для синглтонных функций принадлежности, см. рис. 1д).

Для нашего примера формула примет вид $S_{общ} = n \cdot \frac{CS_i - CS_{i-1}}{2}$.

Пусть расстояние между границами одинаково, тогда $b_i = CS_i - CS_{i-1}$

$$\text{и } S_{общ} = \frac{nb_i}{2}.$$

2. Расчет общей площади фигуры выходной переменной после усечения термов выходной функции принадлежности, то есть после реализации формулы (7):

$$S_{общ_усеч} = \sum_{i=1}^{25} \left(\frac{M_i \cdot (CS_i - CS_{i-1})}{2} \right) = \frac{\sum_{i=1}^{25} M_i \cdot (CS_i - CS_{i-1})}{2} = \frac{\sum_{i=1}^{25} M_i \cdot b_i}{2}.$$

3. Вычисление отношения общей площади к площади усеченной фигуры:

$$D = \frac{S_{общ_усеч}}{S_{общ}} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{25} M_i \cdot b_i}{2}}{\frac{nb_i}{2}} = \frac{\sum_{i=1}^{25} M_i}{n}.$$

4. Дефаззификация четкого значения по формуле:

$$CS = [D \cdot (CS_{25} - CS_1)] + CS_1.$$

Окончательная формула для дефаззификации имеет вид (8).

При вычислении цветового оттенка по формуле (7) проявляются зоны нечувствительности нечеткой системы для выходной переменной CS, из-за чего выходная переменная не определяется во всем имеющемся для нее диапазоне. Данный недостаток отчетливо виден на рисунке 6а. Во временном диапазоне от 20 до 25 график выходной переменной в зоне розового оттенка уплотнен. Второй метод (формула 8.2) исправляет данный недостаток, что отчетливо видно на рисунке 6б.

Шаг 4. Нечёткая кластеризация. Рассчитав на шаге 3 четкое значение CS, получается числовое значение, принадлежащее диа-

пазону выходной переменной. Для однозначного определения цветового оттенка (CS_{ci}) используется нечёткая кластеризация [18] с помощью формулы (9):

$$CS_{ci} = \text{Если}(CS_i \geq CS) \text{ и } (CS < CS_{i+1}), \text{ то } CS_{ci}, \text{ иначе } CS_i, \quad (9)$$

где i – текущая граница цветового оттенка, располагающаяся в диапазоне от 1 до n .

Границы цветовых оттенков после кластеризации представлены в таблице 2.

Таблица 2. Границы цветового оттенка после кластеризации для красного, оранжевого, желтого, зеленого, голубого, синего, фиолетового, розового

Тон	№ границы	Граница	Тон	№ границы	Граница
красный	CSc ₁	0	синий	CSc ₁₄	1488
красный	CSc ₂	16	фиолетовый	CSc ₁₅	1616
красный	CSc ₃	80	фиолетовый	CSc ₁₆	1744
оранжевый	CSc ₄	208	фиолетовый	CSc ₁₇	1872
оранжевый	CSc ₅	336	розовый	CSc ₁₈	2000
жёлтый	CSc ₆	464	розовый	CSc ₁₉	2128
жёлтый	CSc ₇	592	розовый	CSc ₂₀	2256
зелёный	CSc ₈	720	розовый	CSc ₂₁	2384
зелёный	CSc ₉	848	розовый	CSc ₂₂	2512
голубой	CSc ₁₀	976	розовый	CSc ₂₃	2576
голубой	CSc ₁₁	1104	розовый	CSc ₂₄	2608
синий	CSc ₁₂	1232	розовый	CSc ₂₅	2624
синий	CSc ₁₃	1360	красный	CSc ₂₆	2700

Примечание. С целью учета цикличности цветового оттенка для расчета красной метки, базу правил необходимо дополнить границей CSc₂₆, при этом четкое значение границы необходимо уточнить экспериментально.

После определения цвета у метки на изображении возможно определить расстояние смещения цветовой метки относительно ее исходного кадра с помощью метода центра тяжести цветовой метки, определяющего центр цветовой метки. Для этого необходимо выполнить последовательность из 4 шагов.

Шаг 1. Бинаризация кластеризованного изображения по формуле (10):

$$I_{B;ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } CS_{ci} = CS_{25} \text{ (искомый цвет)} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (10)$$

где i – координата бинаризированной точки по оси Y ; j – координата бинаризированной точки по оси X .

Шаг 2. Фильтрация бинаризованного изображения по одной из формул (5).

Шаг 3. Вычисление центра тяжести цветовой метки:

$$\begin{aligned} \text{если } I_{F;ij} = 1, \text{ тогда } X &= \frac{\sum_{j=1}^h j}{\sum}; \\ \text{если } I_{F;ij} = 1, \text{ тогда } Y &= \frac{\sum_{i=1}^w i}{\sum}, \end{aligned} \quad (11)$$

где X, Y – координаты центра цветовой метки; \sum – общее число бинаризованных точек с логическим значением «1».

Шаг 4. Вычисление расстояния смещения цветовой метки относительно исходного изображения (см. рис. 2):

$$L = \frac{X \cdot w_{\text{real}}}{w}, \quad (12)$$

где w_{real} – действительная ширина кадра в сантиметрах.

После выполнения последовательности вышеуказанных шагов определяется расстояние смещения цветовой метки относительно исходного изображения.

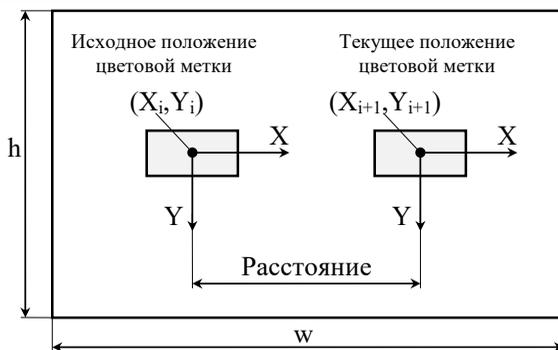


Рис. 2. Определение расстояния смещения цветовой метки

4. Имитационная модель устройства распознавания цветовой метки и её смещения. Авторами произведено моделирование нечеткой модели кластеризации цветовой метки в графической среде имитационного моделирования Matlab Simulink. На рисунке 3 представлена имитационная модель, реализующая распознавание цветового оттенка.

В блоке «Input» задаются диапазоны входных переменных: $R, G, B \in [0 \dots 256]$; $H \in [0 \dots 360]$. В блоках «Stepeni R», «Stepeni G», «Stepeni B», «Stepeni H» формируются функции принадлежности треугольного вида (см. формула 6). Реализация данной операции представлена на рисунке 4.

Реализация блоков «Subsystem 2» и «Subsystem 3» отличается только тем, что на вход блока «Subsystem 2» поступают вершины треугольника R_2 ($a_2 - 64$; $a_3 - 128$; $a_4 - 196$), а на вход блока «Subsystem 3» поступают вершины треугольника R_3 ($a_3 - 128$; $a_4 - 196$; $a_5 - 256$). Блоки «Stepeni G», «Stepeni B», «Stepeni H» реализуются аналогично блоку «Stepeni R», только на их вход подается текущее значение G, B, H и соответствующие вершины треугольников.

В объединённом блоке «Degree of truth and degree of activation» вычисляются степени истинности предпосылок нечетких правил и уровни нечетких заключений. В блоке «Degree of activation» вычисляются 25 уровней заключений нечетких правил ($M_1 \dots M_{25}$) по формуле (7). В блоке «Defuzzy1_2» реализована формула (7). Реализация формулы (9) представлена на рисунке 5, создается в блоке «Cluster 1».

На рисунке 6 представлен график значений цветового оттенка после кластеризации.

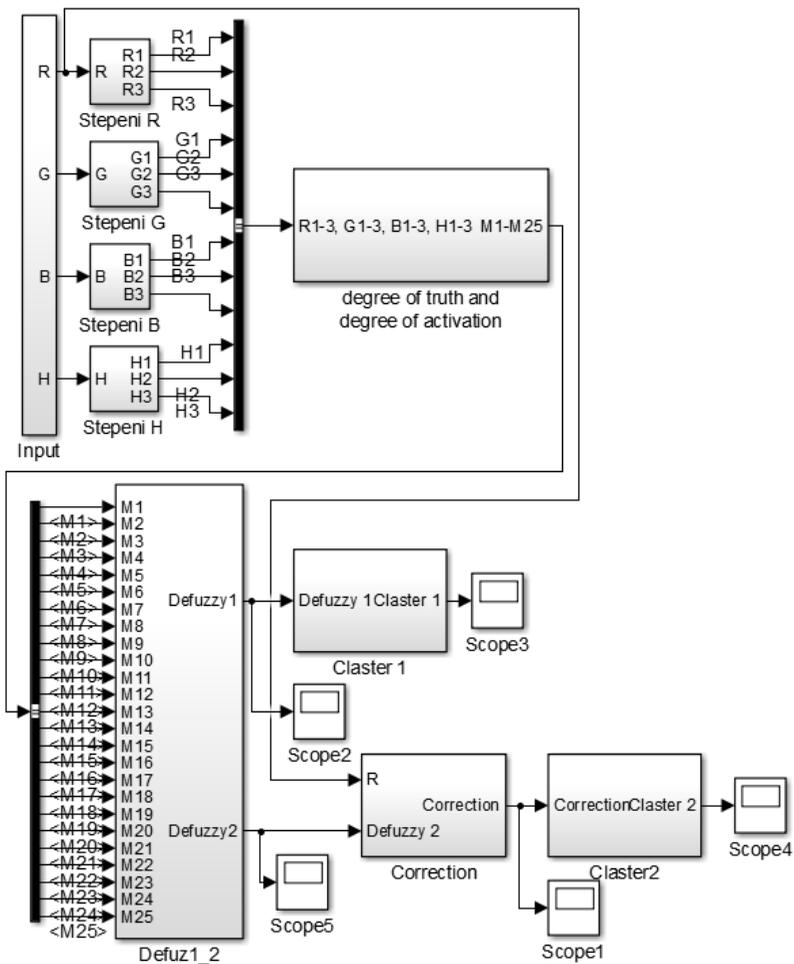


Рис. 3. Имитационная модель для распознавания цветовой метки

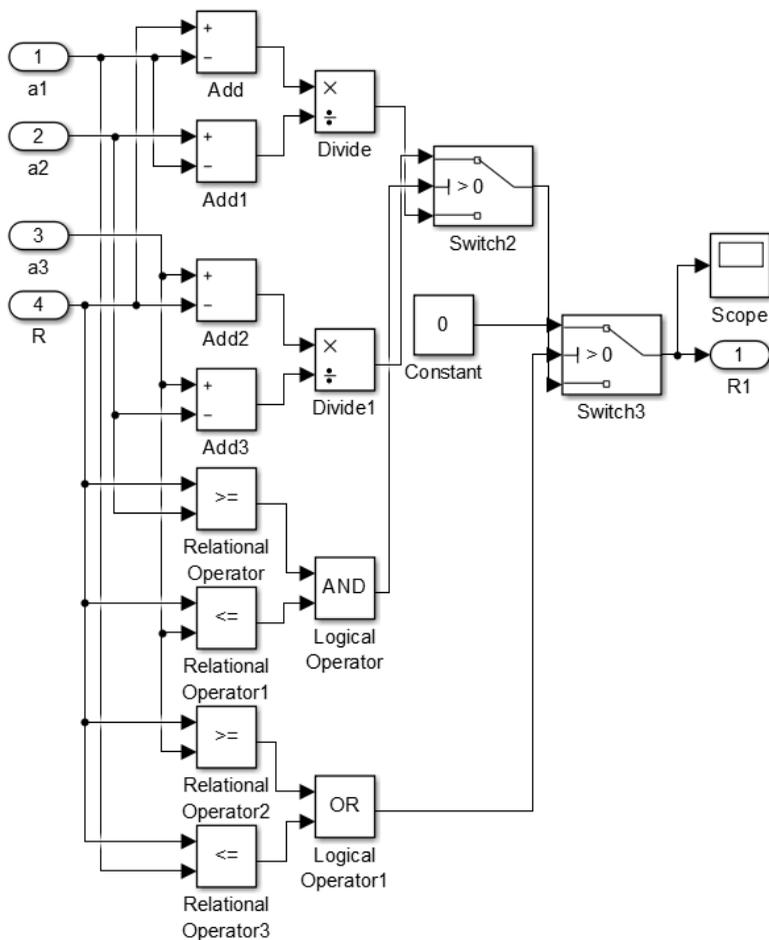


Рис. 4. Схема блока «Subsystem R1»

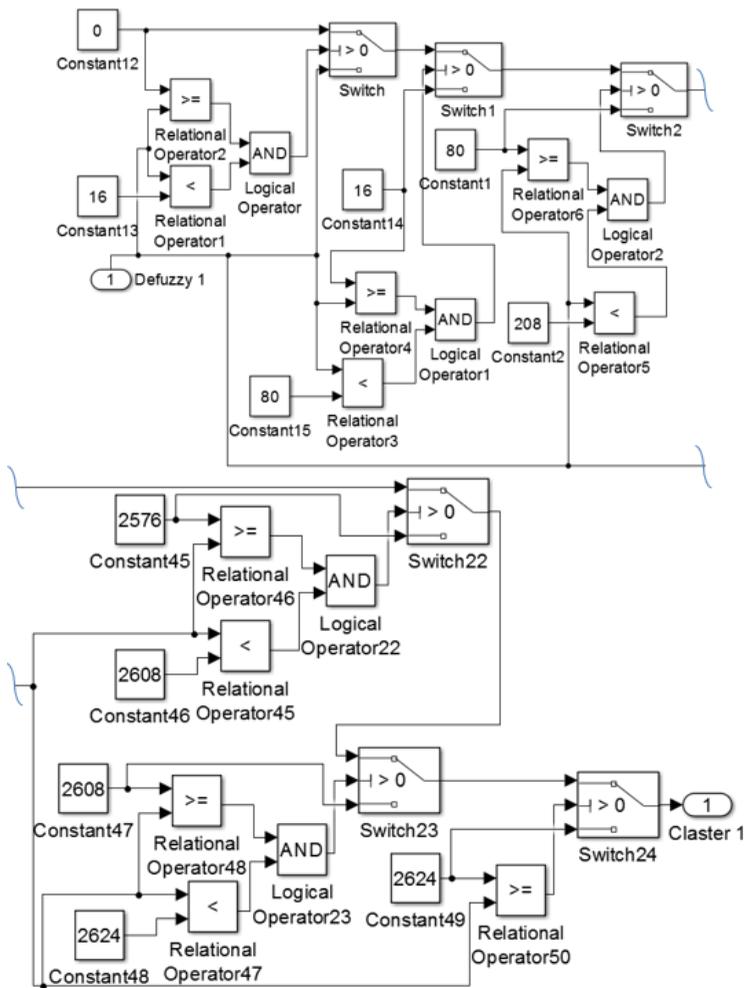


Рис. 5. Схема кластеризации для цветового оттенка

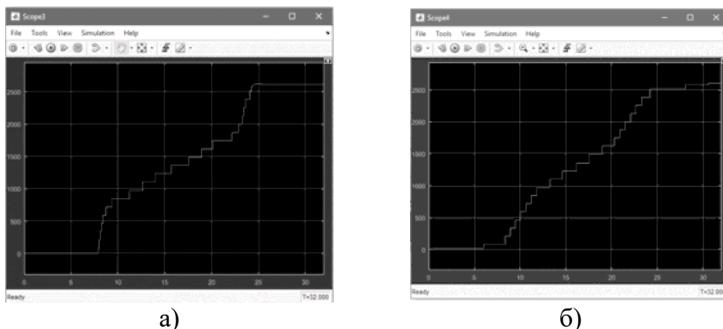


Рис. 6. Кластеризация цветового оттенка: а – кластеризация на основе формулы (7); б – кластеризация на основе формулы (8)

Как видно из рисунка ба, в зоне распознавания розового оттенка, диапазон от 20 до 25, наблюдается совмещение цветов, поэтому точность распознавания уменьшается. Для устранения данной проблемы производится коррекция, а именно используется дефаззификатор на основе метода отношения площадей, который вычисляется по формуле (8). Особенностью предложенного дефаззификатора является выправление его линейной передаточной характеристики путем введения в формулу (8) проверки условия нахождения одной из цветовой компоненты в середине диапазона возможных значений 8-ми битного изображения ($R > 128$). На рисунке 6б видно, что зона для распознавания цветового оттенка имеет более четкие границы. На рисунке 7 представлена реализация блока «Correction».

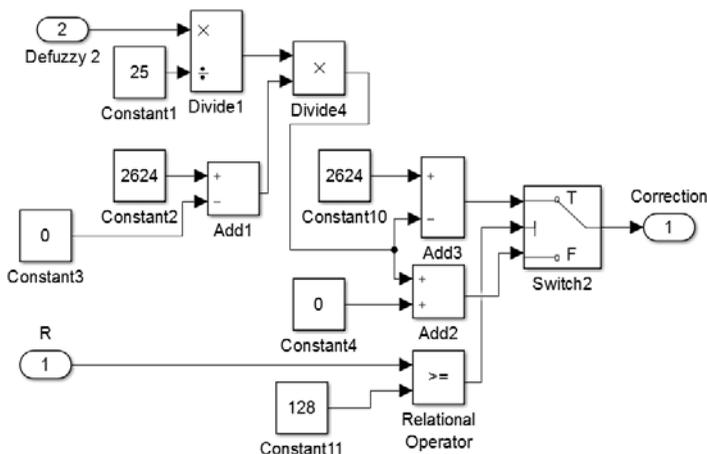


Рис. 7. Блок имитационной модели

После того как был определен цветовой оттенок, выполняются следующие действия: бинаризация изображений по формуле (10); фильтрация изображений по одной из формул (5); определение координат центров тяжести цветовой метки по формуле (11); масштабирование и определение расстояния между координатами центров тяжести цветовой метки исходного положения цветовой метки и текущего изображения по формуле (12).

5. Экспериментальные результаты. Практическое применение разработанной математической модели для определения цветового оттенка реализовано для пневматического мехатронного комплекса [21]. На пневматические исполнительные механизмы наклеивается прямоугольная цветная метка розового цвета (2×4 см). Перед пневматическим мехатронным комплексом устанавливается видеокамера, которая фиксирует положение исполнительных механизмов. Полученное изображение передается в компьютер, где в режиме реального времени происходит распознавание цветовой метки и определение ее расположения в кадре для исходного и последующих положений цилиндра. На рисунке 8 представлена экспериментальная установка.

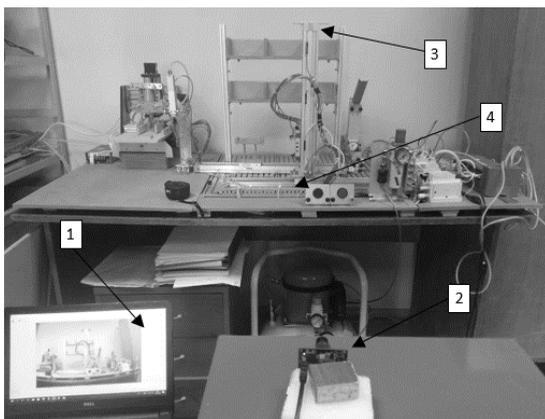


Рис. 8. Экспериментальная установка: 1- компьютер; 2- камера Pixu CMUcam5; 3 – цветная метка; 4 – бесштоковый цилиндр

Во время эксперимента фиксировалось перемещение цветовой метки на следующих расстояниях: 5 см, 10 см, 15 см, 20 см, 25 см, 30 см, 35 см (рис.9). Видеофиксация изображений производилась на видеокамеру Pixu CMUcam5. В ходе эксперимента было выполнено 100 замеров по каждому из положений.



Рис. 9. Перемещение распознаваемой цветовой метки

Затем на основе математической модели нечеткой кластеризации формулы (6)-(10) осуществлялось распознавание цветовой метки. На обработанных изображениях для устранения черных точек, не относящихся к цветовой метке, производится фильтрация по формуле (5). Для фильтрации были использованы четыре фильтра: медианный, Гауссовский, матричный и биномиальный. Для каждого фильтра изменялись пороговые значения: для медианного фильтра $T \in [2, 8]$; для Гауссовского фильтра $T \in [60, 120]$; для матричного фильтра $T \in [60, 120]$; для биномиального фильтра $T \in [110, 170]$. Результаты моделирования представлены на рисунке 10.

Оценка фильтрации выполнена с использованием двух коэффициентов пикового отношения сигнал/шум (PSNR), рассчитываемого по формуле (3) и среднеквадратичной ошибки (RMSE), рассчитываемой по формуле (4). Анализ графиков (рис. 10) показал, что наилучшие результаты для каждого из фильтров были получены при следующих пороговых значениях: для медианного фильтра $T = 4$; для гауссовского фильтра $T = 70$; для матричного фильтра $T = 90$; для биномиального фильтра $T = 130$.

В таблице 3 представлены результаты оценки фильтрации изображения с использованием наилучших пороговых значений для медианного, гауссовского, матричного и биномиального фильтров (формула 5). Анализ таблицы 3 показал, что наилучшие значения коэффициентов PSNR и RMSE были получены для Гауссовского фильтра.

Таблица 3. Сравнительный анализ фильтрации изображений

Длина, см	Без фильтрации		Медианный фильтр $T=4$		Гауссовский фильтр $T=70$		Матричный фильтр $T=90$		Биномиальный фильтр $T=130$	
	RMSE	PSNR	RMSE	PSNR	RMSE	PSNR	RMSE	PSNR	RMSE	PSNR
5	4,34	35,38	3,24	37,92	3,09	38,33	3,04	38,47	2,99	38,62
10	4,16	35,75	3,29	37,79	3,38	37,55	3,19	38,05	3,29	37,79
15	3,89	36,33	2,94	38,76	3,09	38,33	2,99	38,62	2,99	38,62
20	4,12	35,83	3,77	36,6	3,6	37	3,64	36,91	3,68	36,81
25	3,81	36,51	2,83	39,1	2,83	39,1	2,78	39,25	2,72	39,44
30	3,85	36,42	2,89	38,91	2,89	38,91	2,9	38,88	2,89	38,91
35	3,89	36,33	3,25	37,89	3,13	38,22	3,65	36,88	3,8	36,54
Среднее	4,01	36,08	3,17	38,14	3,14	38,21	3,17	38,15	3,19	38,1

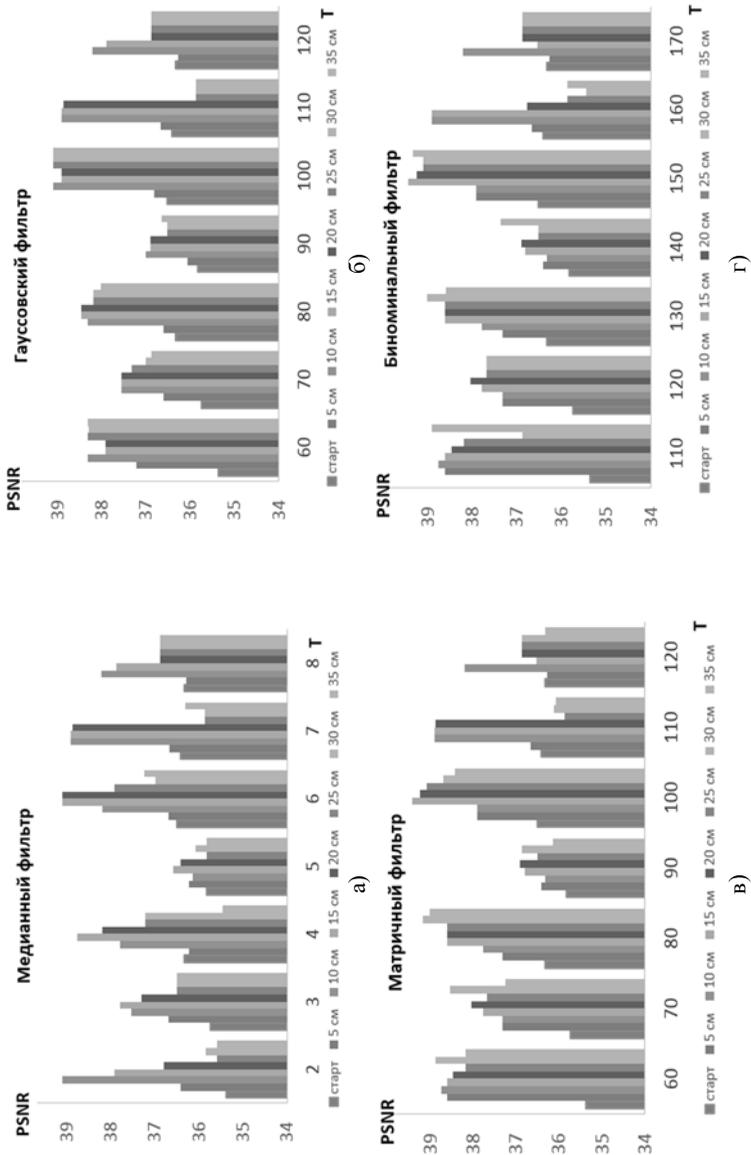


Рис. 10. Результаты оценивания фильтрации коэффициентом PSNR: а) медианный фильтр, б) Гауссовский (фильтр, в) матричный фильтр, г) биномиальный фильтр

При фильтрации удалялись точки, несоответствующие цветовой метке. После фильтрации определялись координаты центров тяжести цветовой метки (определение центра цветовой метки) на каждом изображении (исходном и текущем) по формуле (12). А по формуле (13) определялось расстояние смещения цветовой метки. Для определения точности вычисления расстояния смещения цветовой метки применяются коэффициенты MAPE и Accuracy, которые рассчитываются по формулам (1), (2). Результаты вычислений сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Экспериментальные данные

Размер, см	5	10	15	20	25	30	35
Min, см	4,89	9,95	15,01	19,9	24,99	29,7	34,85
Max, см	5,03	10,08	15,08	20,01	25,07	30,02	35,03
MAPE, %	0,0094	0,0034	0,0033	0,0022	0,0014	0,0065	0,0025
Accuracy, %	99,06	99,66	99,67	99,78	99,86	99,35	99,75

Анализ результатов таблицы 4 показал, что точность определения смещения цветовой метки составляет более 99%. Данная точность вычисления расстояния смещения цветовой метки является приемлемой, так как пневматические исполнительные механизмы обладают инерцией, и достижение точности более 1мм затруднительно для них.

В таблице 5 представлено сравнение коэффициента Accuracy нашей модели с использованием дефаззификаторов центра тяжести и отношения площадей с моделью нечеткой одномерной кластеризации [18]. В таблице 6 представлено сравнение быстродействия различных дефаззификаторов.

Таблица 5. Сравнение значений коэффициента Accuracy

Метод	Accuracy, %
Одномерная кластеризация (метод k-средних) [16]	91,2
Одномерная кластеризация (метод c-средних)	93,1
Нечеткая кластеризация с помощью формулы (8.1)	93,4
Нечеткая кластеризация с помощью формулы (8.2)	99,7

Таблица 6. Сравнение быстродействия дефаззификаторов

Метод	Время, нс
[26]	5 390
Оптоэлектронный дефаззификатор (патент №2408052)	10 000-1000
Оптоэлектронный дефаззификатор (патент №2439651)	10 000-1000
Дефаззификатор на основе формулы (8.1)	2160
Дефаззификатор на основе формулы (8.2) [21] (Патент РФ № 2701841)	590

6. Заключение. Описан метод распознавания цветовой метки и вычисления расстояния её смещения. К особенностям стоит отнести наличие фильтрации, необходимой для устранения шумов на обрабатываемых изображениях. Проведено оценивание работы применяемых фильтров на основе двух коэффициентов пикового отношения сигнал/шум (PSNR) и среднеквадратичной ошибки (RMSE). Спроектировано устройство в Matlab SIMULINK по предложенному методу. Во время проектирования на графиках было замечено, что в нечеткой модели формируются зоны нечувствительности. Для их устранения были введены формулы коррекции. Для точного определения цветовой метки выполнена кластеризация. На основе программной и математической модели разработан алгоритм для определения цветовой метки и вычисления расстояния её смещения, реализованный в виде блок-схемы. Экспериментальные исследования проводились с использованием пневматического мехатронного комплекса, на цилиндре которого закреплялась цветная метка, и видеокамеры Pixy CMUCam5. В ходе экспериментальных исследований работы нечетко-логической системы распознавания цветовой метки и определения расстояния смещения цветовой метки в кадре получена точность 99,7%. Оценка точности произведена на основе коэффициентов MAPE и Accuracy.

Благодарности. Работа проводится в рамках Государственного задания (грант №0851-2020-0032).

Литература

1. *Иванько Д.В., Карпов А.А.* Анализ перспектив применения высокоскоростных камер для распознавания динамической видеоинформации // Труды СПИИРАН. 2016. № 44. С. 98–113.
2. *Чиров Д.С., Чертова О.Г., Потанчук Т.Н.* Методика обоснования требований к системе технического зрения робототехнического комплекса // Труды СПИИРАН. 2017. № 51. С. 152–176.
3. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение // Бинум. 2006. 752 с.
4. *Boguslavsky A.A., Sokolov S.M.* The real time Vision System for small-sized target tracking // Int. J. Computing Science and Mathematics. 2007. vol. 1. no. 1. pp. 115–127.

5. *Chaki J., Dey N., Moraru L., Shi F.* Fragmented plant leaf recognition: Bag-of-features, fuzzy-color and edge-texture histogram descriptors with multi-layer perceptron // *Optik*. 2019. vol. 181. pp. 639–650.
6. *Boukezzoula R., Coquin D., Nguyen T.L., Perrin S.* Multi-sensor information fusion: Combination of fuzzy systems and evidence theory approaches in color recognition for the NAO humanoid robot // *Robotics and Autonomous Systems*. 2018. vol. 100. pp. 302–316.
7. *Kim Y.-K., Kim K.-W., Yang X.* Real time traffic light recognition system for color vision deficiencies // *ICMA IEEE International Conference in Mechatronics and Automation*. 2007. pp. 76–81.
8. *Nguyen T.L., Boukezzoula R., Coquin D., Perrin S.* Color recognition for NAO robot using sugeno fuzzy system and evidence theory // *16th World Congress IFSA, EUSFLAT*. 2015. pp. 1176–1183.
9. *Тимофеев А.В., Косовская Т.М.* Нейросетевые методы логического описания и распознавания сложных образов // *Труды СПИИРАН*. 2013. № 27. С. 144–155.
10. *Пушкарский С.В., Корнейчук Е.Ю., Виноградов И.И.* Нейротехнологический подход к автоматизированному распознаванию наземных объектов по данным космических систем дистанционного зондирования земли // *Труды СПИИРАН*. 2013. № 29. С. 190–200.
11. *Wang X.* Image recognition of English vocabulary translation based on FPGA high-performance algorithm // *Microprocessors and Microsystems*. 2020. vol. 80.
12. *Yu L. et al.* A litchi fruit recognition method in a natural environment using RGB-D images // *Biosystems Engineering*. 2021. vol. 204. pp. 50–63.
13. *Jeffrey Kuo C.-F. et al.* Automated inspection of micro-defect recognition system for color filter // *Optics and Lasers in Engineering*. 2015. vol. 70. pp. 6–17.
14. *Fu J., Caulfield H. J., Yoo S.-M., Atluri V.* Use of Artificial Color filtering to improve iris recognition and searching // *Pattern Recognition Letters*. 2015. vol. 26. no.14. pp. 2244–2251.
15. *Gecer B., Azzopardi G., Petkov N.* Color-blob-based COSFIRE filters for object recognition // *Image and Vision Computing*. 2017. vol. 57. pp. 165–174.
16. *Rosten E., Drummond T.* Fusing points and lines for high performance tracking // *IEEE International Conference on Computer Vision*. 2005. vol. 2. pp. 1508–1515.
17. *Rosten E., Drummond T., Porter R.* FASTER and better: a machine learning approach to corner detection // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2008. vol. 32(1). pp. 105–119.
18. *Пеган А.* Нечеткое моделирование и управление // *М.: БИНОМ*. 2013. 798с.
19. *Bobyry M.V., Milostnaya N.A., Kulabuhov S.A.* A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio // *Applied Soft Computing*. 2017. vol. 59. pp. 19–32.
20. *Bobyry M.V., Emelyanov S.G.* A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems // *Applied Soft Computing*. 2020. vol. 88. pp. 106030.
21. Устройство дефазификации на основе метода отношения площадей: пат. 2701841 Рос. Федерация №2018144147; заявл. 13.12.2018; опубл. 01.10.2019, Бюл. № 28. 16 с.
22. *Bobyry M.V., Yakushev A.S., Milostnaya N.A.* Three-coordinate Definition of Color Mark and Distance To Objects According to Stereo Image // *2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and Their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR)*. 2019. pp. 29–31.
23. *Bobyry M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A.* Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA // *Measurement*. 2020. vol. 152. pp. 107378.

24. *Borges R.E.P., Dias M.A.G., Dória Neto A.D., Meier A.* Fuzzy pay-off method for real options: The center of gravity approach with application in oilfield abandonment. // *Fuzzy Sets and Systems*. 2018. vol. 353. pp. 111–123.
25. *Sain D., Mohan B.M.* Modeling, simulation and experimental realization of a new non-linear fuzzy PID controller using Center of Gravity defuzzification // *ISA Transactions*. 2020.
26. *Karakuzu C., Karakaya F., Pavuslu M.A.* FPGA implementation of neuro-fuzzy system with improved PSO learning // *Neural Networks*. 2016. vol. 76. pp. 128–140.

Бобырь Максим Владимирович — д-р тех. наук, профессор, профессор, кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ). Область научных интересов: нечёткая логика, мобильные роботы, станки с ЧПУ, системы охлаждения, ПЛИС. Число научных публикаций — 330. e-mail: fregat_mn@rambler.ru. 50 лет Октября, д.94, г. Курск, 305040, РФ; п.т. 8 (4712) 22-26-65.

Архипов Александр Евгеньевич — канд. тех. наук, старший научный сотрудник, кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ). Область научных интересов: нечёткая логика, мобильные роботы, станки с ЧПУ, системы охлаждения, ПЛИС. Число научных публикаций — 91. e-mail: alex.76_09@mail.ru. 50 лет Октября, д.94, г. Курск, 305040, РФ; п.т. 8 (4712) 22-26-65.

Якушев Алексей Сергеевич — аспирант, кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ). Область научных интересов: нечёткая логика, мобильные роботы, станки с ЧПУ, системы охлаждения, ПЛИС. Число научных публикаций — 28. e-mail: alekseyakushev@yandex.ru. 50 лет Октября, д.94, г. Курск, 305040, РФ; п.т. 8 (4712) 22-26-65.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания (проект № 0851-2020-0032).

M. BOBYR, A. ARKHIPOV, A. YAKUSHEV
**SHADE RECOGNITION OF THE COLOR LABEL BASED ON THE
FUZZY CLUSTERING**

Bobyр M., Arkhipov A., Yakushev A. Shade Recognition of the Color Label based on the Fuzzy Clustering.

Abstract. In this article the task of determining the current position of pneumatic actuators is considered. The solution to the given task is achieved by using a technical vision system that allows to apply the fuzzy clustering method to determine in real time the center coordinates and the displacement position of a color label located on the mechatronic complex actuators. The objective of this work is to improve the accuracy of the moving actuator's of mechatronic complex by improving the accuracy of the color label recognition.

The intellectualization of process of the color shade recognition is based on fuzzy clustering. First, a fuzzy model is built, that allows depending on the input parameters of the color intensity for each of the RGB channels and the color tone component, to select a certain color in the image. After that, the color image is binarized and noise is suppressed.

The authors used two defuzzification models during simulation a fuzzy system: one is based on the center of gravity method (CoG) and the other is based on the method of area ratio (MAR). The model is implemented based on the method of area ratio and allows to remove the dead zones that are present in the center of gravity model. The method of area ratio determines the location of the color label in the image frame. Subsequently, when the actuator is moved longitudinally, the vision system determines the location of the color label in the new frame. The color label position offset between the source and target images allows to determine the moved distance of the color label.

In order to study how noise affects recognition accuracy, the following digital filters were used: median, Gaussian, matrix and binomial. Analysis of the accuracy of these filters showed that the best result was obtained when using a Gaussian filter. The estimation was based on the signal-to-noise coefficient. The mathematical models of fuzzy clustering of color label recognition were simulated in the Matlab/Simulink environment. Experimental studies of technical vision system performance with the proposed fuzzy clustering model were carried out on a pneumatic mechatronic complex that performs processing, moving and storing of details. During the experiments, a color label was placed on the cylinder, after which the cylinder moved along the guides in the longitudinal direction. During the movement, video recording and image recognition were performed. To determine the accuracy of color label recognition, the PSNR and RMSE coefficients were calculated which were equal 38.21 and 3.14, respectively. The accuracy of determining the displacement based on the developed model for recognizing color labels was equal 99.7%. The defuzzifier speed has increased to 590 ns.

Keywords: Fuzzy Clustering, Color Shade Recognition, Fuzzy Logic, RMSE, PSNR, MAPE

Bobyр Maksim — Dr. Tech. Sci., Professor, Professor, Department of Computer Engineering, Southwest State University (SWSU). Research interests: fuzzy logic, mobile robot, CNC machine, cooling system, FPGA. The number of publications — 330. e-mail: fregat_mn@rambler.ru. 50 years of October, 94, Kursk, 305040, Russian Federation. Office phone 8 (4712) 22-26-65.

Arkhipov Alexander — Can. Tech. Sci., Senior Researcher, Department of Computer Engineering, Southwest State University (SWSU). Research interests: fuzzy logic, mobile robot, CNC machine, cooling system, FPGA. The number of publications — 91. e-mail: alex.76_09@mail.ru. 50 years of October, 94, Kursk, 305040, Russian Federation. Office phone 8 (4712) 22-26-65.

Yakushev Aleksey — Ph.D. student, Department of Computer Engineering, Southwest State University (SWSU). Research interests: fuzzy logic, mobile robot, CNC machine, cooling system, FPGA. The number of publications — 57. e-mail: alekseyakushev@yandex.ru. 50 years of October, 94, Kursk, 305040, Russian Federation. Office phone 8 (4712) 22-26-65.

Acknowledgements. This research is supported by GZ (grant 0851-2020-0032).

References

1. Ivanko D.V., Karpov A.A. [Analysis of the prospects for the use of high-speed cameras for the recognition of dynamic video information]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 44. pp. 98–113. (In Russ.).
2. Chirov D.S., Chertova O.G., Potapchuk T.N. [Methodology for substantiating the requirements for the technical vision system of a robotic complex]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2017. vol. 51. pp. 152–176. (In Russ.).
3. Shapiro L., Stokman Dzh. *Kompyuternoe zrenie* [Computer vision]. Binom. 2006. 752 p. (In Russ.).
4. Boguslavsky A.A., Sokolov S.M. The real time Vision System for small-sized target tracking. *Int. J. Computing Science and Mathematics*. 2007. vol. 1. no. 1. pp. 115–127.
5. Chaki J., Dey N., Moraru L., Shi F. Fragmented plant leaf recognition: Bag-of-features, fuzzy-color and edge-texture histogram descriptors with multi-layer perceptron. *Optik*. 2019. vol. 181. pp. 639–650.
6. Boukezzoula R., Coquin D., Nguyen T.L., Perrin S. Multi-sensor information fusion: Combination of fuzzy systems and evidence theory approaches in color recognition for the NAO humanoid robot. *Robotics and Autonomous Systems*. 2018. vol. 100. pp. 302–316.
7. Kim Y.-K., Kim K.-W., Yang X. Real time traffic light recognition system for color vision deficiencies. ICMA IEEE International Conference in Mechatronics and Automation. 2007. pp. 76–81.
8. Nguyen T.L., Boukezzoula R., Coquin D., Perrin S. Color recognition for NAO robot usingsugeno fuzzy system and evidence theory. 16thWorldCongress IFSA, EUSFLAT. 2015. pp. 1176–1183.
9. Timofeev A.V., Kosovskaya T.M. [Neural network methods for logical description and recognition of complex patterns]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 27. pp. 144–155.
10. Pushkarskij S.V., Kornejchuk E.YU., Vinogradov I.I. [Neurotechnological Approach to Automated Recognition of Terrestrial Objects Based on Data from Space Earth Remote Sensing Systems]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 29. pp. 190–200.
11. Wang X. Image recognition of English vocabulary translation based on FPGA high-performance algorithm. *Microprocessors and Microsystems*. 2020. vol. 80.
12. Yu L. et al. A litchi fruit recognition method in a natural environment using RGB-D images. *Biosystems Engineering*. 2021. vol. 204. pp. 50–63.
13. Jeffrey Kuo C.-F. et al. Automated inspection of micro-defect recognition system for color filter. *Optics and Lasers in Engineering*. 2015. vol. 70. pp. 6–17.
14. Fu J., Caulfield H. J., Yoo S.-M., Atluri V. Use of Artificial Color filtering to improve iris recognition and searching. *Pattern Recognition Letters*. 2015. vol. 26. no. 14. pp. 2244–2251.
15. Gecer B., Azzopardi G., Petkov N. Color-blob-based COSFIRE filters for object recognition. *Image and Vision Computing*. 2017. vol. 57. pp. 165–174.
16. Rosten E., Drummond T. Fusing points and lines for high performance tracking. *IEEE International Conference on Computer Vision*. 2005. vol. 2. pp. 1508–1515.

17. Rosten E., Drummond T., Porter R. FASTER and better: a machine learning approach to corner detection. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2008. vol. 32(1). pp. 105–119.
18. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy modeling and control]. M.: BINOM. 2013. 798 p. (In Russ.).
19. Bobyr M.V., Milostnaya N.A., Kulabuhov S.A. A method of defuzzification based on the approach of areas' ratio. *Applied Soft Computing*. 2017. vol. 59. pp. 19–32.
20. Bobyr M.V., Emelyanov S.G. A A nonlinear method of learning neuro-fuzzy models for dynamic control systems. *Applied Soft Computing*. 2020. vol. 88. pp. 106030.
21. Defuzzification device based on the area ratio method: Pat. 2701841 Rus. Federation No. 2018144147; declared 12/13/2018; publ. 01.10.2019, Bul. No. 28.16 p.
22. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Milostnaya N.A. Three-coordinate Definition of Color Mark and Distance To Objects According to Stereo Image. 2019 3rd School on Dynamics of Complex Networks and Their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR). 2019. pp. 29–31.
23. Bobyr M.V., Yakushev A.S., Dorodnykh A.A. Fuzzy devices for cooling the cutting tool of the CNC machine implemented on FPGA. *Measurement*. 2020. vol. 152. pp. 107378.
24. Borges R.E.P., Dias M.A.G., Dória Neto A.D., Meier A. Fuzzy pay-off method for real options: The center of gravity approach with application in oilfield abandonment. *Fuzzy Sets and Systems*. 2018. vol. 353. pp. 111–123.
25. Sain D., Mohan B.M. Modeling, simulation and experimental realization of a new non-linear fuzzy PID controller using Center of Gravity defuzzification. *ISA Transactions*. 2020.
26. Karakuzu C., Karakaya F., Pavuslu M.A. FPGA implementation of neuro-fuzzy system with improved PSO learning. *Neural Networks*. 2016. vol. 76. pp. 128–140.

Ю.В. Грушко, Р.И. Паровик
**БЫСТРЫЙ ТРЕКИНГ ЗРАЧКА, ОСНОВАННЫЙ НА
ИССЛЕДОВАНИИ ГРАНИЧНО-СТУПЕНЧАТОЙ МОДЕЛИ
ИЗОБРАЖЕНИЯ И МНОГОМЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ
МЕТОДОМ ХУКА-ДЖИВСА**

Грушко Ю.В., Паровик Р.И. Быстрый трекинг зрачка, основанный на исследовании гранично-ступенчатой модели изображения и многомерной оптимизации методом Хука-Дживса.

Аннотация. Предлагается новый быстрый метод регистрации движения глаз в режиме реального времени на основе исследования гранично-ступенчатой модели полутонового изображения оператором Лапласиан – Гауссиана и нахождения нового предложенного дескриптора накопленных разностей (идентификатора точек), который отображает меру равноудаленности каждой точки от границ некоторой относительно монотонной области (например, зрачок глаза). Работа данного дескриптора исходит из предположения о том, что зрачок в кадре является наиболее округлой монотонной областью, имеющей высокий перепад яркости на границе, пиксели области должны иметь интенсивность меньше заранее заданного порога (но при этом зрачок может не являться самой темной областью на изображении). Учитывая все вышеперечисленные характеристики зрачка, дескриптор позволяет достичь высокой точности детектирования его центра и размера в отличии от методов, основанных на пороговой сегментации изображения, опирающихся на предположение о зрачке как наиболее темной области, морфологических методов (рекурсивная морфологическая эрозия), корреляционных или методов, исследующих только граничную модель изображения (преобразование Хафа и его вариации с двумерным и трехмерным пространствами параметров, алгоритм Starburst, Swirski, RANSAC, ElSe).

Исследована возможность представления задачи трекинга зрачка как задачи многомерной оптимизации и ее решение неградиентным методом Хука –Дживса, где в качестве целевой функции выступает функция, выражающая дескриптор. При этом отпадает необходимость в вычислении дескриптора каждой точки изображения (составления специальной аккумуляторной функции), что значительно ускоряет работу метода.

Проведен анализ предложенных дескриптора и метода, а также разработан программный комплекс на языке Python 3 (визуализация) и C++ (ядро трекинга) в лаборатории физико-математического факультета Камчатского государственного университета им. Витуса Беринга, позволяющий иллюстрировать работу метода и осуществлять трекинг зрачка в режиме реального времени.

Ключевые слова: математические модели, детекторы, дескрипторы, окулография, айтрекинг, амиотрофический склероз, зрачок, Лапласиан-Гауссиана, метод Хука-Дживса, численная оптимизация, преобразование Хафа

1. Введение. Окулография играет ключевую роль в создании устройств типа человек-компьютер для осуществления альтернативной аугментативной коммуникации (ААК) людей, страдающих невропаралитическими синдромами и другими болезнями центральной нервной системы (ЦНС). Доказано, что в случае синдрома «запертого человека»

по международной классификации болезней (МКБ-10) код G83.5 или синдрома бокового амиотрофического склероза (БАС) МКБ-10 код G12 у больных наблюдается полная потеря речи (афазия), паралич, за исключением мышц глаз, при полной сохранности сознания и чувствительности [1]. Общение с такими больными возможна только с помощью движения глаз, используя технику видеоокулографии (ВОГ) и электроокулографии (ЭОГ). По данным National Amyotrophic Lateral Sclerosis Registry, больных с синдромом БАС в мире насчитывается около 450 000 человек. В среднем БАС диагностируют у 3-5 человек на 100 тысяч населения.

Сам процесс ВОГ сводится к трем этапам: 1. Создание контраста инфракрасной подсветкой (ИК) между радужной оболочкой и зрачком. При этом используется метод «темного» или «яркого» зрачка. Так, при «темном» зрачке источник подсветки сдвинут относительно оптической оси камеры окулографа и вторичное отражение от сетчатки не поступает в камеру. 2. Движение глаза фиксируется камерой окулографа или иного устройства. 3. Выполняется препроцессинг кадра (сглаживание изображений, эквализация гистограммы и др.), детектирование зрачка в кадре, нахождение его координат и радиуса. Данный этап является достаточно сложным. Необходим поиск более эффективных алгоритмов трекинга как по вычислительной сложности, так и по точности детектирования при ограниченных вычислительных ресурсах (с использованием смартфонов, очков айтрекеров и др.).

В настоящее время разработаны различные методы и алгоритмы для поиска зрачка в кадре. Методы [2, 3, 4], использующие в своей основе операцию свертки с примитивами Хаара заранее заданных размеров, имеют большую вычислительную сложность (сама операция свертки достаточно ресурсоемкая операция), так как для корректного поиска зрачка в трехмерном пространстве параметров (x, y, R) необходимо иметь набор примитивов различного радиуса (необходимо учитывать миоз, т.е. сжатие зрачка при реагировании на свет, и мидриаз – его расширение), операция свертки повторяется итеративно для каждого примитива, после чего выбирается точка (x, y) , имеющая наибольший отклик. В найденной точке находится центр зрачка с соответствующим радиусом (в некоторых алгоритмах, например, Swirski [3], это лишь начальный этап поиска фактического центра зрачка с последующим его уточнением).

Большое количество методов основано на пороговой сегментации изображения и операциях математической морфологии [5, 6, 7, 8], опирающихся на предположение о зрачке как наиболее темной области.

Выбираются все точки изображения, интенсивности которых ниже некоторого порога т.е. $f(x, y) \leq T$. Проведя сегментацию изображения и его обработку с помощью морфологических операторов эрозии, можно вычислить центр масс, который и определяет его центр. Другой подход предусматривает рекурсивное применение морфологической эрозии к точкам, составляющим область зрачка, тогда оставшийся последний пиксель (самый удаленный от точек фона) и будет являться центром зрачка. Данные методы показывают точные результаты на изображениях с темным крупным зрачком, но неработоспособны на иных типах изображений, в которых темные ресницы, веки и тени нажном эпителии могут сливаться со зрачком. В случае рекурсивной эрозии [8, 109 с.] необходимо, чтобы зрачок в кадре был самой большой темной областью на изображении, что существенно ограничивает применение данного метода в условиях недостаточной освещенности глаза, при съемке глаза с расстояния или во время миоза зрачка. Поскольку операция бинаризации, вычисление порога и применение морфологических операторов – вычислительно простые процедуры, то преимуществом методов является скорость их исполнения.

Еще один обширный класс – методы, исследующие граничную модель изображения, такие как метод оценки параметров модели на основе случайных выборок RANSAC [9], алгоритм Starburst [10], ElSe [11], Swirski [3], [12], метод обнаружения краевых сегментов [13]. Одной из часто используемых техник является преобразование Хафа (с двумерным [14] и трехмерным пространством параметров [15, 16]). Преобразование Хафа – вычислительный алгоритм, применяемый для параметрической идентификации множества кривых заданного семейства (прямая, эллипс) на растровом изображении. Так, для поиска зрачка в первую очередь выделяются точки-кандидаты, лежащие на границе между зрачком и радужной оболочкой. Такие точки будут иметь высокий градиент яркости $mag(\nabla f(x, y))$. Расположение граничных точек зрачка можно задать уравнением $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$. Очевидно, что множество центров всех возможных окружностей (центры, лежащие на граничных точках) радиуса R , проходящих через некоторую голосующую точку аккумуляторного пространства A , образует окружность радиуса R вокруг этой точки. Функция отклика в преобразовании Хафа для поиска окружностей заданного радиуса представляет собой окружность такого же радиуса с центром в голосующей точке. Точка аккумуляторной функции, получившая наибольшее количество

голосов, то есть $\arg \max_{x, y} A(x, y)$, отвечает наилучшему найденному по-

ложению фигуры заданного класса на изображении. Преобразование Хафа устойчиво к удалению части искомой фигуры. Например, центр зрачка можно найти, если его часть прикрыта веком или имеются блики на границе зрачка. Недостаток данных методов – их большая вычислительная сложность.

В данной работе делается попытка разработать дескриптор (специальный идентификатор точек, выделяющий искомый объект) и метод на основе этого дескриптора, позволяющий с высокой точностью и скоростью определять координаты центра и размеры зрачка на изображении, учитывая все характеристики зрачка: круглая/эллиптическая форма области, ее монотонность, высокий перепад яркости на границе области и невысокая интенсивность точек, составляющих данную область. Учитывая одновременно все вышеперечисленные характеристики зрачка, дескриптор позволит достичь высокой точности детектирования.

Сама идея дескриптора позволяет определить еще одну важную задачу исследования – представление задачи поиска и трекинга зрачка, как задачи многомерной безусловной оптимизации целевой функции, выражающей дескриптор. При этом отпадает необходимость в вычислении дескриптора для каждой точки изображения, что позволит значительно ускорить работу предложенного метода и использовать его на низкопроизводительных вычислительных устройствах.

2. Описание дескриптора накопленных разностей – Accumulated Difference Descriptor. Работа дескриптора накопленных разностей, предложенного в этой работе, исходит из предположения о том, что зрачок в кадре является наиболее округлой монотонной областью, имеющей высокий перепад яркости на границе, пиксели которой удовлетворяют условию $f(x, y) \leq T$, то есть интенсивность пикселей меньше заранее заданного порога (при этом зрачок может не являться самой темной областью на изображении). Сам дескриптор отражает меру равноудаленности каждой точки от границ некоторой области изображения, обладающей вышеперечисленными свойствами. Причем если таких областей на изображении несколько, дескриптор будет иметь минимальный отклик в центре наиболее округлой области. Предложенный дескриптор производит поиск в трехмерном пространстве параметров (x, y, R) – координаты зрачка и радиус/множество граничных точек зрачка. Общая схема вычисления дескриптора представлена на рисунке 1 (используется нотация блок-схем и UML-диаграмм).

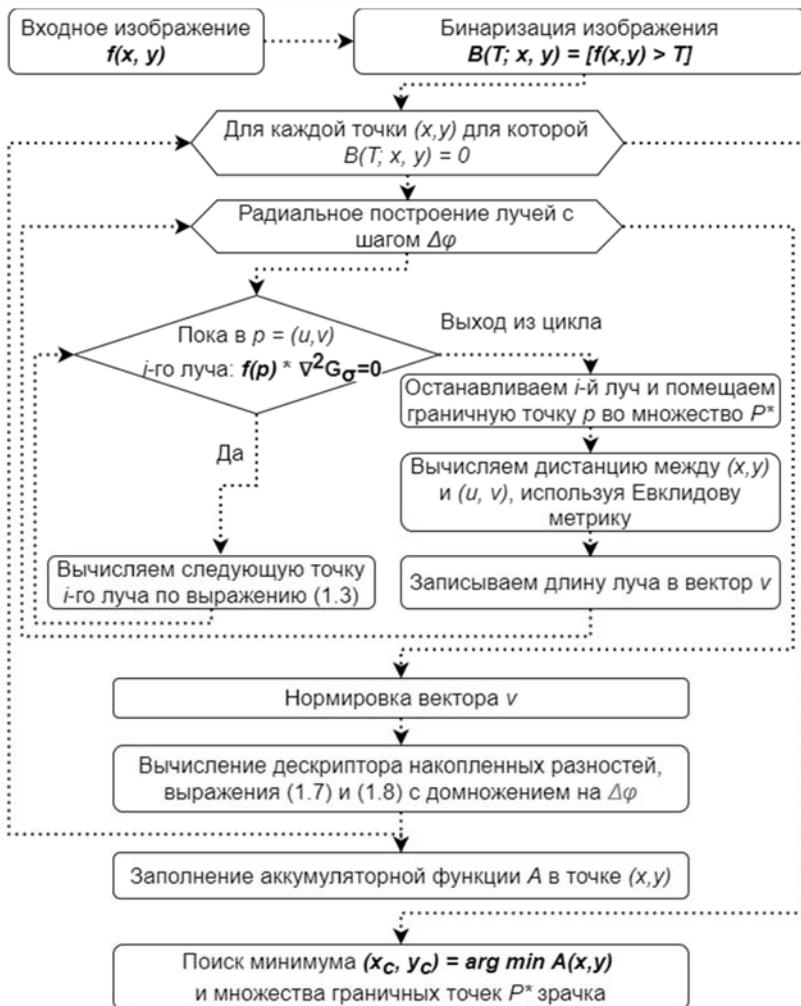


Рис. 1. Блок-схема вычисления дескриптора накопленных разностей

Опишем основные шаги вычисления дескриптора.

Шаг 1. Сегментация изображения по порогу. Зрачок здорового человека обладает формой близкой к кругу/эллипсу, и отражает мало света в том случае, если направление источника инфракрасной подсветки глаза не совпадает с направлением камеры. Это свойство позволяет радикально уменьшить количество обрабатываемой информации, а соответственно и ускорить работу метода.

Очевидный способ выделить темный зрачок из окружающего фона изображения $f(x, y)$ состоит в выборе значения порога T , разграничивающего моды распределения яркостей. Тогда любая точка (x, y) , в которой $f(x, y) \leq T$, называется точкой зрачка (в противном случае – точкой фона). Найдем сегментированное изображение $\mathcal{B}(T; x, y)$:

$$\mathcal{B}(T; x, y) = [f(x, y) > T] = \begin{cases} N, & \text{if } f(x, y) > T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases},$$

где N – число градаций полутонового изображения. Здесь и далее $[\bullet]$ обозначена нотация Айверсона – индикаторная функция, которая определена на множестве логических выражений $[\bullet]: \mathbb{B} \rightarrow \{0, 1\}$, возвращающая 1 на истинных и 0 на ложных. В результате сегментации образуются две группы пикселей: $Ob \leq T < Bg$. Вычислим значения m_1 и m_2 средних яркостей пикселей по областям Ob и Bg соответственно.

Тогда новое значение порога примет вид:

$$T = \frac{1}{2}(m_1 + m_2), \forall T \in \mathbb{N}_0, T \leq N.$$

Будем выполнять сегментацию по порогу, делать перерасчет m_1 и m_2 по областям и обновлять значение порога T , пока разница значений T между соседними итерациями не окажется меньше значения заданного параметра ΔT . Тем самым мы максимизируем межклассовую дисперсию между Ob и Bg . Стоит отметить, что для точной работы метода идеальной сегментации зрачка не требуется (объясняется далее). Основная задача данного этапа – уменьшение количества информации для ускорения метода.

Пороговая сегментация изображения f представлена на рисунке 26. Последующее уменьшение T истончает область зрачка, в этом случае использование метода, основанного на поиске центра масс самых темных точек или метода проекций яркостей не позволяет корректно найти центр зрачка, на рисунке представлен белым крестиком.

Шаг 2. Исследование гранично-ступенчатой модели полутонного изображения. Для каждой точки (x_0, y_0) изображения $f(x, y)$ для которой выполняется условие $B(T; x_0, y_0) = 0$ строятся N лучей, причем угол φ_i между осью абсцисс OX и лучом i равняется $\varphi_i = \varphi_{i-1} + \Delta\varphi$, здесь $\varphi \in [0, 2\pi]$, $\Delta\varphi$ – угол между лучами, некоторое приращение, регулирующее частоту распределения лучей по кругу и равный $\Delta\varphi = 2\pi / N$. Для построения лучей можно использовать алгоритмы построения отрезка на растре (Брезенхэма [17], DDA-линии [18] и др.). В реализованном алгоритме лучи строились итеративно. По известному множеству x последовательно рассчитывались y для следующих точек. Использовалось уравнение прямой с угловым коэффициентом:

$$y = \frac{y^* - y_0}{x^* - x_0}(x - x_0) + y_0 = k(x - x_0) + y_0,$$

где (x_0, y_0) , (x^*, y^*) – начало и конец распространения луча, $k = \tan \varphi$.

Двигаясь вдоль направления i -го луча, для каждой точки (x, y) будем исследовать гранично-ступенчатую модель полутонного изображения f . В этой модели предполагается, что границы определяются изменениями локальных производных. Так, наибольший перепад яркости в кадре при инфракрасной подсветке глаза присутствует на границе зрачка и радужной оболочки (относительно монотонные области).

Для вычисления значения границы изображения f в точке (x_0, y_0) воспользуемся оператором $\nabla^2 G_\sigma$, где ∇^2 – оператор

Лапласа $(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2})$, а $G_\sigma(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$ – двумерная Гауссова

функция, которая описывает нормальное распределение значений интенсивностей пикселей в окрестности точки (x, y) . Среднеквадратичное отклонение σ отвечает за степень размытия [19].

Выбор оператора Лапласиан–Гауссиана (LoG) $\nabla^2 G_\sigma$ для данной задачи основывается на трех фундаментальных идеях: 1) LoG – дифференциальный оператор, вычисляющий значение второй произ-

водной в каждой точке изображения:2) Гауссова функция в этом операторе обеспечивает сглаживание изображения, снижая интенсивность структур (в т.ч. шумовых) с размерами меньше σ , делая некоторые области более однородными:3) ∇^2 – изотропен то есть инвариантен к повороту, что не только соответствует характеристикам зрительной системы человека [20], но и обеспечивает одинаковый отклик на изменение яркости в любом направлении, в отличие от градиентных операторов, требующих нескольких масок для вычисления максимального отклика в любой точке изображения (Sobel, Prewitt [21] и др.). Это свойство также позволяет подобрать наиболее корректный порог для остановки движения вдоль луча i .

Если не учитывать $\frac{1}{2\pi\sigma^2}$, то $\nabla^2 G_\sigma$ определяется как:

$$\begin{aligned} \nabla^2 G_\sigma(x, y) &= \frac{\partial^2 G(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G(x, y)}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{y}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \right) = \left(\frac{x^2}{\sigma^4} - \frac{1}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} + \left(\frac{y^2}{\sigma^4} - \frac{1}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}. \end{aligned} \quad (1)$$

С учётом $\frac{1}{2\pi\sigma^2}$ (1) преобразуется к виду:

$$\nabla^2 G_\sigma(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^4} \left(\frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}.$$

Значение границы в точке формируется пространственной сверткой $\nabla^2 G_\sigma$ с изображением f в точке:

$$g(x, y) = \nabla^2 G_\sigma(x, y) * f(x, y).$$

Для наглядности была составлена карта границ для изображения и представлена на рисунке 2а.

В случае если $\nabla^2 G_\sigma(x, y) * f(x, y) > 0$, необходимо остановить движение вдоль луча i и запомнить координаты точки $q^i = (u, v)$, лежащей на границе, например, поместив в массив. Если луч достигает границы изображения – точка не найдена. Для каждой граничной точки необходимо найти расстояние $\xi((x_0, y_0), q^i)$ – длина луча, вычисленная по Евклидовой метрике.

Шаг 3. Вычисление дескриптора накопленных разностей и построение аккумуляторной функции. Непрерывную модель нахождения накопленных разностей в точке $\tau = (x_0, y_0)$ можно описать следующим образом:

$$A(\tau) = \int_{\varphi=0}^{2\pi} |\xi(\tau, P(\tau, \varphi)) - \xi(\tau, P(\tau, \varphi + d\varphi))| d\varphi, \quad (2)$$

где P – некоторая функция, которая принимает на вход точку начала распространения луча τ , угол распространения φ относительно оси абсцисс, P возвращает точку $q = (u, v)$, лежащую на границе то есть $\nabla^2 G_\sigma(q) * f(q) > 0$, $d\varphi$ – бесконечно малое приращение угла между лучами.

Зададим аккумуляторную функцию A с размерностью изображения f . Для каждой $\tau = (x_0, y_0)$ зафиксируем сумму модулей разностей длин лучей, ограниченных контуром объекта на изображении (дискретное представление накопленных разностей):

$$\begin{aligned} A(\tau) &= \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \sum_{\varphi=0}^{2\pi-\Delta\varphi} |\xi(\tau, P(\tau, \varphi)) - \xi(\tau, P(\tau, \varphi + \Delta\varphi))| \Delta\varphi = \\ &= \sum_{i=1}^{N-1} |\xi(\tau, q^i) - \xi(\tau, q^{i+1})| \Delta\varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

где $q^i = (u, v)$ – точка, находящаяся на границе зрачка, принадлежащая i -му лучу, q^{i+1} – точка, находящаяся на границе зрачка, принадлежащая $i+1$ лучу, $\xi(\tau, q^i) = \left[(x_0 - u)^2 + (y_0 - v)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ – Евклидово расстояние от точки-кандидата до граничной точки – длина луча.

Перед вычислением дескриптора накопленных разностей необходимо провести нормирование вектора, содержащего длины лучей сетки. Делается это для исключения прямого влияния длин лучей на расчет дескриптора, учитываться должны только отношения (разности) между самими лучами. В случае если на изображении существуют неровные темные области (блики, пигментированные образования кожного покрова), имеющие высокий перепад яркости на границе, и по размеру такие области гораздо меньше, чем область зрачка, без проведения нормализации центры таких областей примут наименьшие накопленные разности. Проведя нормализацию построенных лучей сетки из точки (x_0, y_0) , будем учитывать только отношения между смежными лучами сетки, и наименьшие накопленные разности будут находиться именно в центре области зрачка, как наиболее круглого объекта на изображении.

Так как трекинг ведется на полутоновом изображении, $A(x, y)$ будет представлять из себя 8-битную целочисленную карту, и область ее значений составит $A(x, y) \in [0, 2^8 - 1]$, в случае нормирования $A(x, y) \in [0, \Delta\varphi]$.

Чаще всего сегментация по порогу дает неудовлетворительный результат, это связано с индивидуальными особенностями человека, который проходит процесс ВОГ. Так, в случае гетерохромии глаза МКБ-10 H21.24 (аномальное затемнение радужной оболочки), сгущения ресниц или недостаточной инфракрасной подсветке глаза, в $\mathcal{B}(T; x, y)$ могут появиться дополнительные области, которые могут помешать корректному нахождению зрачка в кадре (рисунок 2б). Предполагается, что для *округлой монотонной области*, пиксели которой *удовлетворяют условию* $\mathcal{B}(T; x, y) = 0$ и имеющей *высокий перепад яркости* по всей границе (именно этим трем критериям чаще всего соответствует область зрачка на изображении), сумма накопленных разностей в центре такой области устремится к 0, в отличие от объектов, имеющих неправильную геометрическую форму – ресницы, тени на кожном эпителии или радужке, которые также, как и зрачок, являются достаточно темными областями но не имеют резких перепадов по профилю яркости. Данная особенность часто затрудняет поиск точных координат зрачка, используя сегментационные или морфологические методы, описанные в работах [5, 6, 7], [8, 66 с., 109 с.] и др., но игнорируется дескриптором накопленных разностей (т.е. одновременно учитываются все вышеперечисленные характеристики зрачка), увеличивая его точность. При

$\Delta\varphi \rightarrow 0^\circ$ точность определения дескриптора точек области будет увеличиваться, увеличивая и вычислительную сложность алгоритма. Оптимальный диапазон $\Delta\varphi$ для поиска окружностей в кадре составляет 14–40 градусов.

Таким образом, выражения (2) и (3) описывают ключевое свойство точек, составляющих некоторую монотонную темную область, обладающую высоким перепадом яркости на границах, который отражает меру равноудаленности каждой точки от границ этой области. Стоит отметить, что аккумулятор можно вычислить и для всего изображения (рисунок 2 д, ж), то есть игнорируя условие $\mathcal{B}(T; x_0, y_0) = 0$, однако в данном случае время вычисления функции многократно возрастет.

Рассмотрим процесс построения аккумуляторной функции на примере. На рисунке 2г представлена одна из точек кандидат, удовлетворяющая условию $\mathcal{B}(T; x_0, y_0) = 0$, располагающаяся недалеко от фактического центра зрачка (отмечен маленьким эллипсом). Из этой точки построим лучи с шагом $\Delta\varphi = 14,4^\circ$, что составляет $N \sim 25$ лучей.

Лучи останавливаются при выполнении условия $\nabla^2 G_\sigma(q) * f(q) > 0$, белыми крестиками отмечены граничные точки. Используем выражение (3) для вычисления значения дескриптора в данной точке и запишем значение в соответствующую точку аккумуляторной функции. Полученное значение составило $A(x_0, y_0) = 13.65$. На рисунке 2д представлены две точки-кандидаты (x_0, y_0) и (x_1, y_1) . Точка, лежащая вне границ зрачка принимает значение $A(x_1, y_1) = 31.15$, тогда как точка, располагающаяся в фактическом центре зрачка имеет наименьшее значение накопленных разностей и составляет $A(x_0, y_0) = 2.54$. Аккумуляторная функция, рассчитанная для точек с условием $\mathcal{B}(T; x_0, y_0) = 0$, представлена на рисунке 2е, центром зрачка является точка $\arg \min_{(x,y)} A(x, y)$.

Аккумулятор, вычисленный для всего изображения с нормированием длин лучей сетки, представлен на рисунке 2ж. Как видно из аккумулятора, блики от инфракрасной подсветки игнорируются, так как не являются достаточно темными и округлыми областями в сравнении со зрачком, хотя и имеют высокий перепад яркости на границе.

Шаг 4. Определение минимума аккумулятора и центра зрачка.
Положение минимума аккумуляторной функции соответствует цен-

тру наиболее округлого объекта, т.е. центру зрачка (\bar{x}, \bar{y}) . Если значение минимума больше порога T_c , будем считать, что на изображении нет глаза:

$$(\bar{x}, \bar{y}) = \begin{cases} \arg \min_{(x,y)} A(x,y), & \text{if } T_c \geq \min_{(x,y)} A(x,y) \\ \text{none}, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (4)$$

Если точек максимума несколько, они образуют область интереса F , найдем их геометрический центр, он и будет являться центром зрачка.

$$\bar{x} = \frac{1}{\sum A(x,y) \in F} \sum A(x,y)x, \quad \bar{y} = \frac{1}{\sum A(x,y) \in F} \sum A(x,y)y.$$

На рисунках 2 е, ж представлен минимум аккумуляторной функции. На рисунке 2з представлен найденный центр зрачка с использованием дескриптора накопленных разностей, центр отмечен ярким белым крестиком. Эллипс вокруг зрачка вписан в граничные точки множества \hat{P} (см. листинг 1), используя метод наименьших квадратов (МНК). Серый крестик слева – центр зрачка, рассчитанный методом проекций яркостей, серый крестик справа – преобразование Хафа. Исходя из профиля границы зрачка (рис. 3и), составленного лучами сетки в центрах зрачка, найденных различными методами, можно сказать, что дескриптор накопленных разностей находит точку, которая является наиболее равноудаленной от границ зрачка и максимально близко аппроксимирует профиль, составленный из фактического центра, отмеченного медицинским экспертом.

3. Постановка задачи регистрации зрачка как задачи многомерной оптимизации и ее решение методом Хука-Дживса. Метод деформируемой сетки (Deformable mesh method). Нахождение аккумуляторной функции для каждого кадра неоптимальная и ресурсоемкая задача даже при обходе пикселей, удовлетворяющих условию $\mathcal{B}(T; x, y) = 0$. Для ускорения работы метода представим задачу нахождения зрачка с использованием предложенного выше дескриптора в виде задачи многомерной оптимизации, где необходимо найти такую точку (x, y) – предполагаемый центр зрачка, в котором накопленные разности длин лучей достигнут своего минимума, т.е. найдем координаты наиболее равноудаленной точки от границ темной монотонной области.

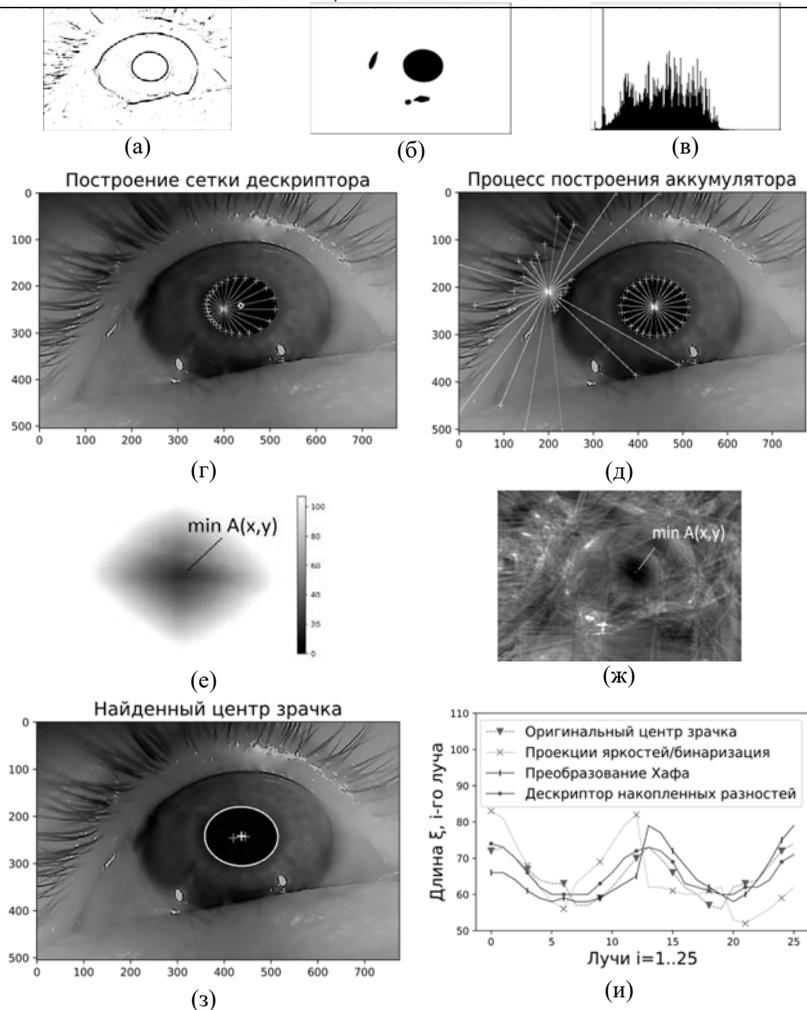


Рис. 2. Процесс построения аккумуляторной функции и нахождения зрачка в кадре: а) Лапласиан – Гауссиана изображения f ; б, в) пороговая обработка и гистограмма изображения; г, д) примеры построения лучей сетки (белыми крестиками отмечены граничные точки); е) аккумуляторная функция, рассчитанная для точек $B(T; x_0, y_0) = 0$; ж) полный аккумулятор изображения с проведением нормировки; з) найденный центр зрачка дескриптором накопленных разностей (яркий белый крестик) и эллипс вокруг зрачка, вписанный в граничные точки множества \bar{P} ; и) профиль границы зрачка, составленный лучами сетки в центрах зрачка, найденных различными методами

Другая интерпретация предложенного алгоритма – деформирование построенной сетки таким образом, чтобы центр этой сетки был наиболее равноудаленной точкой от границ, а длины ребер сетки приняли равное значение (рис. 3д):

$$A(\tau) = \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \sum_{\varphi=0}^{2\pi-\Delta\varphi} \left| \xi(\tau, P(\tau, \varphi)) - \xi(\tau, P(\tau, \varphi + \Delta\varphi)) \right| \Delta\varphi \rightarrow \min_{\tau}.$$

Так как целевая функция $A(x, y)$, выражающая дескриптор накопленных разностей, не является дифференцируемой по x, y , использование градиентных методов не представляется возможным. Воспользуемся методом многомерного поиска Хука-Дживса [22, 212 с.], который состоит из двух этапов: исследующего прямого поиска в окрестности базисной точки (используется информация только о значениях функции в точках) и, в случае его успеха, поиска по образцу, в направлении, выбранном для минимизации [23, 103 с.].

В качестве начальной точки возьмем центр зрачка $\bar{b}^0 = (x^0, y^0)$, вычисленного на предыдущем кадре, либо для повышения устойчивости метода возьмем любую точку области зрачка, взятую из разности двух кадров, взятых в моменты времени t и $t + \Delta t$, неподвижные составляющие взаимно уничтожатся, а ненулевые значения в точках, удовлетворяющих условию $\mathcal{B}(T; x, y) = 0$ останутся в местах, соответствующих подвижным компонентам изображений – пикселям зрачка то есть $|f(x, y, t) - f(x, y, t + \Delta t)| \leq T$. Если кадр первый, можно вычислить дескриптор накопленных разностей для всего кадра, тем самым найти центр зрачка, от которого и начнет работу алгоритм трекинга.

Зададим величину шага h_i , $i=1,2$ по каждой координате, используемой при исследовании функции. Эмпирическим путем было установлено, что для поиска центра зрачка площадью $1/K$ от размера кадра, оптимальный шаг составит $h \in [1; K]$ пикселей.

Произведем исследующий поиск типа 1 [22, 212 с.] для определения удачного направления к $\mathit{loc} \min_{x,y} A(x, y)$ – новому центру зрачка.

Для этого необходимо вычислить значение целевой функции $A(x, y)$

в базисе \bar{b}^0 . Изменим в циклическом порядке каждую координату (каждый раз только одна), $x^1 = x^0 + h_1$ и вычислим $A(x^0 + h_1, y^0) = A(\bar{b}^1)$. В случае, если $A(\bar{b}^1) < A(\bar{b}^0)$, перемещение по координатной области оказалось удачным и базисная точка \bar{b}^0 заменяется на \bar{b}^1 . Если перемещение не улучшило целевую функцию, т.е. $A(\bar{b}^1) \geq A(\bar{b}^0)$, то x^0 изменяется на $-h$, так, что $x^1 = x^0 - h_1$ и значение $A(\bar{b}^1)$ проверяется как и ранее. Если ни $x^0 + h_1$, ни $x^0 - h_1$ не улучшают $A(\bar{b}^0)$, то базис оставим без изменений. Повторим процедуру для второй координаты y . В результате поиска получим новую базисную точку, соответствующую наименьшему значению целевой функции в исследуемом поиске. Если уменьшение функции не достигнуто, исследование повторяется в окрестности предыдущей базисной точки с уменьшенной длиной шага h по координатам. Если $\bar{b}^0 \neq \bar{b}^1$ – гарантируется, что в новом базисе \bar{b}^1 значение функции меньше и можно приступить к поиску по образцу.

Разумно переместиться из \bar{b}^1 в направлении вектора $\bar{b}^1 - \bar{b}^0$, так как поиск в этом направлении уже привел к уменьшению значения функции накопленных разностей. Сделаем шаг в «ускоряющем» направлении и вычислим точку образца (временный базис) $\bar{\eta}^1 = \bar{b}^1 + \alpha(\bar{b}^1 - \bar{b}^0)$, где $\alpha \geq 1$ – коэффициент усиления. В алгоритме использовано значение $\alpha = 1$, при использовании большего коэффициента алгоритм осуществляет переход ко временному базису, располагающемуся вне границ зрачка, что в дальнейшем делает невозможным поиск локального минимума исследуемой области. Осуществим исследующий поиск в окрестности \bar{b}^1 – поиск типа 2 [22, 214 с.], неудача или успех его поиска оцениваются путем сравнения полученной точки с временным базисом $\bar{\eta}^1$. В результате поиска типа 2 получим \bar{b}^2 . Сравним значения целевой функции $A(\bar{b}^2) < A(\bar{b}^1)$, если поиск по образцу успешен, то новым базисом будет \bar{b}^2 ,

после чего проведем новый поиск по образцу с ускоряющим шагом в направлении $\bar{b}^2 - \bar{b}^1$ и исследующим поиском типа 2. Если $A(\bar{b}^2) \geq A(\bar{b}^1)$ – поиск по образцу неудачен и из предыдущего базиса проведем исследующий поиск типа 1 для определения нового удачного направления.

Условием останова на j -ой итерации является уменьшение всех величин шагов $h_i < \epsilon$. Невозможность уменьшения целевой функции при очень маленьких h_i указывает на нахождение в текущем базисе локального минимума, т.е. $\bar{b}^j = \arg \min_{x,y} A(x,y)$. В случае если h – константа, условие останова выглядит как $\bar{b}^{j+1} = \bar{b}^j$, т.е. поиск типа 1 не минимизирует целевую функцию и базис не меняется.

На рисунке 3 а, б, в, г представлен процесс трекинга зрачка с использованием метода деформируемой сетки. Тестирование проводилось на пользователе в режиме реального времени. Формат видеосъемки составил 850×554 пикселей. В качестве источника инфракрасной подсветки глаза были выбраны светодиодные элементы в количестве 2 штук с пиковой длиной волны 940 нм., подключенные параллельно через резисторы с сопротивлением в 120 Ом к источнику питания камеры. За начальную точку спуска к $\text{loc min } A(x,y)$ был принят центр зрачка предыдущего кадра $\bar{b}^0 = (x^0, y^0)$. Используемые в данном примере параметры алгоритма были подобраны эмпирическим путем: шаг между лучами сетки составил $\Delta\varphi = 14,4^\circ$ ($N \sim 25$ лучей), коэффициент усиления $\alpha = 1$, начальный шаг по двум координатам $h_{x,y} = 3$. Алгоритм в среднем сошел за 12-21 базисные точки (зеленые окружности в кадре), и 54-94 точки во время исследующего поиска типа 1 и 2, не считая построения лучей по алгоритму Брезенхэма.

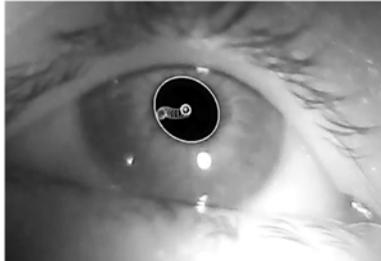
На рисунке 3д представлен процесс растяжения деформируемой сетки для кадра (г). Белая сетка построена из центра зрачка предыдущего кадра $\bar{b}^0 = (227, 456)$, в этой точке дескриптор составляет $A(\bar{b}^0) = 33.17$. В процессе оптимизации сетка начинает «расправляться» к новому минимуму так, что центр этой сетки становится наиболее равноудаленной точкой от границ, он и является центром зрачка. Найденный центр после оптимизации составляет $(\bar{x}, \bar{y}) = (243, 510)$, значение аккумулятора в центре $A(\bar{x}, \bar{y}) = 5.02$.

Старт (200, 280), $A(x,y)=45.65$
 Центр (233, 337), $\text{loc min } A(x,y)=1.89$



(a)

Старт (233, 337), $A(x,y)=54.51$
 Центр (226, 403), $\text{loc min } A(x,y)=3.4$



(б)

Старт (226, 403), $A(x,y)=39.86$
 Центр (227, 456), $\text{loc min } A(x,y)=4.73$



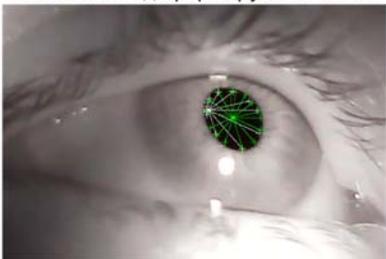
(в)

Старт (227, 456), $A(x,y)=33.17$
 Центр (243, 510), $\text{loc min } A(x,y)=5.02$



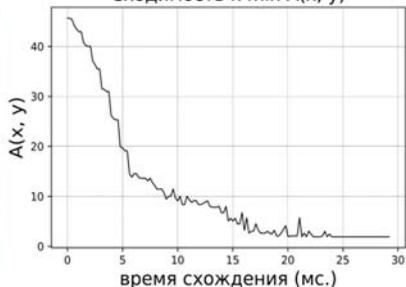
(г)

Растяжение деформируемой сетки



(д)

Сходимость к $\text{min } A(x, y)$



(e)

Рис. 3. Трекинг зрачка в режиме реального времени: а, б, в, г) процесс трекинга зрачка, используя метод деформируемой сетки (начальной точкой спуска считается центр зрачка предыдущего кадра); д) процесс растяжения сетки от начальной точки спуска до фактического центра зрачка. е) сходимость метода деформируемой сетки к минимуму аккумуляторной функции, в котором находится центр зрачка. График представлен для кадра (а)

Можно заметить, что в процессе трекинга меняется значение минимума аккумулятора, это связано с тем, что зрачок меняет свою форму с круга (рис. 3а) на эллипс (рис. 3г), в результате чего накопленные разности увеличиваются, увеличивая и минимум функции.

В случае, если метод деформируемой сетки «теряет» зрачок, для следующего кадра вычисляется аккумулятор $A(x, y)$, либо для всего кадра, либо в наиболее темных областях т.е. $B(T; x, y) = 0$, это позволит найти новый центр зрачка, с которого будет происходить дальнейший трекинг.

Так как алгоритм Хука–Дживса позволяет спускаться только к локальному минимуму целевой функции, условие «потери» зрачка в кадре определим следующим образом:

$$\left[\underset{x, y}{\text{loc min}} A(x, y) < T_c \right] (1 - B(T; x, y)) = 0, \quad (2.2)$$

где $[\bullet]$ – возвращает 1 при истинности логического выражения, T_c – порог, определяющий наличие зрачка в кадре (т.е. наиболее круглого объекта), описан в выражении (1.9). Данное условие реализует конъюнктивный оператор на множестве логических значений. Результат обработки потери зрачка в кадре представлен в таблице 1, где:

А - зрачок (темная область, округлая, монотонная, высокий перепад яркости на границе);

Б - склера, кожный эпителий, радужка (как правило светлые области, без высоких перепадов яркости на границе);

В - ресницы (темные области, возможны резкие перепады, неправильная геометрическая форма);

Г - тень на кожном эпителии (темные области, не имеют ярких перепадов, неправильной формы);

Д - блики от инфракрасной подсветки (светлые области, имеют высокий перепад яркости на границе, как правило округлая форма).

Таблица 1. Результат обработки потери области интереса

Область	$\left[\underset{x,y}{\operatorname{loc\,min}} A(x,y) < T_c \right]$ Выражает округлость области, монотонность, наличие высокого перепада яркости на границе	$1 - \mathcal{B}(T; x, y)$ Темная область	Результат выражения, где 0 – потеря зрачка
А	1	1	1
Б	0	0	0
В	0	1	0
Г	0	1	0
Д	1	0	0

В общем случае метод деформируемой сетки (deformable mesh method), предложенный в данной работе, на языке псевдокода представлен на листинге 1.

4. Сравнительный анализ предложенного и существующих методов. Произведен сравнительный анализ предложенного метода с основными алгоритмами поиска зрачка. Результаты представлены в таблице 2. Изображения глаз были взяты из базы CASIA-IrisV4, собранной Центром исследований биометрии и безопасности Института автоматизации Китайской академии наук [24] и просмотрены медицинским экспертом офтальмологической клиники, который указал центр (x_c, y_c) на каждом из изображений. Выбор базы CASIA-IrisV4 обусловлен ее вариативностью: высококонтрастные изображения, изображения с различными типами бликов от инфракрасной подсветки, затемненные изображения, изображения глаз, сделанные на дистанции от 2.4 до 3 метров (данная база особенно актуальна для тестирования алгоритмов на базе смартфонов или устройств, находящихся на некотором отдалении от глаз пациента), синтезированные изображения. Размер входных изображений составлял 640×480 пикселей. (x_c, y_c) считается истинной точкой и служит для проверки метода на конкретном изображении.

Предложенным методом вычислялся центр зрачка (\bar{x}, \bar{y}) на изображении. Далее происходил расчет средней абсолютной ошибки с использованием Евклидовой метрики, т.е. расстояния вычисленного центра от истинного, выраженной в пикселях:

$$E_{err} = \left((x_c - \bar{x})^2 - (y_c - \bar{y})^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

```

1: Function AccumulatedDifference ( $p$ )
2:   Input: Точка  $p$ , в которой рассчитываются накопленные разности
3:   Output: Величина функции  $s$ , граничные точки  $P$ 
4:    $\bar{p} = [ ]$ ,  $s = 0$ 
5:   If  $f(x_0, y_0) \leq T$  then
6:     Строим  $N$  лучей, из  $(x_0, y_0)$ , угол  $\theta_i$  между осью  $OX$  и лучом  $i$  равен
7:      $\varphi_i = \varphi_{i-1} + \Delta\varphi$ .  $\varphi \in [0, 2\pi]$ 
8:      $y + y_0 = k(x - x_0)$ , где  $k = \tan \varphi$ .
9:     For каждого  $i$ -го луча do
10:      For каждой точки  $(x, y)$ , лежащей вдоль направления луча  $i$  do
11:        If  $\nabla^2 G_\sigma(x, y) * f(x, y) > 0$  then
12:          Останавливаем движение по направлению луча  $i$ 
13:          Помещаем граничную точку  $q^i = (u, v)$  во множество  $P$ .
14:        For каждой  $q^i$  из множества  $P$  do
15:           $A(x_0, y_0) = A(x_0, y_0) + \left| \xi((x_0, y_0), q^i) - \xi((x_0, y_0), q^{i+1}) \right| \Delta\varphi$ 
16:        Return  $(\bar{x}, \bar{y})$ ,  $\bar{p}$ 
17:   Function SearchBasis ( $\bar{\sigma}^0, h_i, A(x, y)$ )
18:   Input: Базис  $\bar{\sigma}^0 = (x_i^0, x_j^0)$ ,  $h_i$  – шаги по  $x, y$ 
19:   Output: Новая базисная точка  $\bar{\sigma}^1$  и массив  $P$  граничных точек
20:   For каждой точки  $x_i^0$  do
21:     If  $A(\dots, x_i^0 + h_i, \dots) < A(\bar{\sigma}^0)$  then
22:        $\bar{\sigma}^1 = (\dots, x_i^0 + h_i, \dots)$ 
23:     Else
24:       If  $A(\dots, x_i^0 - h_i, \dots) < A(\bar{\sigma}^0)$  then
25:          $\bar{\sigma}^1 = (\dots, x_i^0 - h_i, \dots)$ 
26:       Else
27:         If  $\max_i h_i < \epsilon$  then
28:           Return  $\bar{\sigma}^0, \bar{p}$ 
29:         Else
30:            $h_i = 1$ 
31:       Return  $\bar{\sigma}^1$ 
32:   Function DeformableMeshMethod ( $f(x, y), \bar{\sigma}, N, \alpha, h_i, T_c$ )
33:   Input: Кадр  $f$ ,  $\bar{\sigma} = (x, y)$ ,  $N$  лучей,  $\alpha \geq 1$ ,  $h_i [1, K] i = 1, 2, T_c$ 
34:   Output: Координата центра зрачка  $(\bar{x}, \bar{y})$ , набор граничных точек  $P$ ,
35:    $\mathcal{S}_{prev} = \bar{\sigma}$ 
36:   While True do:
37:      $\mathcal{S}_{new} = \text{SearchBasis}(\bar{\sigma}, h_i, \text{AccumulatedDifference})$ 
38:     If  $\bar{\sigma} == \mathcal{S}_{new}$  then
39:       If  $[A(\bar{\sigma}) < T_c] (1 - B(T; x, y)) > 0$  then
40:         Return  $\bar{\sigma}, \bar{p}$ 
41:       Else
42:          $p = \text{Расчет аккумулятора для изображения}$ 
43:          $\text{DeformableMeshMethod}(p)$ 
44:       While True do
45:          $q = \bar{\sigma}_{new} + \alpha(\bar{\sigma}_{new} - \bar{\sigma})$ 
46:          $\ell = \text{SearchBasis}(q, h_i, \text{AccumulatedDifference})$ 
47:         If  $\text{AccumulatedDifference}(\ell) < \text{AccumulatedDifference}(\bar{\sigma})$  then
48:            $\mathcal{S}_{prev} = \bar{\sigma}$ 
49:            $\bar{\sigma} = \ell$ 
50:         Else break

```

Листинг 1. Метод деформируемой сетки. В качестве дескриптора нахождения центра зрачка используются накопленные разности длин ребер сетки, в качестве оптимизатора выступает метод Хука-Дживса

Таблица 2. Сравнительный анализ методов трекинга зрачка

Метод (использованная база изображений CASIA-IrisV4)	Вероятность правильного определения зрачка % (с погрешностью в 5-10 пикселей)		Среднее время вычислений, мс.	Возвращаемые параметры
Предложенный метод – Метод деформируемой сетки с использованием дескриптора накопленных разностей. $\varphi = 14,4^\circ$ $h_{x,y} = 3$ $\alpha = 1$	В режиме трекинга зрачка – оптимизация, без обхода всего изображения $f(x, y)$	Расчёт аккумулятора $A(x, y)$ всего изображения и поиск его $\max_{x,y} A(x, y)$	27,875 мс. в режиме трекинга. Для замера времени использовалась высокоточная библиотека chrono в C++11.	(x, y, r, \bar{P}) – центр зрачка и радиус (средние длины лучей в центре зрачка) \bar{P} – множество граничных точек
Метод рекурсивной эрозии [8]	90%		453 мс (с линейным обходом, для проверки оставшегося пикселя)	(x, y, r) r – радиус зрачка, количество итераций морфологической эрозии
Преобразование Хафа в двумерном пространстве параметров [14]	95.3%		249 мс.	(x, y)
Преобразование Хафа (Circular Hough Transform) [15-16], использовалась библиотека OpenCV в которой определен данный алгоритм	95% Возможно появление ложных окружностей (зависит от пределов поиска окружностей, т.е. минимального и максимального радиуса, установленных в алгоритме).		83,34 мс – для поиска окружности заданного радиуса (в диапазоне время значительно увеличивается).	(x, y, r)

Продолжение таблицы 2

Алгоритм Starburst [10]	74.4%	142 мс.	(x, y, \hat{P}) \hat{P} – множество граничных точек
Морфологическая обработка, контурный анализ и сверточная нейронная сеть YOLO v3 в качестве первичного детектора ROI (региона интереса) глаза в кадре [6]	98.7%	194,7 мс	(x, y, r)
Проекция яркости [8, 66 с.], бинаризация и центр масс [25].	83.1%	12-14 мс.	(x, y)
Адаптивная бинаризация на основе исследования процентильной функции [7]	96.5%	28 мс.	(x, y, r)
Гамма-коррекция, математическая морфология и преобразование Хафа [15]	97.44%	98 мс.	(x, y, r)

5. Заключение. Предложенный в данной статье способ поиска зрачка в кадре с использованием нового предложенного дескриптора накопленных разностей и нахождения аккумуляторной функции изображения обладает высокой точностью по сравнению с другими рассмотренными методами, но имеет большую вычислительную сложность.

Представив задачу трекинга зрачка с использованием дескриптора в виде задачи многомерной оптимизации, для ее решения был применен метод Хука–Дживса, который позволил не производить полный расчет аккумулятора для каждого кадра, а осуществить быстрый поиск

локального минимума аккумуляторной функции на основе координат центра зрачка, полученных с предыдущего кадра (начальная точка схождения), что дало прирост в скорости выполнения до 28 мс. на 1 кадр, при разрешении съемки в 640×480 пикселей. Данная скорость трекинга зрачка не является предельной и зависит от многих параметров, подбираемых эмпирическим путем: шаг h , коэффициент усиления α , начальная точка схождения, количество лучей сетки и точек, используемых для построения лучей.

В дальнейшем планируется произвести сравнительный анализ других численных методов оптимизации, таких как методы нулевого порядка (Нелдера–Мида, Розенброка), биоинспирированные методы оптимизации (дифференциальная эволюция, метод роя частиц и др.) [26], градиентные методы с конечно-разностными аппроксимациями с целью увеличения скорости и точности алгоритма, а также провести распараллеливание алгоритма с использованием технологии OpenCL. Также планируется детально рассмотреть вопросы устойчивости предложенного метода при обработке изображений низкого качества (зашумленные, низкая контрастность) и изображений, в которых частично или полностью отсутствует область интереса (естественное закрытие глаза, наличие линз очков между устройством айтрекером и глазом).

Метод деформируемой сетки позволяет производить поиск параметров зрачка на изображении в трехмерном пространстве параметров (x, y, r) , что дает возможность использовать алгоритм в задаче альтернативной аугментативной коммуникации для людей с нервно-паралитическими синдромами и другими болезнями ЦНС, такими как синдром «запертого человека» МКБ-10 G83.5, синдром БАС G12, спастический церебральный паралич и диплегия G80.0 и др. посредством видеоокулографии, а также в офтальмологических диагностических комплексах для определения патологии нейрорецепторного аппарата, тремора, фиксаций и саккадических движений, заболеваний зрительного нерва и др., с использованием процесса пупиллометрии, где необходимо учитывать не только положение зрачка, но и его размеры в динамике.

Использование стабильного метода оценки параметров модели на основе случайных выборок (RANSAC) позволяет увеличить точность и вероятность сходимости метода деформируемой сетки путем отброса «шумовых» точек, которые могут образовываться в процессе неправильно подобранного значения порога при исследовании гранично-ступенчатой модели (точки, прошедшие сквозь границу зрачка, влияющие

на корректный расчет дескриптора). Данный вопрос будет подробно освещен в следующей работе.

Стоит добавить, что применение предложенного в данной работе дескриптора накопленных разностей возможно и в задаче распознавания графических образов (например, при автоматической навигации беспилотного автотранспорта по знакам), используя различные вариации порога T_c . Сама концепция накопленных разностей может быть применима во время навигации и определения местоположения робототехнических устройств в замкнутых помещениях с использованием лазерных или ультразвуковых лидаров – технологии дистанционного зондирования.

Литература

1. *Masrori P., Van Damme P.* Amyotrophic lateral sclerosis: a clinical review // *European journal of neurology*. 2020. vol. 27. pp. 1918–1929.
2. *Yang Z.* Intelligent Evaluation of Strabismus in Videos Based on an Automated Cover Test // *Applied Sciences*. 2019. pp. 59.
3. *Swirski. L. Bulling. A. Dodgson. N.* Robust real-time pupil tracking in highly off-axis images // *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA)*. 2012. pp. 173–176.
4. *Utaminigrum F., Prasetya R., Arum S.Y.* Image Processing For Rapidly Eye Detection Based On Robust Haar Sliding Window // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2017. vol. 07.
5. *Durna Y., Ari F.* Design of a Binocular Pupil and Gaze Point Detection System Utilizing High Definition Images // *Applied Sciences*. 2017. vol. 7. pp. 498.
6. *Грушко Ю.В.* Аппаратно-программный комплекс аугментативной системы коммуникации на основе технологии Eye-tracking. // *Вестник КРАУНЦ*. 2019. № 27:2. С. 55–73.
7. *Bonteanu P., Cracan A., Bonteanu G., Bozomitu R.* A Robust Pupil Detection Algorithm Based on a New Adaptive Thresholding Procedure. // *IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering EHB*. 2019. pp. 276.
8. *Матвеев И.А.* Методы и алгоритмы автоматической обработки изображений радужной оболочки глаза // *Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук*. 2014.
9. *Bozomitu R. et al.* Pupil detection algorithm based on RANSAC procedure // *International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*. 2017. pp. 1–4.
10. *Dongheng L., Winfield D., Parkhurst D.J.* Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches // *Paper Presented at the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2005. vol. 3. pp. 79.
11. *Fuhl W., Santini T., Kübler T., Kasneci E.* ELS: ellipse selection for robust pupil detection in real-world environments // *The Ninth Biennial ACM Symposium*. 2016. pp. 123–130.
12. *Mohammed G., Hong B., Alkazzaz A.* Accurate Pupil Features Extraction Based on New Projection Function // *Computing and Informatics*. 2010. vol. 29. pp. 663–680.
13. *Лукошков И.А., Артемова А.А., Белов Ю.С.* Адаптивный алгоритм нахождения границ зрачка на изображении. // *Научное обозрение. Технические науки*. 2020. № 3. С. 19–23.

14. *Mameev I.A.* Поиск центра радужки на изображении методом Хафа с двумерным пространством параметров. // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2012. № 6. С. 44–51.
15. *Alkuzayy M., Alshemmary E.* Towards Accurate Pupil Detection Based on Morphology and Hough Transform // Baghdad Science Journal. 2020. vol. 17(2). pp. 583–590.
16. *Ершов Е.И.* Быстрое преобразование Хафа как инструмент анализа двумерных и трехмерных изображений в задачах поиска прямых и линейной кластеризации // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 2018.
17. *Bresenham J.* Algorithm for Computer Control of a Digital Plotter // IBM Syst. J. 1965. vol. 4. pp. 25–30.
18. *Zongli S.* Graphics Programming Principles and Algorithms. 2017.
19. *Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods.* Digital image processing 4th. 2019. 1104 с.
20. *Marr D., Hildreth E.* The theory of edge detection // M.I.T. Psychology Department and artificial Intelligence Laboratory. 1980. pp. 187–217.
21. *Ansari M., Kurchaniya D., Dixit M.* A Comprehensive Analysis of Image Edge Detection Techniques // International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering. 2017. vol. 12. pp. 1–12.
22. *Hooke R., Jeeves T.A.* Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems // Westinghouse Research Laboratories. 1961. 256 p.
23. *Медьанский М.М., Дьячук А.К.* Численные методы оптимизации с использованием MAPLE 11: Учебное пособие // М.: МАИ-ПРИНТ. 2009.
24. Chinese Academy of Sciences Institute of Automation. Iris image database, version 4. URL: <http://www.cbsr.ia.ac.cn/china/Iris20Databases20CN.asp>. (дата обращения: 2010).
25. *Mompeán J. et al.* Design of an accurate and high-speed binocular pupil tracking system based on GPGPUs // J Supercomput. 2018. vol. 74. pp. 1836–1862.
26. *Darwish A.* Bio-inspired computing: Algorithms review, deep analysis, and the scope of applications // Future Computing and Informatics Journal. 2018. vol. 3. pp. 231–246.

Грушко Юрий Васильевич – аспирант, кафедра математики и физики, ФГБОУ ВО "Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга". Область научных интересов: численные методы, математическое моделирование, data mining, нейронные сети, применение методов математического моделирования и численных методов в цифровой обработке медицинских изображений, программная инженерия комплексов с СУБД и многомерными хранилищами данных. Число научных публикаций – 3. neuralpill@gmail.com; ул. Пограничная, 4, 683032, Петропавловск-Камчатский, Россия; р.т.: +79006841757.

Паровик Роман Иванович – д-р физ.-мат. наук, доцент, декан, физико-математический факультет, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга». Область научных интересов: численные методы, математическое моделирование, математическое моделирование эрдитарных процессов. Число научных публикаций – 225. romano84@mail.ru; ул. Пограничная, 4, 683032, Петропавловск-Камчатский, Россия; р.т.: +79247926209.

Поддержка исследований. Работа выполнена при грантовой поддержке Министерства образования Камчатского края, Региональный инновационный конкурс в Камчатском крае, в номинации «научно-исследовательские и инновационные проекты в области техники и технологии», приказ №123, от 29.10.2019 г. Работа выполнена в рамках темы НИР КамГУ им. Витуса Беринга №АААА-А20-120021190005-5.

Y. GRUSHKO, R. PAROVIK
**FAST PUPIL TRACKING BASED ON THE STUDY
OF A BOUNDARY-STEPPED IMAGE MODEL AND MULTIDI-
MENSIONAL OPTIMIZATION HOOK-JIVES METHOD**

Grushko Y., Parovik R. Fast Pupil Tracking based on the Study of a Boundary-stepped Image Model and Multidimensional Optimization Hook-Jives Method.

Abstract. A new fast method for pupil detection and eyetracking real time is being developed based on the study of a boundary-step model of a grayscale image by the Laplacian-Gaussian operator and finding a new proposed descriptor of accumulated differences (point identifier), which displays a measure of the equidistance of each point from the boundaries of some relative monotonous area (for example, the pupil of the eye). The operation of this descriptor is based on the assumption that the pupil in the frame is the most rounded monotonic region with a high brightness difference at the border, the pixels of the region should have an intensity less than a predetermined threshold (but the pupil may not be the darkest region in the image). Taking into account all of the above characteristics of the pupil, the descriptor allows achieving high detection accuracy of its center and size, in contrast to methods based on threshold image segmentation, based on the assumption of the pupil as the darkest area, morphological methods (recursive morphological erosion), correlation or methods that investigate only the boundary image model (Hough transform and its variations with two-dimensional and three-dimensional parameter spaces, the Starburst algorithm, Swirski, RANSAC, ElSe).

The possibility of representing the pupil tracking problem as a multidimensional unconstrained optimization problem and its solution by the Hook-Jeeves non-gradient method, where the function expressing the descriptor is used as the objective function, is investigated. In this case, there is no need to calculate the descriptor for each point of the image (compiling a special accumulator function), which significantly speeds up the work of the method.

The proposed descriptor and method were analyzed, and a software package was developed in Python 3 (visualization) and C ++ (tracking kernel) in the laboratory of the Physics and Mathematics Faculty of Kamchatka State University of Vitus Bering, which allows illustrating the work of the method and tracking the pupil in real time.

Keywords: Mathematical Models, Detectors, Descriptors, Oculography, Eye Tracking, Amyotrophic Sclerosis, Pupil, Laplacian-Gaussian, Hook-Jeeves Method, Numerical Optimization, Hough Transform

Grushko Yuriy – Ph.D. Student, Department of Mathematics and Physics, Kamchatka State University named after Vitus Bering. Research interests: numerical methods, mathematical modeling, data mining, neural networks, application of mathematical modeling and numerical methods in digital processing of medical images, soft-ware engineering of complexes with database management systems and multidimensional data warehouses. The number of publications – 3. neuralpill@gmail.com; 4, Pogranichnaya str., 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; office phone: +79006841757.

Parovik Roman – Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Dean, Faculty of Physics and Mathematics, Kamchatka State University named after Vitus Bering. Research interests: numerical methods, mathematical modeling, Mathematical modeling of hereditary processes. The number of publications – 225. romano84@mail.ru; 4, Pogranichnaya str., 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; office phone: +79247926209.

Acknowledgements. This research is supported by the Ministry of Education of the Kamchatka Territory, the Regional Innovation Competition in the Kamchatka Territory, in the nomination "Research and Innovation Projects in the Field of Engineering and Technology", Order No. 123, dated October 29, 2019. them. Vitus Beringa No. AAAA-A20-120021190005-5.

References

1. Masrori P., Van Damme P. Amyotrophic lateral sclerosis: a clinical review. *European journal of neurology*. 2020. vol. 27. pp. 1918–1929.
2. Yang Z. Intelligent Evaluation of Strabismus in Videos Based on an Automated Cover Test. *Applied Sciences*. 2019. pp. 59.
3. Swirski L., Bulling A., Dodgson N. Robust real-time pupil tracking in highly off-axis images. Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA). 2012. pp. 173–176.
4. Utamingrum F., Prasetya R., Arum S.Y. Image Processing For Rapidly Eye Detection Based On Robust Haar Sliding Window. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2017. vol. 07.
5. Durna Y., Ari F. Design of a Binocular Pupil and Gaze Point Detection System Utilizing High Definition Images. *Applied Sciences*. 2017. vol. 7. pp. 498.
6. Grushko Y.V. [Hardware-software complex of augmentative communication system based on eyetracking technology]. *Vestnik KRAUNC – Bulletin KRAUNZ*. 2019. vol. 27:2. pp. 55–73. (In Russ.).
7. Bonteanu P., Cracan A., Bonteanu G., Bozomitu R. A Robust Pupil Detection Algorithm Based on a New Adaptive Thresholding Procedure. IEEE International Conference on e-Health and Bioengineering EHB. 2019. pp. 276.
8. Matveev I.A. [Methods and algorithms for automatic processing of images of the iris of the eye. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. 2014. (In Russ.).
9. Bozomitu R. et al. Pupil detection algorithm based on RANSAC procedure. *International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*. 2017. pp. 1–4.
10. Dongheng L., Winfield D., Parkhurst D.J. Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches. Paper Presented at the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005. vol. 3. pp. 79.
11. Fuhl W., Santini T., Kübler T., Kasnecki E. ElSe: ellipse selection for robust pupil detection in real-world environments. The Ninth Biennial ACM Symposium. 2016. pp. 123–130.
12. Mohammed G., Hong B., Alkazzaz A. Accurate Pupil Features Extraction Based on New Projection Function. *Computing and Informatics*. 2010. vol. 29. pp. 663–680.
13. Lukoshkov I.A., Artemova A.A., Belov Ju.S. [Adaptive algorithm for finding the boundaries of the pupil in the image]. *Nauchnoe obozrenie. Tehnicheskie nauki – Scientific Review. Technical science*. 2020. vol. 3. pp. 19–23. (In Russ.).
14. Matveev I.A. [Finding the center of the iris in the image by the Hough method with a two-dimensional space of parameters]. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Teorija i sistemy upravlenija – Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Control theory and systems*. 2012. vol. 6. pp. 44–51. (In Russ.).
15. Alkuzayy M., Alshemmary E. Towards Accurate Pupil Detection Based on Morphology and Hough Transform. *Baghdad Science Journal*. 2020. vol. 17(2). pp. 583–590.
16. Ershov E. I. [Fast Hough transform as a tool for analyzing 2D and 3D images in problems of search straight lines and linear clustering. Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences]. 2018. (In Russ.).

17. Bresenham J. Algorithm for Computer Control of a Digital Plotter. *IBM Syst. J.* 1965. vol. 4. pp. 25–30.
18. Zongli S. Graphics Programming Principles and Algorithms. 2017.
19. Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital image processing 4th. 2019. 1104 с.
20. Marr D., Hildreth E. Theory of edge detection. M.I.T. Psychology Department and artificial Intelligence Laboratory. 1980. pp. 187–217.
21. Ansari M., Kurchaniya D., Dixit M. A Comprehensive Analysis of Image Edge Detection Techniques. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering.* 2017. vol. 12. pp. 1–12.
22. Hooke R., Jeeves T.A. Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems. Westinghouse Research Laboratories. 1961. 256 p.
23. Medynskij M.M., D'jachuk A.K. *Chislennye metody optimizacii s ispol'zovaniem MAPLE 11: Uchebnoe posobie* [Numerical optimization methods using Maple 11: A Tutorial]. Moscow: publishing house MAI-PRINT, 2009. 288 p. (In Russ.).
24. Chinese Academy of Sciences Institute of Automation. Iris image database, version 4. Available at: <http://www.cbsr.ia.ac.cn/china/Iris20Databases20CH.asp>. (accessed: 2010).
25. Mompeán J. et al. Design of an accurate and high-speed binocular pupil tracking system based on GPGPUs. *J Supercomput.* 2018. vol. 74. pp. 1836–1862.
26. Darwish A. Bio-inspired computing: Algorithms review, deep analysis, and the scope of applications. *Future Computing and Informatics Journal.* 2018. vol. 3. pp. 231–246.

А.Н. ГОЛУБИНСКИЙ, А.А. ТОЛСТЫХ
**ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ОБУЧЕНИЯ СВЕРТОЧНЫХ
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

Голубинский А.Н., Толстых А.А. Гибридный метод обучения сверточных нейронных сетей.

Аннотация. Предложен гибридный метод обучения сверточных нейронных сетей. Метод заключается в объединении методов второго и первого порядка для разных элементов архитектуры сверточной нейронной сети. Гибридный метод обучения сверточных нейронных сетей позволяет добиваться значительно лучшей сходимости по сравнению с методом обучения сверточных нейронных сетей «Adam» и требует меньше вычислительных операций для реализации. Рассматриваемый метод применим для обучения сетей, на которых происходит паралич обучения при использовании методов первого порядка. Более того, предложенный метод обладает способностью подстраивать свою вычислительную сложность под аппаратные средства, на которых производится вычисление, вместе с тем гибридный метод позволяет использовать подход обучения мини-пакетов.

Приведен анализ соотношения вычислений между сверточными нейронными сетями и полносвязными искусственными нейронными сетями. Рассмотрен математический аппарат оптимизации ошибки искусственных нейронных сетей, включающий в себя метод обратного распространения ошибки, алгоритм Левенберга-Марквардта. Проанализированы основные ограничения данных методов, возникающие при обучении сверточной нейронной сети.

Проведен анализ устойчивости предлагаемого метода при изменении инициализирующих параметров. Приведены результаты применимости метода в различных задачах.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, методы обучения искусственных нейронных сетей, методы оптимизации

1. Введение. В задаче классификации объектов на телевизионных изображениях широко применяют сверточные нейронные сети (СНС), которые показывают в данном классе задач наилучшие результаты [1, 2]. Однако существует набор проблем, присущих этому подходу.

В настоящий момент невозможно использовать детерминистические алгоритмы оптимизации функции ошибки СНС в реальных задачах ввиду их большой вычислительной сложности, что влечет за собой трудности при обучении СНС. Основным инструментом обучения СНС являются стохастический метод и его модернизации [1, 3, 4]. Данные методы подвержены сильному воздействию начальных условий и не могут гарантировать сходимость. С другой стороны, существуют методы оптимизации второго порядка [5, 6], которые гарантируют сходимость и менее зависимы от способа инициализации. Их основной проблемой является большая вычислительная сложность и использование большего объема памяти.

СНС можно разделить на параметризатор и классификатор. Первый представляет собой набор сверточных слоев и слоев подвыборки разной конфигурации, второй – полносвязную искусственную нейронную сеть (ПИНС). Обычно классификатор имеет в своей архитектуре 3–4 полносвязных слоя, в то время как параметризатор может иметь сотни и даже тысячи слоев [7, 8]. Методы обучения сверточных нейронных сетей как первого, так и второго порядков, используют понятие градиента, через которое могут быть связаны. Таким образом, методы второго порядка целесообразно применить к классификатору, получив на входе классификатора градиент, который будет передан методам первого порядка для оптимизации параметризатора.

В литературе в явном виде отсутствуют сведения о применении методов обучения второго порядка к СНС, в связи с этим необходимо рассмотреть эквивалентность сверточных и полносвязных слоев для адаптации вышеуказанных алгоритмов к СНС. Методы обучения первого порядка имеют ряд существенных недостатков, связанных с медленной скоростью обучения, возникновением эффекта паралича сети и др., что обуславливает актуальность научно-прикладных исследований по применению методов второго порядка к СНС.

Целью работы является разработка гибридного метода обучения СНС в задачах классификации объектов на цифровых изображениях, позволяющего эффективно обучать СНС, достигая заданного критерия останова.

2. Анализ эквивалентности СНС и ПИНС. Рассмотрим подробнее архитектуру сверточных слоев для анализа их эквивалентности полносвязным слоям. На рисунке 1 приведена схема сверточного слоя (СЛ).

Каждая карта СЛ-слоя может быть связана с некоторым количеством карт предыдущего слоя. Из рис. 1 видно, что карта СЛ связана с двумя картами предыдущего слоя или входного слоя, которые располагаются перед ней. Каждый нейрон СЛ имеет рецептивное поле (РП) сразу на двух картах в идентичных позициях предыдущего слоя. На рисунке 1 РП размером 2×2 обозначены сплошной линией и штрих-пунктиром. Значит, для нейрона СЛ необходимо 8 настраиваемых параметров (весов) с учётом смещения (*bias*). Особенность СЛ заключается в том, что для всех положений РП используются одни и те же веса. Такие веса называются связанными (*sharing weights*). Пунктиром на рис. 1 обозначено РП для следующего нейрона. Эти РП пересекаются, шаг пересечения регулируется на этапе построения СНС. РП и общие веса – это встроенная априорная информация, которая является составной частью гиперпараметров, за счёт которой происходит выделение признаков. Нейроны СЛ имеют структуру, представленную на рисунке 2.

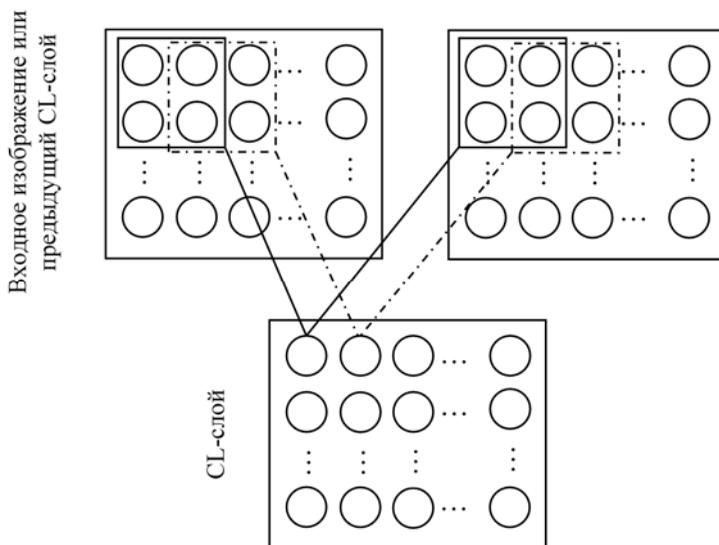


Рис. 1. Схема сверточного слоя (CL)

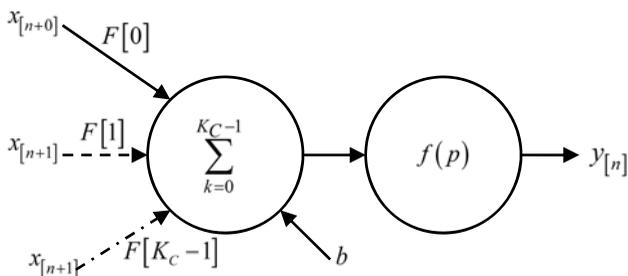


Рис. 2. Структура нейрона CL

На рисунке 2 K_C – общее количество нейронов или элементов входного вектора, входящих в РП n -го нейрона CL; $F[k]$ – настраиваемые веса нейрона; b – смещение n -го нейрона, причём b и $F[k]$ – одни и те же для всей карты CL; $x[n+k]$ – входные данные для n -го нейрона CL $k=0 \dots K_C-1$. Входные данные $x[n+k]$ дают взвешенную сумму с настраиваемыми параметрами $F[k]$:

$$p = b + \sum_{k=0}^{K_C-1} F[k]x_{n+k}. \quad (1)$$

Ядро выбирается исходя из размеров изображения, поступающего на вход СНС, шага сканирующего окна и заданной вычислительной сложности СНС. В общем случае ядро может быть любой прямоугольной матрицей, включая 1×1 [9]. Отклик нейрона определяет функция активации, на вход которой поступает взвешенная сумма p . Наиболее часто [1, 9, 7] используется семейство кусочно-линейных функций (*Rectified Linear Unit, ReLU*). Типичная кусочно-линейная функция выглядит следующим образом:

$$f(x) = \max(0, x), \quad (2)$$

где x – отклик нейрона; f – кусочно-линейная функция активации.

Рассмотрим одно ядро F CL. Пусть вход CL X имеет размерность $3 \times 6 \times 4$, где первое измерение обозначает количество карт признаков во входных данных (например, цветовые каналы, в случае поступления на вход изображения). Сверточное ядро положим размерностью 2×2 , смещения $S = 2$, заполнение нулями $P = 0$ по каждому измерению. Для каждой ячейки выходной карты признаков необходимо произвести операцию:

$$a = f \left(\sum_{c=0}^2 \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^1 X_{c,i \cdot 2+i, j \cdot 2+j} \odot F + b \right), \quad (3)$$

где $i \cdot 2 + i, j \cdot 2 + j$ – способ выбора подматрицы X ; \odot – поэлементное умножение. Индексы матриц считаются с «0». Заметим, что необходимо вычислить 6 положений сканирующего окна для одного канала. Данное вычисление представлено графически на рисунке 3.

На рисунке 4 представлена схема выбора значений внутри сканирующего окна [1]: стрелками изображен способ преобразования двумерного изображения к одномерной последовательности пикселей, в рамках сканирующего окна.

Приведем схему из рисунка 3 к полностью связанному виду (рис. 5), используя схему выбора значений внутри скользящего окна, приведенную выше.

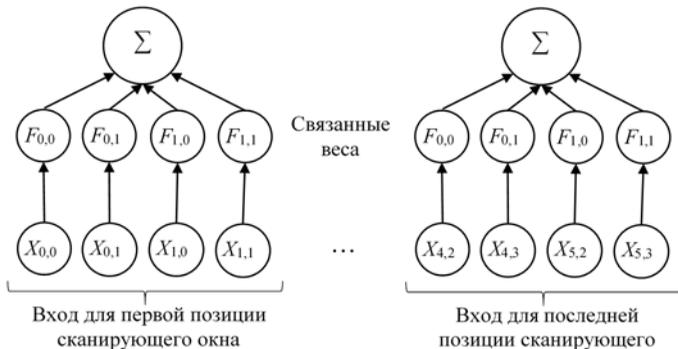


Рис. 3. Схема вычисления отклика без активации для одного сверточного ядра и одной карты признаков входных данных

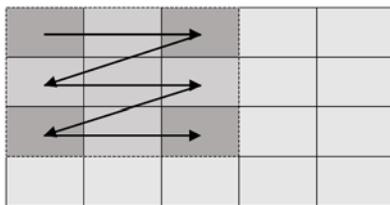


Рис. 4. Схема выбора значений внутри сканирующего окна

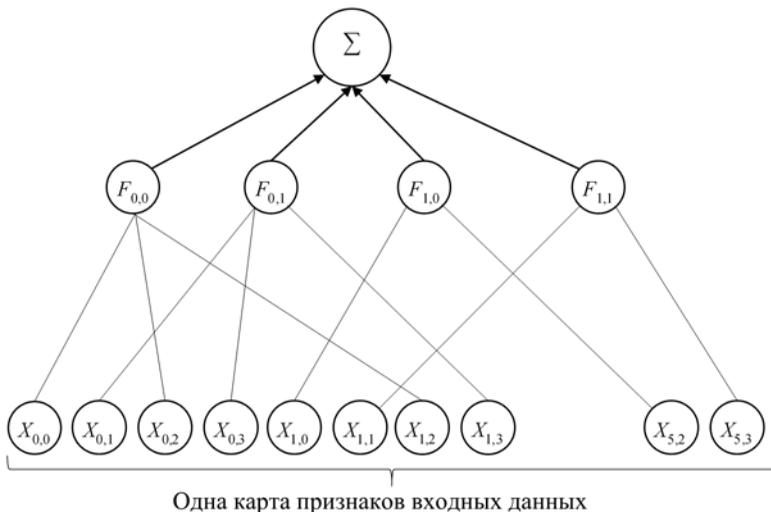


Рис. 5. Схема вычисления отклика без активации для одного сверточного ядра и одной карты признаков входных данных в виде полносвязного слоя

Как видно из рисунка 5, операцию вычисления для одного сверточного ядра и одной карты признаков входных данных можно представить как разреженный полносвязный слой. В данном случае каждый вес сверточного ядра участвует только в 6 операциях, вместо 24. Определим оператор $M(\cdot)$, преобразующий вычисление для одного сверточного ядра и одной карты признаков входных данных к вычислению разреженного полносвязного слоя:

$$M\left(CL_F^C(X, F)\right) \rightarrow MLP(X, F), \quad (4)$$

где C – конкретная карта признаков входных данных; F – ядро для данной карты. Оператор M преобразует входную карту признаков к виду вектор-строки, а также преобразует веса ядра F к виду матрицы размером $[f_1 f_2 \times s_1 s_2]$, где s_1, s_2 – количество смещений, получаемое при проходе сканирующим окном по вертикали и горизонтали соответственно; f_1, f_2 – размерность ядра по вертикали и горизонтали соответственно. Используя (3) и свойство коммутативности умножения, группа преобразований входных данных будет иметь вид:

$$X' = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^1 X_{i+2+i, j+2+j}, X[2 \times 2] \rightarrow X'[1 \times 4], \quad (5)$$

или, в общем случае:

$$X' = \sum_{i=0}^{s_1} \sum_{j=0}^{s_2} X_{i+f_1+i, j+f_2+j}, X' \propto F \rightarrow X'[1 \times f_1 f_2], \quad (6)$$

Вторая группа преобразований в операторе M – преобразование ядра к виду вектор-строки. Данное преобразование выглядит следующим образом:

$$F'_C = F_C \rightarrow F'_C[f_1 f_2 \times 1]; F'_C = IF'_C, \quad (7)$$

где I – диагональная единичная матрица размерностью $[f_1 f_2 \times f_1 f_2]$. Следует отметить, что веса вне основной диагонали не чувствуют в обучении (*frozen parameters*).

Используя принцип преобразования (см. рис. 4), получим вычисление одного сверточного ядра и одной карты признаков входных данных к вычислению разреженного полносвязного слоя:

$$M\left(CL_F^c(X, F)\right): \begin{cases} X'_C = \sum_{i=0}^{s_1} \sum_{j=0}^{s_2} X_{C, i, f_1+i, j, f_2+j}, & X'_C \propto F_C \rightarrow X'_C [1 \times f_1 f_2] \\ F'_C = F_C \rightarrow F'_C [f_1 f_2 \times 1]; & F'_C = IF'_C; \\ p_C = X'_C F'_C. \end{cases} \quad (8)$$

Рассмотрим операцию по вычислению свертки для всех карт признаков входных параметров, преобразуем выражение (3) с учетом (8):

$$\begin{aligned} a &= f\left(\sum_{c=0}^2 \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^1 X_{c, i, 2+i, j, 2+j} \odot F + b\right) = \\ &= f\left(\sum_{c=0}^2 M\left(CL_F^c(X, F)\right)\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Графически данная операция представлена на рисунке 6.

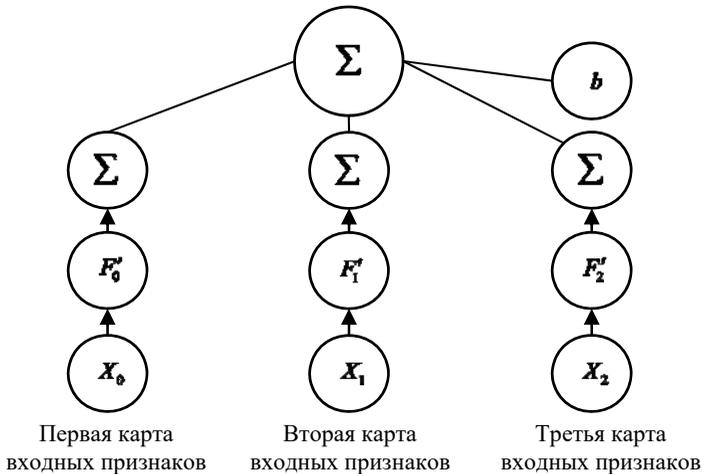


Рис. 6. Операция по вычислению свертки для всех карт признаков входных параметров

Данная операция аналогична вычислению 3х полносвязных слоев с последующим поэлементным сложением. Введем оператор $D(\cdot)$, выполняющий следующее преобразование:

$$D(X, F): \sum_{c=0}^2 M \left(CL_F^C (X, F) \right) + b. \quad (10)$$

Таким образом, для обработки одного сверточного слоя необходимо вычислить C независимых полносвязных разреженных слоя. Обработка сверточного слоя сводится к:

$$a = f \left(\sum_{c=0}^2 \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^1 X_{c,i \cdot 2+i,j \cdot 2+j} \odot F_c + b \right) = f(D(X, F)). \quad (11)$$

в общем виде:

$$a = f \left(\sum_{c=0}^C \sum_{i=0}^{s_1} \sum_{j=0}^{s_2} X_{c,i \cdot s_1+i,j \cdot s_2+j} \odot F_c + b \right) = f(D(X, F)). \quad (12)$$

Данное преобразование позволяет более тонко настраивать свертку, вводя в диагональную матрицу весов из (8) дополнительные веса вне главной диагонали.

Рассмотрим обратное распространение ошибки через CL-слой, представленный оператором D . Данная операция аналогична классическому обратному распространению ошибки. Для экономии ресурсов целесообразно использовать маску:

$$\Delta M \left(CL_F^C (X, F) \right) = \Delta MLP \odot m. \quad (13)$$

где m – маска, формируемая по следующему принципу:

$$m_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}. \quad (14)$$

Учитывая замечание о том, что для более точной настройки свертки в (8) вводятся дополнительные веса вне главной диагонали, маска изменяется в соответствии с введенными весами. Учитывая, что матричное умножение разреженных матриц – дорогая операция, её следует заменить поэлементным умножением, градиенты в таком случае вычисляются на основе концепции вычислительного графа [10].

Таким образом, продемонстрирована эквивалентность СНС и ПИНС с разреженной матрицей весов.

3. Анализ методов обучения искусственных нейронных сетей.

В настоящее время наиболее используемым методом обучения искусственных нейронных сетей (ИНС) является метод обратного распространения ошибки (его модификации, например Adam [3]). Для дальнейшего применения следует рассмотреть классический метод обратного распространения ошибки, ввиду того, что модификации не изменяют его изначальной идеи. При рассмотрении будет использоваться наиболее простая функция ошибки – среднеквадратичная ошибка. Пусть ИНС имеет множество входных нейронов x_1, \dots, x_n , множество выходных нейронов y_1, \dots, y_n и множество скрытых нейронов. Перенумеруем все узлы (включая входы и выходы) числами от 1 до N (сквозная нумерация, вне зависимости от топологии слоёв). Обозначим через w_{ij} вес, находящийся на ребре, соединяющем i -й и j -й узлы, а через r_i – выход i -го узла. Если известен обучающий пример – правильные ответы сети, такие что $y_k, k \in Y$. В данном случае функция ошибки будет иметь вид [2]:

$$E(\{w_{i,j}\}) = \frac{1}{2} \sum_{k \in Y} (t_k - r_k)^2. \quad (15)$$

Чтобы достигнуть минимума ошибки, необходимо двигаться в сторону, противоположную градиенту, то есть, на основании каждой группы правильных ответов, добавлять к каждому весу w_{ij} :

$$\Delta w_{i,j} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{i,j}}. \quad (16)$$

Производная функции ошибки считается следующим образом. Пусть сначала $j \in Y$, то есть вес входит в нейрон последнего слоя. Следует отметить, что w_{ij} влияет на выход сети только как часть суммы:

$$S_j = \sum_i w_{i,j} x_i, \quad (17)$$

где сумма берется по входам j -го узла. Из этого следует:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{i,j}} = \frac{\partial E}{\partial S_j} \frac{\partial S_j}{\partial w_{i,j}} = x_i \frac{\partial E}{\partial S_j}. \quad (18)$$

Аналогично, S_j влияет на общую ошибку только в рамках выхода j -го узла r_j . Поэтому [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial S_j} &= \frac{\partial E}{\partial r_j} \frac{\partial r_j}{\partial S_j} = \left(\frac{\partial}{\partial r_j} \frac{1}{2} \sum_{k \in Y} (t_k - r_k)^2 \right) \left(\frac{\partial f(S)}{\partial S} \Big|_{S=S_j} \right) = \\ &= -2\alpha r_j (1 - r_j) (t_j - r_j), \end{aligned} \quad (19)$$

где $f(S)$ – функция активации (в рассматриваемом случае экспоненциальная сигмоида). Если же j -й узел не на последнем слое, то у него есть выходы. Обозначим их через $C(j)$. В этом случае:

$$\frac{\partial E}{\partial S_j} = \sum_{k \in C(j)} \frac{\partial E}{\partial S_k} \frac{\partial S_k}{\partial S_j}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial S_k}{\partial S_j} = \frac{\partial S_k}{\partial r_j} \frac{\partial r_j}{\partial S_j} = w_{j,k} \frac{\partial r_j}{\partial S_j} = 2\alpha w_{j,k} r_j (1 - r_j). \quad (21)$$

Описанный подход (17-21) имеет ряд недостатков. Во-первых, явление паралича сети. В процессе обучения сети значения весов могут, в результате коррекции, стать очень большими величинами. Данный факт может привести к тому, что все или большинство нейронов будут функционировать при очень больших выходных значениях в области, где производная функции активации мала. Так как посылаемая обратно в процессе обучения ошибка пропорциональна этой производной, то процесс обучения может практически замереть. В теоретическом отношении эта проблема плохо изучена. Обычно этого избегают уменьшением размера шага η , но это увеличивает время обучения. Различные эвристики [1, 2, 11] позволяют избежать паралич или восстановить процесс обучения после него, но пока что они могут рассматриваться лишь

как экспериментальные. Во-вторых, алгоритм чувствителен к локальным минимумам. Обратное распространение использует разновидность градиентного спуска, то есть осуществляет спуск вниз по гиперповерхности ошибки, непрерывно подстраивая веса в направлении к минимуму. Гиперповерхность ошибки сложной сети сильно изрезана и состоит из холмов, долин, складок и оврагов в пространстве высокой размерности. Сеть может попасть в локальный минимум, когда рядом имеется гораздо более глубокий минимум. В точке локального минимума все направления ведут вверх, и сеть неспособна из него выбраться. Основную трудность при обучении нейронных сетей составляют как раз методы выхода из локальных минимумов: каждый раз выходя из локального минимума снова ищется следующий локальный минимум тем же методом обратного распространения ошибки до тех пор, пока найти из него выход уже не удаётся.

Методы второго порядка получили свое название благодаря использованию второй производной функции ошибки, а также аппроксимированного гессиана ИНС. В общем случае сущность данных методов можно выразить с помощью следующего соотношения [12]:

$$W_n = W_{n-1} - (H^{-1} \cdot g), \quad (22)$$

где W – веса ИНС; n – текущая эпоха обучения; H – гессиан функции ошибки; g – вектор градиента функции ошибки. Рассмотрим подробнее каждую составляющую данного выражения. Веса ИНС W представляют собой одномерный вектор, в который последовательно включены веса и смещения всех слоев ИНС. Градиент g представляет собой вектор, содержащий производную ошибки по каждому из весов и смещений [5]:

$$g = \nabla E = \begin{bmatrix} \frac{\partial E}{\partial w_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial E}{\partial w_k} \end{bmatrix}, \quad w \in W. \quad (23)$$

Гессиан по определению [12] является матрицей вторых производных функции ошибки E :

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_1} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_1 \partial w_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 E}{\partial w_k \partial w_1} & \dots & \frac{\partial^2 E}{\partial w_k \partial w_k} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Вычисление гессиана является крайне затратной вычислительной процедурой. Так как необходимо вычислить k^2 вторых производных многомерной функции, где k – количество весов и смещений в ИНС.

Наиболее эффективным методом из данного класса является метод Левенберга-Марквардта, заключающийся в аппроксимации гессиана с помощью якобиана. Гессиан аппроксимируется следующим образом [5]:

$$H \approx J^T J + \mu I, \quad (25)$$

где H – гессиан; J – якобиан; μ – параметр регуляризации, изменяющийся в процессе выполнения алгоритма; I – единичная матрица размерностью $J^T J$, в некоторых источниках [5] предлагается использование диагональных элементов якобиана вместо единичной матрицы. Однако при проведении экспериментов значительные отличия применения единиц или элементов якобиана на диагонали I обнаружены не были.

Градиент (23) в данном методе вычисляется следующим образом:

$$g = \nabla E = J^T e; \quad e = d - r = \begin{bmatrix} e_{11} \\ \vdots \\ e_{M1} \\ e_{12} \\ \vdots \\ e_{MP} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

где e – векторизованная ошибка; d – истинное значение выхода ИНС; r – отклик ИНС; M – количество выходов; P – количество объектов в обучающей выборке.

Рассмотрим составление матрицы якобиана. Так как якобиан – это матрица частных производных функции ошибки по всем настраиваемым параметрам модели, в случае ИНС – весам и смещениям, на

всей обучающей выборке [13], то размер данной матрицы составит $(P \cdot M) \times T$, где T – количество весов и смещений ИНС. В общем случае на каждой строке якобиана содержатся частные производные функции ошибки по всем весам и смещениям модели для конкретного выхода и объекта из обучающей выборки. Формально это выглядит следующим образом:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(P_1)}{\partial W_1} & \dots & \frac{\partial e_1(P_1)}{\partial W_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_{MP}(P_P)}{\partial W_1} & \dots & \frac{\partial e_{MP}(P_P)}{\partial W_T} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Следует отметить, что для применения метода Левенберга-Марквардта удобнее представлять смещения как дополнительный вес нейрона, на вход которого всегда подается единица, подробнее данный подход к вычислению смещений рассмотрен в [2]. Для вычисления отдельных элементов якобиана необходимо модифицировать метод обратного распространения ошибки. Введем в (17) обозначение слоя и произведем замену входных данных на отклик предыдущего слоя для общности изложения:

$$s_j^l(p) = \sum_i w_{ji}^l y_i^{l-1}(p), \quad (28)$$

где y – отклик предыдущего слоя, p – текущий объект из обучающей выборки P ; l – текущий слой ИНС; j – текущий нейрон в j -ом слое; i – вес j -го нейрона. Отклик текущего слоя выражается следующим образом:

$$y_j^l(p) = f(s_j^l(p)), \quad (29)$$

где $f(\cdot)$ – функция активации. Используя (27) и применяя правило дифференцирования по частям [11], элемент якобиана будет иметь вид:

$$\frac{\partial e_m(p)}{\partial w_{ji}^l} = -\frac{\partial r_m(p)}{\partial y_j^l(p)} \cdot \frac{\partial y_j^l(p)}{\partial s_j^l(p)} \cdot \frac{\partial s_j^l(p)}{\partial w_{ji}^l}, \quad (30)$$

где m – текущий выход из набора M .

После вычисления матрицы якобиана для изменения весов ИНС необходимо выполнить процедуру, аналогичную обратному распространению ошибки [5]. Для проведения операции обратного распространения ошибки необходимо вычислить производную функции, описывающей преобразование сигнала между выходом нейрона j слоя l и выходом сети m на объекте из обучающей выборки p :

$$\delta_{mj}^l = -\partial F_{mj}^l(p) \cdot \partial f_j^l(p), \quad (31)$$

где $\partial f_j^l(p)$ – значение производной функции активации для нейрона j слоя l на объекте из обучающей выборки p . Для нейрона j выходного слоя $l=L$, выхода сети m и объекта обучающей выборки p значение производной описываемой функции определяется следующим образом [5]:

$$\partial f_{mj}^{l=L}(p) = \begin{cases} -\partial f_j^{l=L}(p), & \text{если } m = j \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad (32)$$

Для полного описания производной функции, описывающей преобразование сигнала между выходом нейрона j выходного слоя $l=L$ и выходом сети m на всех объектах обучающей выборки P , необходимо P диагональных матриц $M \times M$, где M – количество выходов ИНС. После вычисления производной передаточной функции для выходного слоя последовательно вычисляются передаточные функции для всех остальных слоев:

$$\delta_{mk}^l(p) = \sum_{i(l+1)} \left(w_{ki}^{l+1} \cdot \delta_{mk}^l(p) \right) \cdot \partial f_k^l(p), \quad (33)$$

где k – нейрон скрытого слоя l , i – скрытый нейрон последующего слоя $l+1$. Выражение (33) может быть записано в матричной форме (для каждого объекта p из обучающей выборки) [5]:

$$\delta^l(p) = \delta^{l+1}(p) \cdot W^l \odot \left(\partial f^l(p) \right)^T, \quad (34)$$

где \odot – поэлементное умножение матриц. Обобщенная схема алгоритма обучения Левенберга-Марквардта представлена на рисунке 7.

Алгоритм Левенберга-Марквардта наиболее устойчив к изменению начальной инициализации параметров ИНС, а также наиболее быстро сходится [14]. Недостатком данного алгоритма является высокая вычислительная сложность.

Для корректного сравнения алгоритмов обучения ИНС следует сравнить их основные характеристики: вычислительную сложность и используемое количество ячеек памяти.

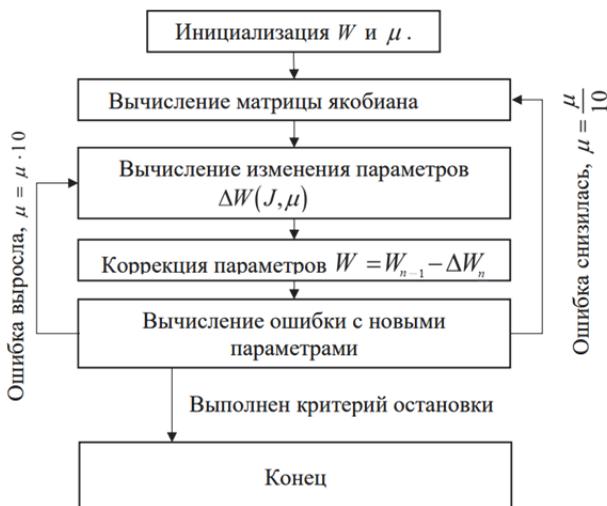


Рис. 7. Обобщенная схема алгоритма обучения Левенберга-Марквардта

4. Гибридный алгоритм обучения ИНС. Предложенная модификация заключается в гибридизации двух методов – Левенберга-Марквардта [5] и Adam [3]. Сочетание методов разных порядков возможно благодаря тому факту, что в якобиане и значении ошибки в косвенном виде присутствуют значения градиентов (26). Таким образом, вычисляется градиент на классификаторе СНС, а далее информация о градиентах передается в метод первого порядка Adam для вычисления весов сверточной части сети (параметризатора). Данная гибридизация методов обучения позволяет увеличивать эффективность шага изменения параметров в полносвязной части СНС, а также избегать излишней вычислительной сложности при вычислении изменения параметров сверточной части. Схема гибридного алгоритма обучения ИНС приведена на рисунке 8.

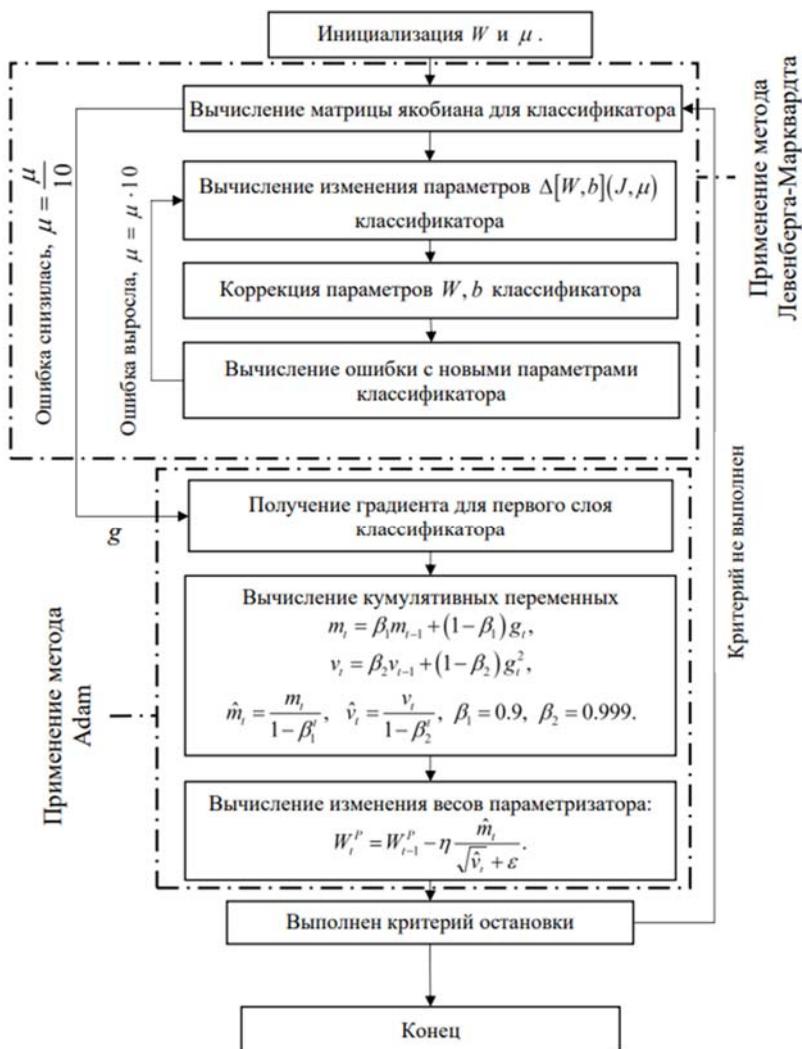


Рис. 8. Схема гибридного алгоритма обучения ИНС

На первом этапе, как и во всех алгоритмах обучения ИНС [1, 2], инициализируются параметры СНС – веса W и смещения b . При реализации данного алгоритма использовалась инициализация весов, описанная в [8]. Далее выполняются вычисления откликов СНС и ошибки

классификации. Затем выполняется цикл вычисления приращений параметров W , b классификатора с помощью (22), (25)-(34).

Градиенты, вычисленные на данном шаге, сохраняются в памяти для последующего использования. После вычисления приращений параметров W , b классификатора градиенты g передаются в параметризатор и вычисляются приращения параметров W , b параметризатора с помощью метода Adam. В конце итерации гибридный алгоритм вычисляет ошибку классификации при измененных весах и сравнивает её с критерием останова. В реализации использовались критерии [14]:

$$10 \log \left(\frac{1}{4Qp} \right), \quad (35)$$

где Q – количество объектов в обучающей выборке; p – количество выходов СНС. Данный критерий выбирался в связи с тем, что при инициализации сети ошибки распознавания составляли порядка 100% [14]. Следует отметить, что при использовании мини-пакетов (mini-batches) критерий останова рассчитывается от количества всех объектов в обучающей выборке, а не от количества объектов в мини-пакете. Ошибка обучения данного метода приводилась к показателю в децибелах:

$$E^{dB} = 10 \log \left(\frac{\sum_{k \in p} (y_k^0 - u_k)^2}{\sum_{k \in p} (y_k^n - u_k)^2} \right), \quad (36)$$

где n – текущая эпоха обучения; u – отклик при инициализации сети.

Предложенный алгоритм позволяет производить обучение СНС как в режиме обработки всех обучающих данных одновременно, так и в режиме мини-пакетов. Для использования режима мини-пакетов необходимо арифметически усреднить приращения параметров W , b по всем мини-пакетам.

Для оценки сложности рассмотренных алгоритмов введем следующие обозначения [15]: α – количество операций сложения, вычитания и сравнения; β – количество операций умножения и деления; γ – количество нелинейных операций логарифмирования, вычисления

экспоненты. В таблице 1 приведены полученные аналитические оценки на основе учета количества требуемых тактов для каждой операции сложности составных частей для алгоритмов обучения СНС. Степень соответствия полученных оценок подтверждается экспериментальным сравнением приведенных оценок с реализацией ИНС (с использованием библиотеки тензорных вычислений TensorFlow). Результаты сравнения приведены на рисунке 9.

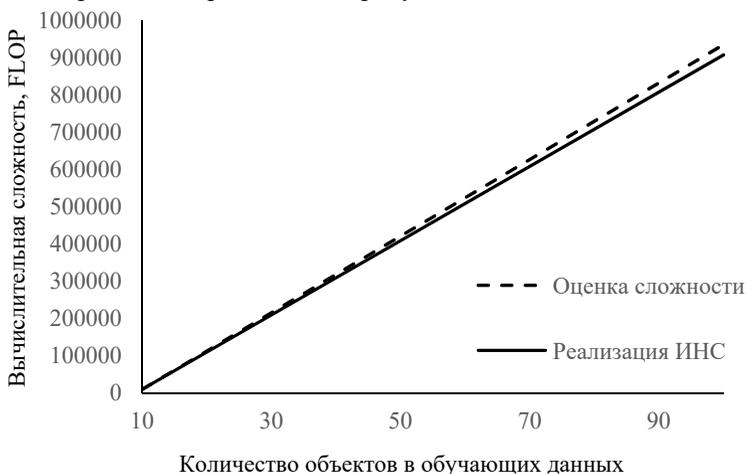


Рис. 9. Сравнение полученных оценок вычислительной сложности с реализацией ИНС

На рисунке 10 приведен график зависимости возрастания вычислительной сложности рассмотренных алгоритмов в зависимости от размера батча и количество скрытых нейронов в последнем скрытом слое для СНС с архитектурой:

- входные данные: тензор $15 \times 10 \times 1$;
- 3 сверточных ядра 5×5 со смещением 5 в первом CL;
- слой подвыборки 3×2 с единичным смещением в MP слое;
- 2 нейрона в первом скрытом слое;
- 1 выходной нейрон.

Из рисунка 10 видно, что данная модификация алгоритма позволяет обучать СНС имеющие любую архитектуру в то время, как классический метод Левенберга-Марквардта не позволяет работать с относительно большими СНС – требуется производить операции

с большими матрицами (размерностью количество параметров \times количество обучающих объектов).

Таблица 1. Вычислительная сложность слоев СНС

Слой СНС	Аналитическая оценка сложности
Прямое вычисление СНС	
Полносвязный слой	$b[n_i n_{i-1}(\alpha + \beta) + n_i(\beta + \gamma)]$ <p>b_i – количество объектов в батче; n_i – количество нейронов на i слое.</p>
Слой подвыборки	$bCWHm_w m_h(\alpha);$ $W = \frac{M_w - F_w}{S_w} + 1;$ $H = \frac{M_h - F_h}{S_h} + 1.$ <p>C – количество каналов в предыдущем слое; M – входной тензор; h, w – высота и ширина соответственно; S – смещение; m – окно подвыборки.</p>
Сверточный слой	$b[KCWH(\alpha + \gamma) + KCWHf_w f_h(\beta)];$ $W = \frac{M_w - F_w + 2P_w}{S_w} + 1;$ $H = \frac{M_h - F_h + 2P_h}{S_h} + 1.$ <p>K – количество ядер; f – матрица ядра; S – смещение; P – заполнение нулями.</p>
Adam	
Выходной полносвязный слой	$\delta = (d - y)N(1 - N);$ $b[n n_{i-1}(10\alpha + 13\beta + 2\gamma + 2t\beta)],$ <p>δ – составляющая градиента без умножения на входной вектор; N – отклик сети.</p>
Полносвязный слой	$\delta = \delta_{i+1}W;$ $n_i n_{i-1}(10\alpha + 15\beta + 2\gamma + n_i n_{i+1}\alpha + n_i n_{i+1}\beta + 2t\beta),$ <p>n_i – количество нейронов в слое i, W – веса предыдущего слоя.</p>
Слой подвыборки	Нет настраиваемых параметров

Продолжение таблицы 1

Слой СНС	Аналитическая оценка сложности
Сверточный слой	$\delta = \delta_{i+1} w_{i+1} \max(0, CL);$ $Kf_w f_h \left[7\alpha + 9\beta + 2t\beta + KCWH(\alpha + \gamma) + KCWHf_w f_h(\beta) \right];$ $W = \frac{M_w - F_w + 2P_w}{S_w} + 1;$ $H = \frac{M_h - F_h + 2P_h}{S_h} + 1,$ <p>CL – отклик сверточного слоя; w – веса ядра сверточного слоя.</p>
Метод Левенберга-Марквардта	
Построение Якобиана	<p>Выходной слой: $J_{вых} = bp \cdot [n_{i-1}\beta];$</p> <p>слой i: $J_i = bp \left[2n_i n_{i-1}^2 \left[\sum_{k=0}^{i-1} kn_{k-1}\beta + \beta \right] \right],$</p> <p>$J_i$ – якобиан для i-го слоя; p – количество объектов в батче.</p>
Аппроксимация якобиана	$H \approx J^T J + \mu I : l^{3/2} \log l + l^{2.37} + l\beta + l\alpha; \quad l = \max(b \cdot p, w^{общ})$ <p>H – якобиан; l – количество параметров СНС. Оценка $l^{3/2} \log(l)$ является оценкой транспонирования, оценка $l^{2.37}$ – оценка матричного умножения [16]; $w^{общ}$ – общее количество настраиваемых параметров СНС.</p>
Общая вычислительная сложность	$K_{СЛМ} = \sum_{i=0}^L \left(bp \cdot [n_{i-1}\beta] + (L-1)bp \left[2n_i n_{i-1}^2 \left[\sum_{k=0}^{i-1} kn_{k-1}\beta + \beta \right] \right] \right)$ $+ (l^{3/2} \log l + l^{2.37} + l\beta + l\alpha) + M(l\beta + l\alpha + F_B + E + \beta) + pmba;$ $E = (pb\alpha)^{2.37} + 2\beta + pb\beta,$ <p>где L – общее количество слоев СНС, E – вектор ошибки.</p>

Продолжение таблицы 1

Слой СНС	Аналитическая оценка сложности
Предложенный гибридный метод	
Общая вычислительная сложность	$K_{СЛМ} = \sum_{i=0}^O \left(bp \cdot [n_{i-1}\beta] + (O-1)bp \left[2n_i n_{i-1}^2 \left[\sum_{k=0}^{O-1} kn_{k-1}\beta + \beta \right] \right] \right) +$ $\left(l_O^{3/2} \log l_O + l_O^{2.37} + l_O\beta + l\alpha \right) + M(l_O\beta + l_O\alpha + F_B + E + \beta) +$ $+ pmba + Adam[L - O],$ <p>O – количество слоев обучаемых методом Левенберга-Марквардта; L – общее количество слоев СНС; $Adam$ – вычислительная сложность для метода Adam.</p>

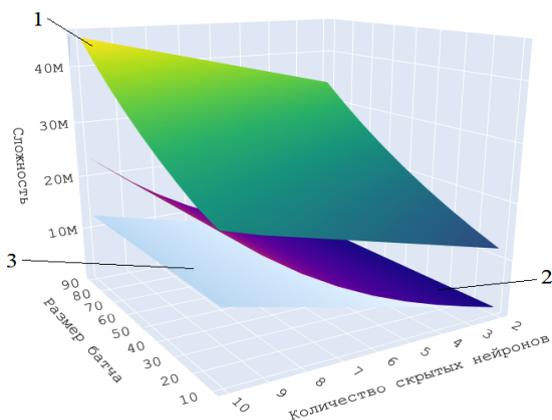


Рис. 10. Зависимость вычислительной сложности от размера батча и количества скрытых нейронов: 1 – сложность метода Левенберга-Марквардта; 2 – сложность предложенного гибридного метода; 3 – сложность метода Adam

5. Анализ эффективности гибридного алгоритма обучения ИНС. Для анализа предложенного гибридного алгоритма была разработана программа на языке python. Использовалась библиотека тензорных вычислений TensorFlow [10]. В качестве задач использовались следующие наборы данных: Iris [1] – набор данных 4 значимых признака, 150 объектов в обучающей выборке, 3 выхода ИНС; MNIST [17] – 784 значимых признака; 60000 объектов в обучающей выборке, 10 выходов ИНС. Результаты ошибки обучения для набора Iris приведены на рисунке 11. Архитектура для решения задачи:

- 4 сверточных ядра 2×2 в первом СЛ;
- 4 нейрона в первом скрытом слое;
- 3 выходных нейрона.

На рисунке 11 изображены только 100 эпох обучения, так как обучение ИНС методом Adam не улучшало ошибку ниже -23 дБ. Следует отметить, что предложенный метод эффективен: обладает высокой сходимостью и скоростью (по сравнению с Adam), а также мало отличается по сходимости (не более чем на 10 дБ на протяжении всего обучения) от метода Левенберга-Марквардта. Вычислительно предложенный алгоритм достаточно сложен, однако его сложность возможно контролировать путем изменения количества слоев, обучаемых методом Левенберга-Марквардта, например, если классификатор имеет в своей архитектуре более 1000 нейронов, целесообразно обучать методом Левенберга-Марквардта только два-три выходных слоя классификатора. В предельном случае, когда число параметров во всей СНС менее 2000, предложенный гибридный алгоритм сводится к методу Левенберга-Марквардта. Подобная гибкость позволяет применять предложенный гибридный алгоритм как на мощных вычислительных серверах, так и на конечных устройствах, изменяя границу перехода между методом первого и второго порядка в зависимости от производительности вычислительных средств. В таблице 2 приведены полученные аналитические оценки сложности вычисления алгоритмов обучения СНС для рассмотренных случаев.

За основу расчета количества тактов процессора на выполнение операций были выбраны следующие усредненные значения: сложение и вычитание (α) – 4 такта; умножение и деление (β) – 20 тактов; нелинейные операции (γ) – 70 тактов. Оценка времени производилась на основе технических параметров процессора Intel Core i7-4930K (Ivy Bridge), 3,4 ГГц, 6 ядер (2013 г.) с пиковой производительностью $Z=163$ ГФлопс/с. Для оценки времени использовалась следующая формула:

$$T = \frac{K_{\text{вс}}^*}{Z \cdot V}, \quad (38)$$

где V – загруженность процессора конкретной задачей; Z – пиковая производительность. В расчетах $V=0.75$.

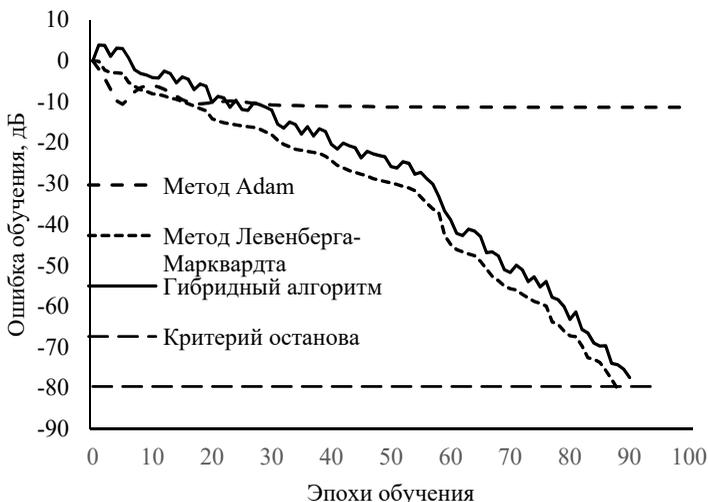


Рис. 11. Ошибка обучения ИНС различными методами на наборе данных iris

Таблица 2. Вычислительная сложность распознавания и обучения СНС

Операция	Такты (усредненное значение)	Время выполнения
Распознавание	2172	$2.6 \cdot 10^{-8}$ с.
Обучение Adam (1 эпоха)	1890400	$2.31 \cdot 10^{-5}$ с.
Обучение Левенберг-Марквардт (1 эпоха)	14658396	$1.79 \cdot 10^{-4}$ с.
Обучение гибридный алгоритм (1 эпоха)	12252313	$1.20 \cdot 10^{-4}$ с.

Рассмотрим более сложную задачу классификации изображений – набор данных MNIST. Это набор рукописных цифр, включающий в себя 60000 образцов. Гибридный метод обучения применялся в режиме мини-пакетов, результаты приведены на рисунке 12. Архитектура для решения задачи: 4 сверточных ядра 3×3 со смещением 2 в первом CL; подвыборка 2×2 со смещением 2; 5 сверточных ядер 3×3 со смещением 2 во втором CL; подвыборка 2×2 со смещением 2; 12 нейронов в первом скрытом слое; 11 нейронов во втором скрытом слое; 10 выходных нейронов.

Подобную СНС затруднительно обучить, используя метод Левенберга-Марквардта ввиду того, что необходимо оперировать с матрицами размерностью более чем $5 \cdot 10^3$, однако предложенный гибридный алгоритм позволяет производить обучение. Следует отметить, что предложенный метод обеспечивает лучшую сходимость за эквивалентное время. Под эквивалентным временем понимается время, затраченное на вычисление обоих алгоритмов. В приведенном эксперименте эквивалентным временем выступает время 4000 эпох обучения методом Adam, соответствующее 20 эпохам обучения гибридного метода. При этом для обучения алгоритмом Adam наблюдается эффект паралича сети (сеть не обучилась), а гибридный метод обеспечил обучение до критерия останова -8 дБ, что соответствует 95% точности классификации. Аналогичные результаты наблюдались и на выборках большей размерности, например, для данных размерностью $224 \times 224 \times 3$ (цветные изображения военной техники) точность классификации составила 93.5% при эквивалентном времени расчета.

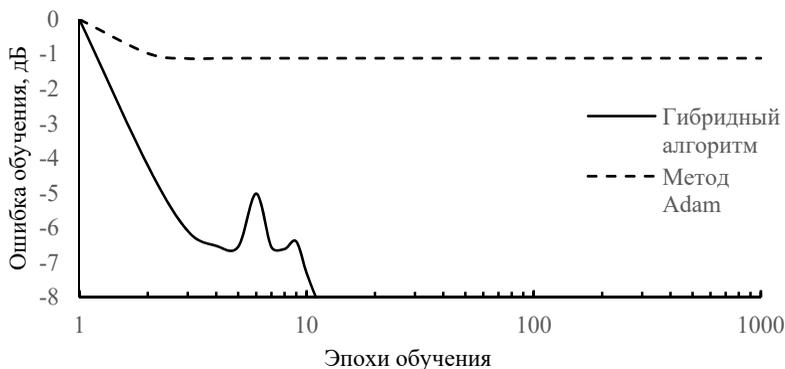


Рис. 12. Ошибка обучения ИНС различными методами на наборе данных MNIST (логарифмический масштаб по оси эпох)

Предложенный гибридный алгоритм обучения СНС эффективен при выполнении следующих условий: ограниченное время обучения на заданной архитектуре и достаточное количество ресурсов для проведения вычислений значений гессiana.

6. Заключение. В работе продемонстрирована эквивалентность СНС и ПИНС, предложен способ внесения дополнительных весов в структуру CL-слоев.

Предложен гибридный метод обучения СНС, совмещающий в себе метод Левенберга-Марквардта и Adam. Гибридный метод обучения СНС позволяет добиваться значительно лучшей сходимости по сравнению с Adam и требует меньше вычислительных операций для реализации. Используя предложенный метод возможно обучать сети, на которых происходит паралич обучения при использовании методов первого порядка. Более того, предложенный метод обладает способностью подстраивать свою вычислительную сложность под аппаратные средства, на которых производится вычисление, вместе с тем гибридный метод позволяет использовать подход обучения мини-пакетов.

Также в работе приведены результаты вычислительных экспериментов на различных наборах данных для оценки эффективности гибридного алгоритма обучения СНС. Показано, что предложенный алгоритм обучения позволяет достичь ошибки, отличающейся не более чем на 10 дБ от ошибки, полученной методом Левенберга-Марквардта.

Литература

1. *Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А.* Глубокое обучение // М.: ДМК Пресс. 2017. 652 с.
2. *Хайкин С.* Нейронные сети. Полный курс // М.: Вильямс. 2006. 1104 с.
3. *Kingma D.P., Ba J.A.* A Method for Stochastic Optimization // CoRR. Т. abs/1412.6980. 2014.
4. *Bo Y.H., Wei L., I-Chen W.* Stochastic Gradient Descent with Hyperbolic-Tangent Decay // CoRR. Т. abs/1806.01593. 2018. pp. 1–10.
5. *Wilamowski B.M., Irwin D.J.* Intelligent systems // CRC Press. 2011. 568 p.
6. *Smith J.S., Wu B., Wilamowski B.M.* Neural Network Training With Levenberg-Marquardt and Adaptable Weight Compression // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2018. pp. 1–8.
7. *Szegedy C., Ioffe S., Vanhoucke V., Alemi A.A.* Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning // International Conference on Learning Representations (ICLR) Workshop. 2016. pp. 375–387.
8. *He K., Zhang X., Ren S., Sun J.* Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification // arXiv.org e-Print archive. 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1502.01852> (дата обращения: 12.11.2020).
9. *Szegedy C. et al.* Going deeper with convolutions // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. pp. 1–9.
10. *Zaccane G., Karim R., Menshawy A.* Deep Learning with TensorFlow: Explore neural networks with Python // Packt Publishing. 2017. 320 p.
11. *Вьюгин В.В.* Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования // М.: МЦНМО. 2013. 387 с.
12. *Shepherd A.J.* Second-Order Methods for Neural Networks: Fast and Reliable Training Methods for Multi-Layer Perceptrons // Springer. 1997. 160 p.
13. *NoCEDal J., Wright S.J.* Numerical Optimization // Springer. 2006. 664 p.
14. *Голубинский А.Н.* О построении архитектур и оценке параметров искусственных нейронных сетей // Теория и техника радиосвязи. 2020. № 1. С. 72–87.
15. *Максимушкин В.В., Арзамасцев А.А.* Сравнительная оценка вычислительной сложности обучения искусственной нейронной сети с жестким ядром и сети с

- классической структурой // Вестник российских университетов. Математика., 2006. № 2. С. 190–197.
16. *Абрамов С.А.* Лекции о сложности алгоритмов // М.: МЦНМО. 2012. 248 с.
 17. Yann LeCun's Home Page. MNIST handwritten digit database, Yann LeCun, Corinna Cortes and Chris Burges. 2012. URL: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/> (дата обращения: 23.05.2020).
 18. *Smith L.N.* No More Pesky Learning Rate Guessing Games // CoRR. 2015. pp. 1–10.
 19. *Salimans T., Kingma D.P.* Weight Normalization: A Simple Reparameterization to Accelerate Training of Deep Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems 29. 2016. pp. 901–909.
 20. *Matuszyk P., Castillo R.T., Kottke D., Spiliopoulou M.* A Comparative Study on Hyperparameter Optimization for Recommender Systems // Workshop on Recommender Systems and Big Data Analytics (RS-BDA'16). 2016.
 21. *Hu G. et al.* Frankenstein: Learning Deep Face Representations using Small Data // IEEE Transactions on Image Processing. 2017. vol. 27. no. 1. pp. 293–303.
 22. *Ioffe S., Szegedy C.* Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift // International conference on machine learning. 2015. pp. 448–456.
 23. *Lewkowycz A. et al.* The large learning rate phase of deep learning: the catapult mechanism. 2020.
 24. *Liao Q., Kawaguchi K., Poggio T.A.* Streaming Normalization: Towards Simpler and More Biologically-plausible Normalizations for Online and Recurrent Learning // CoRR. T. abs/1610.06160. 2016.
 25. *Mahajan D. et al.* Exploring the Limits of Weakly Supervised Pretraining // CoRR. T. abs/1805.00932. 2018.
 26. *Petroski S.F. et al.* Deep Neuroevolution: Genetic Algorithms Are a Competitive Alternative for Training Deep Neural Networks for Reinforcement Learning // ArXiv e-prints. 2017.
 27. *Su H., Zhu X., Gong S.* Deep Learning Logo Detection with Data Expansion by Synthesizing Context // 2017 IEEE winter conference on applications of computer vision (WACV). 2017. pp. 530–539.
 28. *Xu C., Qin T., Wang G., Liu T.Y.* An Actor-Critic Algorithm For Learning Rate 2017. pp. 1–12.
 29. *Xu C., Qin T., Wang G., Liu T.Y.* Reinforcement Learning for Learning Rate Control // arXiv preprint arXiv:1705.11159. 2017.

Голубинский Андрей Николаевич – д-р техн. наук, доцент, заместитель научного руководителя, АО «Концерн «Созвездие». Область научных интересов: математическое моделирование систем с элементами искусственного интеллекта. Число научных публикаций – 205. annikgol@mail.ru; Московский пр., 92, 394068, Воронеж, Россия; р.т.: +79103436537.

Толстых Андрей Андреевич – преподаватель кафедры, кафедра специальных информационных технологий, Московский университет МВД России им. В.Я. Кикотя. Область научных интересов: искусственные нейронные сети, машинное обучение. Число научных публикаций – 52. tolstykh.aa@yandex.ru; Коптевская, 63, 125239, Москва, Россия; р.т.: +79102427955.

A. GOLUBINSKIY, A. TOLSTYKH
**HYBRID METHOD OF CONVENTIONAL NEURAL NETWORK
TRAINING**

Golubinskiy A., Tolstykh A. **Hybrid Method of Conventional Neural Network Training.**

Abstract. The paper proposes a hybrid method for training convolutional neural networks. The method consists in combining second and first order methods for different elements of the architecture of a convolutional neural network. The hybrid convolution neural network training method allows to achieve significantly better convergence compared to Adam and requires fewer computational operations to implement. Using the proposed method, it is possible to train networks on which learning paralysis occurs when using first-order methods. Moreover, the proposed method could adjust its computational complexity to the hardware on which the computation is performed; at the same time, the hybrid method allows using the batch learning approach.

The analysis of the ratio of computations between convolutional neural networks and fully connected artificial neural networks is presented. The mathematical apparatus of error optimization of artificial neural networks is considered, including the method of back propagation of the error, the Levenberg-Marquardt algorithm. The main limitations of these methods that arise when training a convolutional neural network are analyzed.

The analysis of the stability of the proposed method when the initialization parameters are changed. The results of the applicability of the method in various problems are presented.

Keywords: Convolutional Neural Networks, Training Methods for Artificial Neural Networks, Optimization Methods

Golubinskiy Andrey – Ph.D., Dr.Sci., Associate Professor, Head of Scientific Director, JSC “Concern “Sozvezdie”. Research interests: mathematical modeling of systems with elements of artificial intelligence. The number of publications – 205. annikgol@mail.ru; 92, Moskovsky prospect, 394068, Voronezh, Russia; office phone: +79103436537.

Tolstykh Andrey – Lecturer of the Department, Department of Special Information Technologies, Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia. Research interests: artificial neural networks, machine learning. The number of publications – 52. tolstykh.aa@yandex.ru; 63, Koptevskaya, 125239, Moscow, Russia; office phone: +79102427955.

References

1. Gudfellow Ia., Bendjio I., Kyrville A. *Glubokoe obuchenie* [Deep learning]. M.: DMK Press. 2017. 652 p. (In Russ.).
2. Haikin S. *Nejronnye seti. Polnyj kurs* [Neural networks. Complete course]. M.: Vil'yams2006. 1104 p. (In Russ.).
3. Kingma D.P., Ba J.A. A Method for Stochastic Optimization. CoRR. T. abs/1412.6980. 2014.
4. Bo Y.H., WeiL., I-Chen W. Stochastic Gradient Descent with Hyperbolic-Tangent Decay. CoRR. T. abs/1806.01593. 2018. pp. 1–10.
5. Wilamowski B.M., Irwin D.J. Intelligent systems. CRC Press. 2011. 568 p.
6. Smith J.S., Wu B., Wilamowski B.M. Neural Network Training With Levenberg-Marquardt and Adaptable Weight Compression. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2018. pp. 1–8.
7. Szegedy C., Ioffe S., Vanhoucke V., Alemi A.A. Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning. International Conference on Learning Representations (ICLR) Workshop. 2016. pp. 375–387.

8. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification. arXiv.org e-Print archive. 2015. Available at: <https://arxiv.org/abs/1502.01852> (accessed: 12.11.2020).
9. Szegedy C. et al. Going deeper with convolutions. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2014. pp. 1–9.
10. Zaccone G., Karim R., Menshaw A. Deep Learning with TensorFlow: Explore neural networks with Python. Packt Publishing. 2017. 320 p.
11. Shepherd A.J. Second-Order Methods for Neural Networks: Fast and Reliable Training Methods for Multi-Layer Perceptrons. New York: Springer, 1997. 160 pp.
12. Shepherd A.J. Second-Order Methods for Neural Networks: Fast and Reliable Training Methods for Multi-Layer Perceptrons. Springer. 1997. 160 p.
13. Nocedal J., Wright S.J. Numerical Optimization. Springer. 2006. 664 p.
14. Golubinskij A.N. [On the construction of architectures and the assessment of the parameters of artificial neural networks]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi – Theory and technology of radio communication*. 2020. vol. 1. pp. 72–87. (In Russ.).
15. Maksimushkin V.V., Arzamastsev A.A. [Comparative evaluation of the computational complexity of training an artificial neural network with a hard core and a network with a classical structure]. *Vestnik Rossijskikh universitetov. Matematika – Russian Universities Reports. Mathematics*. 2006. vol. 2. pp. 190–197. (In Russ.).
16. Abramov S.A. *Lekcii o slozhnosti algoritmov* [Lectures on the complexity of algorithms]. M.: MCNMO. 2012. 248 p. (In Russ.).
17. Yann LeCun's Home Page. MNIST handwritten digit database, Yann LeCun, Corinna Cortes and Chris Burges. 2012. Available at: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/> (accessed: 23.05.2020).
18. Smith L.N. No More Pesky Learning Rate Guessing Games. CoRR. 2015. pp. 1–10.
19. Salimans T., Kingma D.P. Weight Normalization: A Simple Reparameterization to Accelerate Training of Deep Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems 29*. 2016. pp. 901–909.
20. Matuszyk P., Castillo R.T., Kottke D., Spiliopoulou M. A Comparative Study on Hyperparameter Optimization for Recommender Systems. Workshop on Recommender Systems and Big Data Analytics (RS-BDA'16). 2016.
21. Hu G. et al. Frankenstein: Learning Deep Face Representations using Small Data. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2017. vol. 27. no. 1. pp. 293–303.
22. Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift. International conference on machine learning. 2015. pp. 448–456.
23. Lewkowycz A. et al. The large learning rate phase of deep learning: the catapult mechanism. 2020.
24. Liao Q., Kawaguchi K., Poggio T.A. Streaming Normalization: Towards Simpler and More Biologically-plausible Normalizations for Online and Recurrent Learning. CoRR. T. abs/1610.06160. 2016.
25. Mahajan D. et al. Exploring the Limits of Weakly Supervised Pretraining. CoRR. T. abs/1805.00932. 2018.
26. Petroski S.F. et al. Deep Neuroevolution: Genetic Algorithms Are a Competitive Alternative for Training Deep Neural Networks for Reinforcement Learning. ArXiv e-prints. 2017.
27. Su H., Zhu X., Gong S. Deep Learning Logo Detection with Data Expansion by Synthesising Context. 2017 IEEE winter conference on applications of computer vision (WACV). 2017. pp. 530–539.
28. Xu C., Qin T., Wang G., Liu T.Y. An Actor-Critic Algorithm for Learning Rate Control. 2017. pp. 1–12.
29. Xu C., Qin T., Wang G., Liu T.Y. Reinforcement Learning for Learning Rate Control. arXiv preprint arXiv:1705.11159. 2017.

Руководство для авторов

Взаимодействие автора с редакцией осуществляется через личный кабинет на сайте журнала «Информатика и автоматизация» <http://ia.spcras.ru/>. При регистрации авторам рекомендуется заполнить все предложенные поля данных. Подготовка статьи ведется с помощью текстовых редакторов MS Word 2007 и выше или LaTeX. Объем основного текста (до раздела Литература) - от 20 до 30 страниц включительно. Переносы разрешены. Номера страниц не проставляются. Основная часть текста статьи разбивается на разделы, среди которых являются обязательными: введение, хотя бы один «содержательный» раздел и заключение. Допускается также мотивированное содержанием и структурой материал а выделение подразделов. В основную часть опускается помещать рисунки, таблицы, листинги и формулы. Правила их оформления подробно рассмотрены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».

Author guidelines

Interaction between each potential author and the Editorial board is realized through the pesoal account on the website of the journal "Informatics and Automation" <http://ia.spcras.ru/>. At the registration the authors are requested to fill out all data fields in the proposed form. The submissions should be prepared using MS Word 2007, LaTeX. The text of the paper in the main part should not exceed 30 pages. Pages are not numbered; hyphenations are allowed. Certain figures, tables, listings and formulas are allowed in the main section, and their typography is considered in more detail at the journal web.

Signed to print 30.03.2021

Printed in Publishing center GUAP, 67, B. Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia

The journal is registered in the Russian Federal Agency for Communications and Mass-Media Supervision, certificate ПИ № ФС77-79228 dated September 25, 2020
Subscription Index П5513, Russian Post Catalog

Подписано к печати 30.03.2021. Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 16,04. Заказ № 111.

Тираж 300 экз., цена свободная.

Отпечатано в Редакционно-издательском центре ГУАП, 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, д. 67

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-79228 от 25 сентября 2020 г.

Подписной индекс П5513 по каталогу «Почта России»

ISSN 2713-3192



9 772713 319007 >