

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2(87)/2017

2(87)/2017

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

Founder
«Information and Control Systems», Ltd.

Publisher
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Editor-in-Chief
M. Sergeev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Deputy Editor-in-Chief
E. Krouk
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Executive secretary
O. Muravtsova

Editorial Council
C. Christodoulou
PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA
L. Chubraeva
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
L. Fortuna
PhD, Professor, Catania, Italy
A. Fradkov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
V. Kozlov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
B. Meyer
Dr. Sc., Professor, Zurich, Switzerland
A. Ovodenko
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
Y. Podoplyokin
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
Yu. Shokin
RAS Academician, Dr. Sc., Phys.-Math., Novosibirsk, Russia
V. Simakov
Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, Russia
V. Vasilev
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
R. Yusupov
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Editorial Board
V. Anisimov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
B. Bezruchko
Dr. Sc., Phys.-Math., Saratov, Russia
N. Blaunstein
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, Israel
A. Dudin
Dr. Sc., Tech., Professor, Minsk, Belarus
I. Dumer
PhD., Professor, Riverside, USA
V. Khimenko
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
G. Maltsev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
G. Matvienko
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Tomsk, Russia
V. Melekhin
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
A. Shalyto
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
A. Shelupanov
Dr. Sc., Tech., Professor, Tomsk, Russia
A. Shepeta
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
A. Smirnov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
Z. Yuldashev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia
A. Zeifman
Dr. Sc., Phys.-Math., Vologda, Russia

Editor: A. Larionova
Proofreader: T. Zvertanovskaia
Design: A. Koleshko, M. Chernenko
Layout and composition: J. Umnitcina

Contact information
The Editorial and Publishing Center, SUAI
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: i.us.spb@gmail.com
Tel.: +7 - 812 494 70 02

The Journal was registered in the Ministry of Press,
Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation.
Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002.
Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom,
Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR)
due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd.,
JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.

© Corporate authors, 2017

INFORMATION PROCESSING AND CONTROL

- Khimenko V. I., Okhtilev M. Yu., Klucharev A. A., Matiash V. A.**
Informative Feature Analysis in Data Processing for Aerospace Monitoring 2
- Rogachev V. A., Zakutaev A. A., Liferenko V. D., Kolbanov M. O.**
Photodetector Sensitivity Non-Uniformity as a Multiple Interference in High-Precision Television Systems with Interframe Processing 13
- Skatkov A. V., Brjuhoveckij A. A., Moiseev D. V., Abramov T. A.**
Intelligent Monitoring System for Solving Large-Scale Scientific Problems in Cloud Computing Environments 19

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

- Shpakov V. M.** *About Situation-Event Approach to Control of Interacting Discrete-Continuous Processes* 26

SYSTEM AND PROCESS MODELING

- Maltsev G. N., Yakimov V. L.** *Modern Approaches to Determining Spacecraft Autonomy Level* 34
- Tatarnikova T. M., Elizarov M. A.** *Model of Estimating Temporal Characteristics of IoT Network Interaction* 44
- Karin S. A.** *Operational and Temporal Model of Complex Geospatial Data Processing Systems with Insufficient Resources* 51

INFORMATION CODING AND TRANSMISSION

- Ivanov D. O., Kozlov A. V., Ovchinnikov A. A.** *Low-Density Parity-Check Codes with Cyclic Structure of Macroblocks* 58

INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM

- Hadar Ofer, Bronfman Irina, Blaunstein Nathan.** *Optimization of Error Concealment based on analysis of Fading Types. Part 2: Modified and New Models of Video Signal Error Concealment. Practical Simulations and their Results* 67
- Martynova L. A.** *Tools for Studying the Efficiency of Seismic Exploration with Standalone Unmanned Submersibles* 77
- Koshkarov A. S., Dobrikov V. A.** *Two-Step Algorithm for Detection and Rejection of Multi-Frequency Interference in Navigation Receivers* 88

INFORMATION INSTRUMENTATION AND EDUCATION

- Gordeyev A. V.** *Organization of Remote Work of Students with their Virtual Machines* 96

BRIEF SCIENTIFIC REPORTS

- Krivoshchekova Y. V., Beloivan P. A., Bronshtein I. G., Burbaev A. M.**
Compact Vandal-Proof Video Camera on the Basis of Multimatrix Receiving System for Security of Premises 101

CHRONICLES AND INFORMATION

- Celebrating the 60th birthday of Mikhail B. Sergeev* 105

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

107

Submitted for publication 02.03.17. Passed for printing 17.04.17. Format 60×84_{1/8}.
Phototype SchoolBookC. Digital printing.

Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI.
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI.
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

The journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Rospechat» catalogue:
№ 48060 — annual subscript, № 15385 — semiannual subscript.

2(87)/2017

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-
УПРАВЛЯЮЩИЕ
СИСТЕМЫУчредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»Издатель
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроенияГлавный редактор
М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФЗам. главного редактора
Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФОтветственный секретарь
О. В. Муравцова

Редакционный совет:

Председатель А. А. Оводенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Васильев,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФВ. Н. Козлов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
К. Кристофолу,
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США
Б. Мейер,д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария
Ю. Ф. Подоплёкин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. В. Симаков,д-р техн. наук, проф., Москва, РФ
Л. Фортуна,
д-р наук, проф., Катания, Италия
А. Л. Фрадков,д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Л. И. Чубраева,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ
Ю. И. Шокин,
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ
Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:

В. Т. Анисимов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Б. П. Безручко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ
Н. Блаунштейн,
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль
А. Н. Дудин,д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь
И. И. Думер,
д-р наук, проф., Риверсайд, США
А. И. Зейфман,д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ
Г. Н. Мальцев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Г. Г. Матвиенко,д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ
В. Ф. Мелехин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. В. Смирнов,д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. И. Хименко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. А. Шальто,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФА. А. Шелупанов,
д-р техн. наук, проф., Томск, РФ
А. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
З. М. Юлдашев,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: М. Л. Черненко, А. Н. Колешко
Компьютерная верстка: Ю. В. УмницынаАдрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,
сайт: http://i-us.ruЖурнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации
на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».
© Коллектив авторов, 2017

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Хименко В. И., Охтилев М. Ю., Ключарев А. А., Матяш В. А.Анализ информативных признаков в задачах обработки данных
аэрокосмического мониторинга 2**Рогачев В. А., Закутаев А. А., Лиференко В. Д., Колбанев М. О.**Неравномерность чувствительности фотоприемника как
мультипликативная помеха при межкадровой обработке
в прецизионных телевизионных системах 13**Скатков А. В., Брюховецкий А. А., Моисеев Д. В., Абрамов Т. А.**Интеллектуальная система мониторинга для решения
крупномасштабных научных задач в облачных вычислительных средах 19

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Шпаков В. М. О ситуационно-событийном подходе к управлению
взаимодействующими дискретно-непрерывными процессами 26

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Мальцев Г. Н., Якимов В. Л. Современные подходы к определению
уровня автономности космических аппаратов 34**Татарникова Т. М., Елизаров М. А.** Модель оценки временных
характеристик при взаимодействии в сети Интернета вещей 44**Карин С. А.** Операционно-временная модель функционирования
систем комплексной обработки геопространственных данных
в условиях дефицита их ресурсов 51

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Иванов Д. О., Козлов А. В., Овчинников А. А. Об одной конструкции
кодов с малой плотностью проверок на чистоту с циклической
структурой макроблоков 58

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Hadar Ofer, Bronfman Irina, Blaunstein Nathan. Optimization of Error
Concealment based on analysis of Fading Types. Part 2. Modified and
New Models of Video Signal Error Concealment. Practical Simulations
and their Results 67**Мартынова Л. А.** Инструментарий для исследований эффективности
ведения сейсморазведки с использованием автономных необитаемых
подводных аппаратов 77**Кошкарков А. С., Добриков В. А.** Двухэтапный алгоритм
детектирования и режекции многочастотных помех
в навигационной аппаратуре потребителей ГЛОНАСС 88

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ

Гордеев А. В. Организация удаленной работы студентов
со своими виртуальными машинами 96

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Кривошекова Ю. В., Белойван П. А., Бронштейн И. Г., Бурбаев А. М.
Малогобаритная вандалозащищенная видеочасть на основе многома-
тричной приемной системы для охраны помещений 101

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Сергеев Михаил Борисович. К 60-летию со дня рождения 105

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

107

Сдано в набор 02.03.17. Подписано в печать 17.04.17. Формат 60×84/8.

Гарнитура SchoolBookC. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 13,0. Уч.-изд. л. 18,2. Тираж 1000 экз (1-й завод 140 экз). Заказ 123.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить
через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:
№ 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

УДК 519.21:528.85

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.2

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В. И. Хименко^а, доктор техн. наук, профессор

М. Ю. Охтилев^{а, б}, доктор техн. наук, профессор

А. А. Ключарев^б, канд. техн. наук, доцент

В. А. Матяш^б, канд. техн. наук, доцент

^аОАО «НИО ЦИТ «Петрокомета», Санкт-Петербург, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Цель: анализ обобщенной модели аэрокосмического мониторинга, систематизация результатов по выбору информативных признаков в задачах обнаружения и распознавания исследуемых объектов, вероятностный анализ данных при многоспектральной структуре космических изображений. **Результаты:** на основе обобщенной структурной модели технологий космического мониторинга выделены характерные задачи, связанные с получением, преобразованием, обработкой и анализом информации при дистанционном зондировании Земли. Выполнена общая классификация наиболее распространенных информативных признаков применительно к задачам сегментации, обнаружения и распознавания объектов на космических изображениях. Показаны возможности вероятностного анализа спектральных индексов и особенности анализа многоспектральных изображений методами двумерных диаграмм рассеяния в пространстве интенсивностей. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют систематизировать и обобщить многочисленные разрозненные исследования по выбору и анализу информативных признаков. От выбора и структуры этих признаков существенно зависят процедуры синтеза алгоритмов обработки, сложность и общая эффективность решения основных задач космического мониторинга.

Ключевые слова — космический мониторинг, обработка информации, информативные признаки, распознавание изображений, вероятностный анализ, диаграммы рассеяния.

Введение

В настоящее время общий уровень развития аэрокосмических информационных технологий характеризуется широким спектром решаемых задач, наличием разного рода алгоритмов обработки данных и большим разнообразием самостоятельных областей практического (и потенциального) использования систем космического мониторинга. Технологии космического мониторинга позволяют получать обобщенную пространственно-временную информацию относительно объектов, явлений, процессов и состояния околоземной среды на наблюдаемых обширных территориях. Один и тот же космический снимок может служить источником информации для различных задач и областей научной и хозяйственной деятельности [1–5]: контроля окружающей среды и водных ресурсов, океанологии, геофизики и поиска полезных ископаемых, сельского хозяйства, лесного хозяйства и общего землепользования, мониторинга социально-экономического развития регионов, объектов техносферы, мониторинга стихийных бедствий, чрезвычайных ситуаций и т. д.

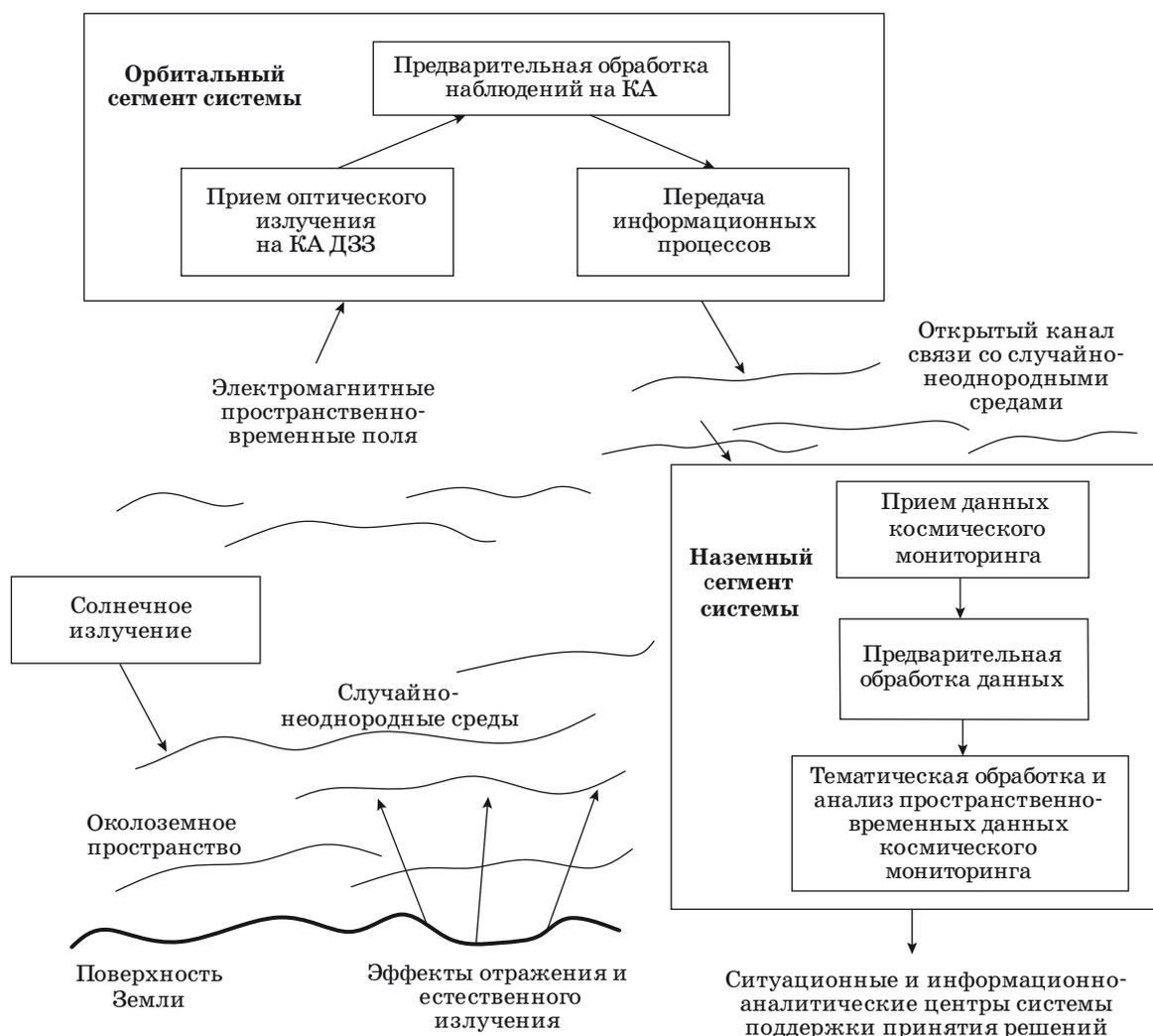
Подобное многообразие задач и междисциплинарность исследований всегда приводят к необходимости систематизации и обобщения накоплен-

ных результатов, разработки унифицированных структурных моделей систем и общей классификации наиболее важных информативных признаков, лежащих в основе синтеза алгоритмов обработки и анализа аэрокосмической информации. Рассмотрение перечисленных вопросов является основной целью данной работы.

Обобщенная модель получения и преобразования информации

Независимо от конкретной области исследований, основными задачами аэрокосмического мониторинга обычно являются задачи сбора, преобразования, передачи, обработки и анализа информации. Сбор информации выполняется космическими аппаратами (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а передача данных на наземные станции приема осуществляется по специальным высокоскоростным каналам космической радиосвязи. Все основные операции мониторинга упрощенно можно представить в виде обобщенной структурной схемы (рис. 1).

Методы ДЗЗ относятся к классу косвенных методов исследования. При их реализации исследуемые параметры земной поверхности или околоземного пространства непосредственно не измеряются, и задачи мониторинга сводятся к ис-



■ Рис. 1. Обобщенная модель системы космического мониторинга

следованиям объектов, физических процессов и явлений по косвенным данным — косвенным измерениям.

Основным источником информации в системах дистанционного зондирования является электромагнитное излучение. Процессы формирования электромагнитных полей происходят за счет отраженного солнечного излучения (эффекты отражения) и собственного теплового излучения (эффекты естественного излучения) земной поверхности, различных объектов и сред, температура которых выше абсолютного нуля (см. рис. 1).

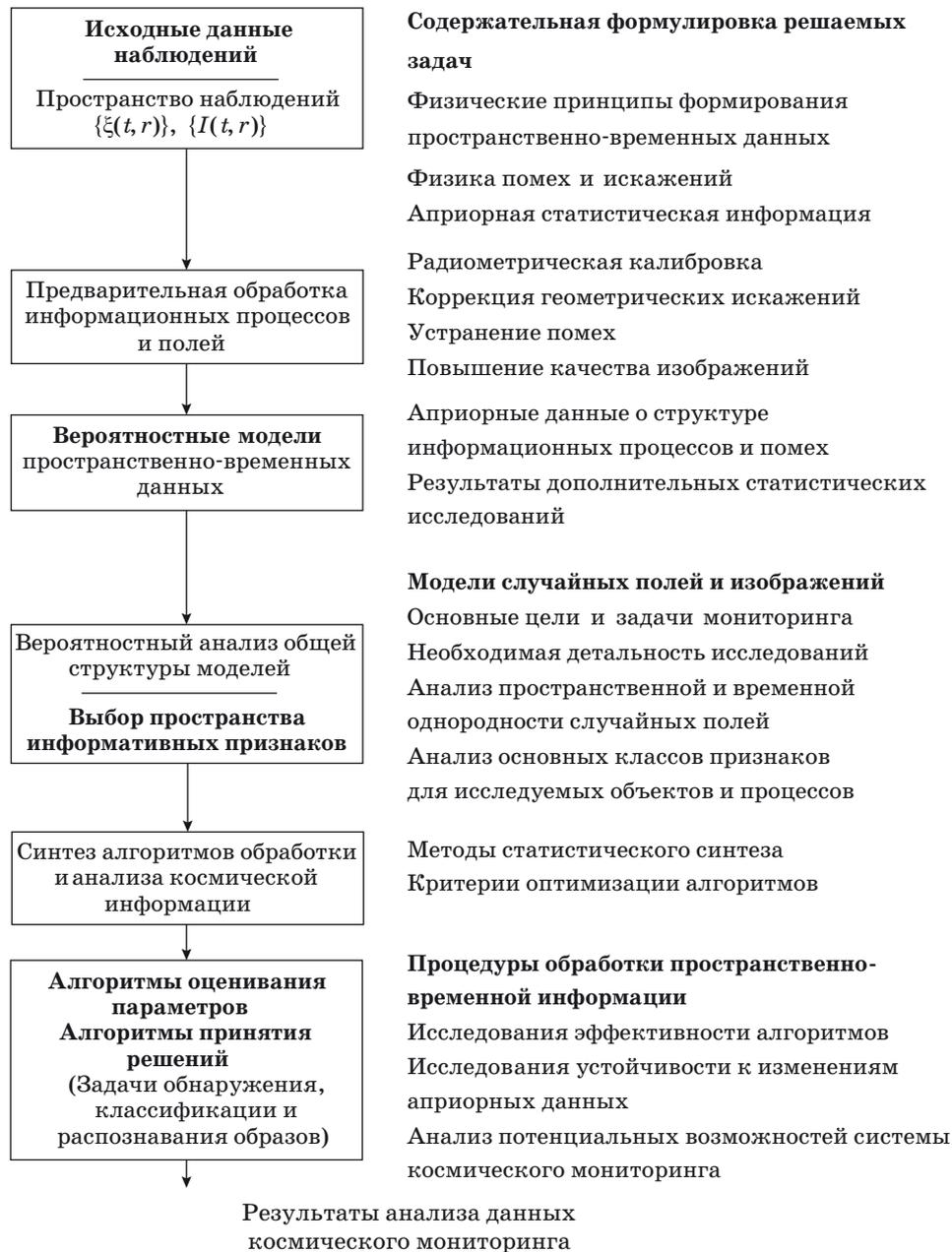
На КА выполняется прием электромагнитных излучений в заданном диапазоне спектра, проводится предварительная обработка и передача полученной информации на наземные станции приема. Все последующие операции связаны с тематической обработкой и анализом пространственно-временных данных на уровне наземных комплексов космического мониторинга.

При обработке полученных данных могут рассматриваться параметры интенсивности, спектральный состав, поляризация, направление распространения излучений. Эти характеристики функционально зависят от свойств, состояния и пространственного положения исследуемых объектов и среды распространения излучений. Использование подобных зависимостей лежит в основе всех методов аэрокосмического мониторинга и дает возможность по косвенным данным получить информацию о состоянии исследуемых объектов.

Структура тематической обработки и анализа данных

Рассмотрим теперь последовательность основных этапов тематической обработки данных и выделим характерные особенности задач, связанных с каждым из этих этапов. Общую струк-

Характерные особенности основных этапов обработки и анализа данных космического мониторинга



■ Рис. 2. Общая структура решения тематических задач мониторинга

туру обработки представим в виде обобщенной модели (рис. 2).

В системах космического мониторинга исходные данные на приемной стороне обычно имеют вид пространственно-временного случайного поля $\{\xi(t, r)\}$ и, как правило, при регистрации рассматриваются в форме двумерных изображений $I(x, y, t)$, где I — значение интенсивности (или яркости); x, y — координаты пространства $r = (x, y, z)$; t — время.

На этапе предварительной обработки основные операции связаны с радиометрической калибровкой данных, коррекцией геометрических искажений, устранением некоторых видов помех и повышением общего качества изображений. Многие из этих операций в настоящее время могут выполняться в автоматизированном виде [2, 6].

Все процедуры последующей обработки существенно зависят от содержания основных задач мониторинга и выбранных методов математиче-

ской формализации информационных процессов. При наиболее общем подходе описание пространственно-временных данных должно здесь выполняться на уровне вероятностных моделей случайных полей $\{\xi(t, r)\}$ и изображений $\{I(t, r)\}$. Важной особенностью подобного описания является то, что основные характеристики таких полей $\{\xi(t, r)\}$ изменяются во времени и в пространстве, и, следовательно, вероятностная структура случайных функций $\{\xi(t, r)\}$, $\{I(t, r)\}$ не обладает свойством пространственно-временной однородности.

После выбора и обоснования вероятностных моделей (см. рис. 2) необходимым этапом является процедура детального анализа их общих свойств и выбор информативных признаков для решения основных задач мониторинга. Этот этап является одним из наиболее важных и сложных. Выбор информативных признаков во многом определяет структуру алгоритмов обработки информации и общую эффективность решения задач, связанных с оцениванием параметров, обнаружением, классификацией и распознаванием исследуемых объектов на полученных изображениях.

Пространство информативных признаков

Задачи выбора информативных признаков возникают не только при обработке изображений в системах космического мониторинга. Они характерны для технической и медицинской диагностики, для систем технического зрения, систем интеллектуального управления и самых разнообразных систем распознавания образов. Вместе с тем проблема выбора информативных признаков в большинстве задач физики, техники, биологии и медицины общих решений не имеет [7–10].

С позиций общей теории распознавания образов основными целями перехода от полного описания исходных изображений к анализу пространства информативных признаков, в частности, являются:

- выделение характерных особенностей исследуемых объектов;
- максимизация различий между рассматриваемыми классами объектов;
- минимизация различий между объектами одного класса;
- упрощение описания рассматриваемых объектов и снижение размерности пространства представления данных;
- подготовка необходимых данных для решения задач синтеза алгоритмов оценивания параметров, алгоритмов обнаружения, классификации или идентификации отдельных объектов на изображениях.

Процедуры выбора признаков трудно поддаются формализации, они существенно зависят от содержания решаемых задач, априорных дан-

ных относительно рассматриваемых объектов и необходимой детальности исследований. К настоящему времени накоплено достаточно много эвристических результатов по описанию информативных признаков в задачах распознавания изображений. При этом появляется необходимость (и возможность) обобщения и рассмотрения общей классификации «различительных» признаков применительно к технологиям аэрокосмического мониторинга.

Все разнообразие существующих в этой области признаков условно можно разделить на несколько самостоятельных классов (рис. 3). Прежде всего, здесь можно выделить классы естественных и искусственных признаков [2, 5, 6, 11].

К классу естественных признаков обычно относятся характеристики, которые непосредственно отображаются на исследуемом изображении. В этот класс входят прямые признаки (яркостные, геометрические, структурные), косвенные признаки (индикаторное описание объектов, отдельных свойств, движений и изменений состояния) и различные виды комплексных признаков (совместное использование нескольких видов информации). При рассмотрении косвенных признаков обычно используются взаимосвязи между отдельными свойствами различных объектов, и информация об одном объекте получается из прямых признаков, относящихся к другому объекту.

Класс искусственных признаков включает в себя более сложные характеристики, нахождение которых связано со специальной обработкой или предварительным анализом изображений. К этому классу относится группа гистограммных признаков, спектральные и корреляционные признаки, аналитические и комплексные информативные признаки (см. рис. 3).

Для задач космического мониторинга наиболее распространенными и привычными являются яркостные признаки. Измерения таких признаков могут проводиться либо в отдельных точках, либо в окрестностях некоторых заданных областей. Можно при этом использовать сечения и проекции изображений, оценивать среднюю яркость отдельных фрагментов, можно перейти к классу искусственных признаков на основе некоторых выбранных линейных и нелинейных преобразований [6, 11–13].

Важную роль в задачах обнаружения и распознавания объектов играют геометрические признаки. В этот класс входят характеристики формы, размеры, площади, контурные особенности объектов. Контурные признаки обычно определяются резкими изменениями (перепадами, разрывами) яркости. На практике такие перепады яркости часто определяют очертания объектов, отображаемых на космических изображениях, и эта особенность заметно повышает эффективность кон-



■ Рис. 3. Классификация наиболее распространенных информативных признаков

турных признаков. Еще одна особенность связана с разнообразием возможных подходов к описанию и исследованию — при рассмотрении геометрических признаков могут использоваться метрические, топологические и аналитические методы.

В решении задач мониторинга основной интерес может быть связан с пространственной или временной структурой изображений, статическими или динамическими, детерминированными или вероятностными характеристиками. Выбранные при этом информативные признаки могут вычисляться для исследуемого изображения в целом или для отдельных фрагментов изображений, т. е. могут иметь глобальный или локальный характер. Все эти особенности должны отражаться в общей классификации пространства информативных признаков (см. рис. 3).

Особенности многоспектрального мониторинга

Современные системы космического мониторинга позволяют получать космические изображения одновременно в нескольких спектральных

диапазонах, т. е. относятся к классу многоспектральных или, при большом количестве каналов, к классу гиперспектральных [1, 2]. Увеличение числа спектральных каналов и расширение общего частотного диапазона исследований существенно повышает информативность систем мониторинга. Более того, при обработке многоспектральных данных появляется дополнительная возможность выбора наиболее информативных каналов — выбора тех спектральных диапазонов, в которых исследуемые объекты, процессы и явления наиболее полно проявляют свои характерные свойства.

Первичная информация на космических изображениях всегда отображается в значениях интенсивности (или яркости) $I(x, y | t, \lambda_i)$ каждого элемента — пикселя исследуемого изображения в определенный момент времени t в выбранном спектральном диапазоне $\lambda_i, i = 1, k$. При раздельном рассмотрении спектральных каналов обычно определяются типовые статистические характеристики: среднее значение яркости или математическое ожидание $m_I(\lambda_i)$, дисперсия $\sigma_I^2(\lambda_i)$, гистограмма распределения яркости $p^*(I; \lambda_i)$. Все подобные характеристики обладают простым и

наглядным физическим смыслом. Так, в частности, среднее значение яркости $m_I(\lambda_i)$ в каждом спектральном канале λ_i характеризует основные эффекты отражения и естественного излучения объектов в данном диапазоне спектра. Величина дисперсии $\sigma_I^2(\lambda_i)$ позволяет оценить диапазон изменений яркости и уровень контрастности изображения. Наиболее полной характеристикой является при этом гистограмма распределения яркости, которая дает возможность оценить общее распределение значений яркости по всему изображению, а также позволяет характеризовать степень однородности вероятностной структуры исследуемых пространственных данных.

При реализации алгоритмов совместной обработки многоспектральных данных наиболее часто для анализа выбираются два частотных диапазона, например λ_m и λ_n , $m \neq n$, рассматривается каждый пиксель изображения в одном диапазоне λ_m , оценивается его яркость и сравнивается с яркостью такого же пикселя в другом частотном диапазоне λ_n . На основе полученных данных можно определить простое отношение интенсивностей

$$S_{mn}(x, y) = I(x, y | \lambda_n) / I(x, y | \lambda_m), \quad (1)$$

которое позволяет перейти от рассмотрения абсолютных значений яркости к анализу относительных (или нормированных) значений. Подобные операции (1) лежат в основе синтеза новых преобразованных изображений и во многих задачах используются для формирования нового пространства спектральных признаков — индексного описания изображений [2–5]. К такому описанию, в частности, относится достаточно широкий класс вегетационных индексов VI (Vegetation Index) [2, 5]: RVI — относительный вегетационный индекс, PVI — ортогональный, NDVI — нормализованный разностный вегетационный индекс, SAVI — вегетационный индекс с коррективкой на почву, SARVI — вегетационный индекс с коррективкой на влияние почвы и атмосферы, TVI — группа трансформированных вегетационных индексов.

Существующее многообразие индексных описаний связано с разнообразием решаемых задач и попытками поиска наилучших спектральных признаков для каждой задачи. Вместе с тем нужно еще раз подчеркнуть, что информационной основой всех подобных характеристик являются простые отношения интенсивностей (1) для выбранных частотных диапазонов.

Вероятностный анализ спектральных признаков

Рассмотрим теперь возможности вероятностного анализа спектральных признаков в задачах обработки многоспектральных изображений.

В каждом спектральном диапазоне λ_i , $i = 1, 2, \dots, k$ значения интенсивностей $I(x, y | \lambda_i)$ изменяются в плоскости изображения (x, y) случайным образом. При рассмотрении двух произвольно выбранных диапазонов λ_m и λ_n , для полного вероятностного описания случайных величин $I(x, y | \lambda_m) = I_m$ и $I(x, y | \lambda_n) = I_n$ необходимо знать плотности вероятностей $p(I | \lambda_m) = p_m(I_m)$, $p(I | \lambda_n) = p_n(I_n)$ и совместную плотность вероятностей $p_{mn}(I_m, I_n)$. Если в подобной ситуации рассмотреть операцию перехода к индексному описанию изображений (1), то на основе общих правил функциональных преобразований [14, 15] для случайных значений индексов

$$\frac{I(x, y | \lambda_n)}{I(x, y | \lambda_m)} = \frac{I_n(x, y)}{I_m(x, y)} = \eta_{mn}(x, y) \quad (2)$$

может быть найдено общее выражение плотности вероятностей

$$p_\eta(\eta; x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{mn}(I_m, \eta I_m) |I_m| dI_m, \quad \eta = \eta_{mn}(x, y). \quad (3)$$

Если в рассматриваемых спектральных диапазонах λ_m , λ_n значения интенсивностей $I_m = I_m(x, y)$, $I_n = I_n(x, y)$ являются независимыми и характеризуются распределениями $p_m(I_m)$ и $p_n(I_n)$, то при совместном описании случайных величин I_m и I_n будет выполняться условие

$$p_{mn}(I_m, I_n) = p_m(I_m) p_n(I_n). \quad (4)$$

Общее выражение (3) примет при этом более простой вид

$$p_\eta(\eta; x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} |I_m| p_m(I_m) p_n(\eta I_m) dI_m. \quad (5)$$

Следовательно, для определения вероятностных свойств спектральных отношений в подобных задачах достаточно знать одномерные распределения (4).

Приведенные результаты (2)–(5) позволяют выполнять общее исследование вероятностных характеристик для достаточно широкого класса спектральных индексов, определяемых на основе соотношений (1), (2). При этом важно подчеркнуть, что выражения (3) и (5) справедливы при различных распределениях $p_m(I_m; x, y)$, $p_n(I_n; x, y)$ значений интенсивностей $I_m = I(x, y | \lambda_m)$ и $I_n = I(x, y | \lambda_n)$. Вероятностная структура случайных величин $I_m(x, y)$ и $I_n(x, y)$ определяется здесь особенностями объектов космического мониторинга, содержанием решаемых задач и выбранными для анализа спектральными диапазонами λ_m, λ_n .

Как правило, на космических изображениях могут содержаться объекты нескольких различных классов. Каждый такой класс характеризуется относительно однородной вероятностной структурой данных. При обработке многозональных изображений в подавляющем большинстве задач обнаружения, распознавания и идентификации объектов для описания значений яркости в пределах каждого класса объектов в качестве типовой модели используется модель гауссова распределения [2–5].

Рассмотрим для этой наиболее распространенной модели особенности вероятностного описания спектральных индексов. Будем считать, что в спектральных каналах λ_m и λ_n значения интенсивностей $I_m(x, y)$ и $I_n(x, y)$ изменяются в пространстве (x, y) случайным образом и характеризуются совместно гауссовым распределением с параметрами:

— $m_I(\lambda_m) = M\{I_m(x, y)\}$, $m_I(\lambda_n) = M\{I_n(x, y)\}$ — математические ожидания (средние значения) интенсивностей в диапазонах λ_m и λ_n ;

— $\sigma_m^2 = \sigma_I^2(\lambda_m)$, $\sigma_n^2 = \sigma_I^2(\lambda_n)$ — дисперсии;

— $r_{mn} = R_{mn}(x, y) / \sigma_I(\lambda_m) \sigma_I(\lambda_n)$ — нормированное значение коэффициента корреляции $R_{mn}(x, y)$ для случайных величин $I_m(x, y)$ и $I_n(x, y)$.

Если в данном случае для упрощения преобразований рассмотреть центрированные значения интенсивностей

$$I_m^0 = I_m(x, y) - m_I(\lambda_m), \quad I_n^0 = I_n(x, y) - m_I(\lambda_n),$$

то на основе общей формулы (3) для отношения интенсивностей $\eta_{mn}^0(x, y) = I_n^0 / I_m^0$ получим

$$\begin{aligned} P_\eta(\eta^0; x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} P_{mn}(I_m^0, \eta^0 I_m^0) \Big| I_m^0 \Big| dI_m^0 = \\ &= \frac{1}{\pi \sigma_m \sigma_n (1 - r_{mn}^2)} \int_0^{\infty} I_m^0 \exp \left[-\frac{(I_m^0)^2}{2(1 - r_{mn}^2)} \times \right. \\ &\quad \left. \times \frac{\sigma_n^2 - 2r_{mn} \sigma_m \sigma_n \eta^0 + \sigma_m^2 (\eta^0)^2}{\sigma_m^2 \sigma_n^2} \right] dI_m^0 = \\ &= \frac{\sqrt{1 - r_{mn}^2}}{\pi \left[\frac{\sigma_n}{\sigma_m} - 2r_{mn} \eta^0 + \frac{\sigma_m}{\sigma_n} (\eta^0)^2 \right]}, \quad \eta^0 = \eta_{mn}^0(x, y). \quad (6) \end{aligned}$$

Этот результат позволяет исследовать вероятностную структуру спектральных индексов (2) в задачах двумерной обработки данных при гауссовых распределениях отдельных компонент. Достаточно наглядно проявляется здесь и влияние возможной корреляционной зависимости между значениями интенсивностей $I_m(x, y)$ и $I_n(x, y)$.

В частности, если в выбранных для анализа спектральных диапазонах λ_m и λ_n полученные данные мониторинга являются некоррелированными, то параметр $r_{mn} = 0$ и общее выражение (6) приводят к более простому результату

$$P_\eta(\eta^0; x, y) = \frac{\sigma_m \sigma_n}{\pi \left[\sigma_n^2 + \sigma_m^2 (\eta^0)^2 \right]}, \quad \eta^0 = \eta_{mn}^0(x, y). \quad (7)$$

Важно подчеркнуть, что полученное распределение (7) по своему виду совпадает с известным распределением Коши [16]. Такой результат характерен для исследования операций деления при независимых гауссовых случайных величинах.

На практике в задачах анализа спектральных индексов (2) плотность вероятностей (7) удобнее представить для значений $\eta = \eta_{mn}(x, y)$ в стандартной форме распределения Коши:

$$\begin{aligned} P_\eta(\eta; x, y) &= \frac{b}{\pi \left[b^2 + (\eta - a)^2 \right]}, \\ a &= \frac{m_I(\lambda_n)}{m_I(\lambda_m)}, \quad b = \frac{\sigma_n}{\sigma_m}. \quad (8) \end{aligned}$$

Функция (8) обладает свойством унимодальности и является симметричной относительно оси $\eta = a$. Значение a соответствует здесь параметру расположения и характеризует моду и медиану распределения (8). Параметр b является параметром масштаба.

Следует отметить, что для классического распределения Коши при изменениях переменной в диапазоне $(-\infty, \infty)$ моментные функции не существуют [16]. Это относится даже к параметрам математического ожидания и дисперсии. В задачах обработки изображений в качестве переменной рассматривается интенсивность (или яркость), случайные изменения которой ограничены заданным диапазоном $I(x, y) \in [I_{\min}, I_{\max}]$. Эта особенность приводит к использованию вероятностных моделей (3), (5)–(8) в условиях усеченных значений переменной $\eta_{mn}(x, y)$ и, следовательно, в условиях обеспечения конечности моментных функций. В частности, для усеченных распределений (3), (5)–(8) при любом выборе спектральных диапазонов λ_m, λ_n реальные значения

$$m_\eta(x, y) = M\{\eta_{mn}(x, y)\} < \infty, \quad \sigma_\eta^2 = \sigma_\eta^2(x, y) < \infty.$$

Анализ данных на основе диаграмм рассеяния

При обработке многоспектральных изображений всегда возникают вопросы, связанные с анализом вероятностной структуры и оценкой вза-

имной коррелированности данных, вопросы отображения и наглядного представления информации. В решении подобных вопросов принципиально могут использоваться различные методы многомерного анализа [16, 17], однако в качестве одного из наиболее простых и наглядных подходов целесообразно выделить метод, основанный на рассмотрении диаграмм рассеяния.

Предположим, что для обработки данных космического мониторинга используются изображения, полученные в двух спектральных диапазонах λ_m и λ_n . При раздельном рассмотрении этих изображений для каждого спектрального канала могут быть построены гистограммы распределения яркости. Пример такой гистограммы $p^*(I_m; x, y)$ для диапазона λ_m показан на рис. 4. По своей форме она близка к модели гауссова распределения и дает достаточно полное описание характера вероятностного распределения значений яркости I_m изображения $I_m(x, y | \lambda_m)$ в пространстве (x, y) .

Если перейти к совместному анализу структуры изображений в двух спектральных диапазонах λ_m и λ_n , то можно воспользоваться представлением двумерной информации в виде диаграммы рассеяния [2, 4, 18]. Для этого на плоскости значений яркости (I_m, I_n) формируется диаграмма, каждая точка которой отражает яркость отдельного элемента (пикселя) изображения $I_m(x, y | \lambda_m)$ в диапазоне λ_m (ось абсцисс — OI_m) и значение яркости такого же элемента изображения $I_n(x, y | \lambda_n)$ в диапазоне λ_n (ось ординат — OI_n). Полученная таким образом диаграмма характеризует особенности общего распределения значений яркости изображений $I_m(x, y)$ и $I_n(x, y)$ в двух выбранных для анализа спектральных каналах λ_m и λ_n .

В качестве иллюстрации на рис. 5 показан характерный вид подобной диаграммы рассеяния для двух изображений $I_m(x, y)$ и $I_n(x, y)$ с некорре-

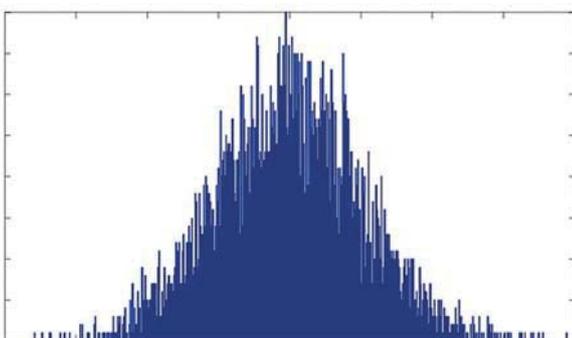
лированными и совместно гауссовыми распределениями значений яркости I_m, I_n в пространстве (x, y) . При формировании этой диаграммы в канале λ_m для наглядности использованы данные изображения $I_m(x, y)$, описываемого гистограммой $p^*(I_m; x, y)$, представленной на рис. 4.

Вероятностная структура изображения $I_n(x, y)$ в спектральном диапазоне λ_n аналогична структуре изображения $I_m(x, y)$, однако отличается меньшей величиной дисперсии $\sigma_n^2 = \sigma_I^2(\lambda_n)$ — меньшим разбросом значений яркости I_n по оси ординат OI_n . Все эти особенности наглядно проявляются на плоскости (I_m, I_n) в структуре двумерной диаграммы рассеяния (см. рис. 5).

В дополнение к этому типовому варианту на рис. 6 показаны еще две диаграммы рассеяния с характерной для анализа изображений вероятностной структурой. На одной из них (рис. 6, а) приведен пример проявления корреляционной зависимости между значениями яркости I_m и I_n изображений в рассматриваемых диапазонах λ_m и λ_n . Кроме того, из этой диаграммы видно, что в обоих спектральных диапазонах на изображениях присутствуют некоторые элементы, отличающиеся более высокой яркостью по сравнению со средним уровнем яркости основного изображения.

Другая диаграмма (рис. 6, б) демонстрирует характерный пример анализа изображений с неоднородной вероятностной структурой. Одна совокупность данных описывает здесь элементы изображений с взаимно коррелированными и относительно малыми уровнями яркостей I_m и I_n . Вторая группа характеризует наличие на изображениях объектов с высокой яркостью и практически некоррелированной структурой. Наглядно видна здесь и возможность разделения двух классов объектов на рассматриваемых изображениях по уровню их яркости.

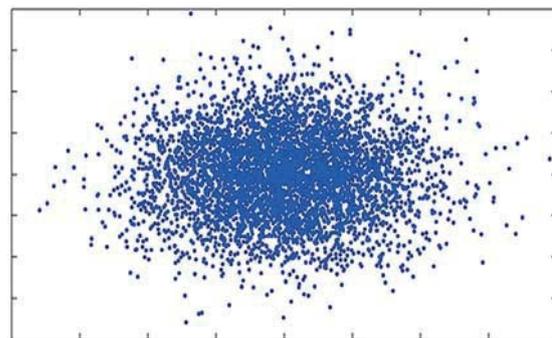
$p^*(I_m; x, y)$



Уровень яркости изображения I_m

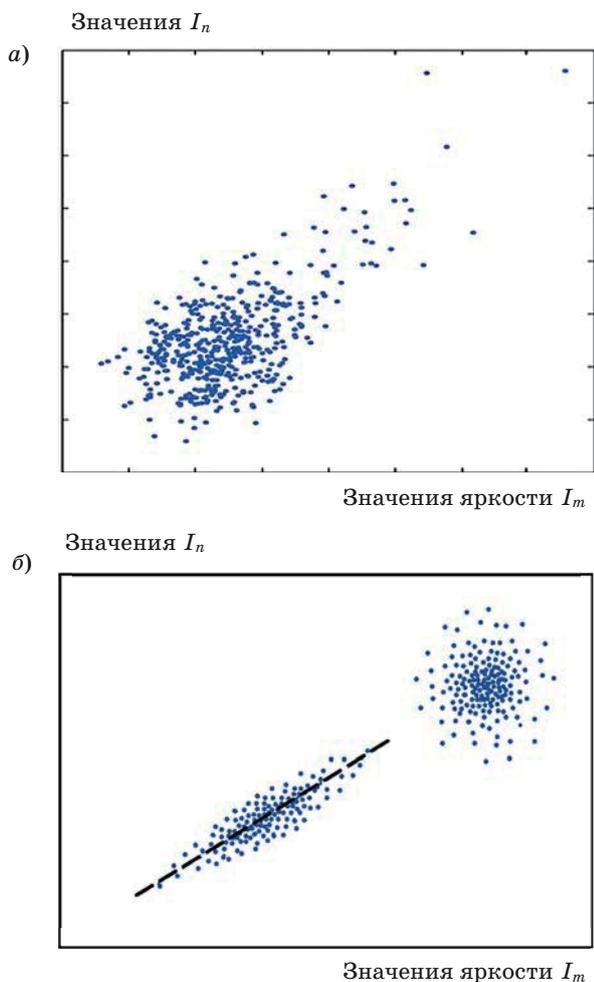
■ Рис. 4. Гистограмма распределения значений яркости изображения $I_m(x, y | \lambda_m)$ в пространстве (x, y)

Значения I_n



Значения яркости I_m в канале λ_m

■ Рис. 5. Типовая структура двумерной диаграммы рассеяния при некоррелированных гауссовых компонентах $I_m(x, y), I_n(x, y)$ и $\sigma_m^2 > \sigma_n^2$



■ **Рис. 6.** Характерный вид диаграмм рассеяния при появлении корреляционной зависимости (а) и при неоднородной вероятностной структуре изображений (б)

В целом необходимо отметить, что представление информации в виде двумерных диаграмм рассеяния позволяет в простой и наглядной форме отображать на плоскости (I_m, I_n) особенности вероятностной структуры изображений $I_m(x, y)$ и $I_n(x, y)$ и особенности их взаимосвязей.

Заключение

Представленные в данной работе результаты позволяют на уровне обобщенных моделей (см. рис. 1 и 2) выделить основные задачи вероятностного анализа и синтеза для систем аэрокосмического мониторинга на этапах получения, преобразования и обработки информационных процессов. В работе рассмотрены вопросы выбора информативных признаков при решении задач обнаружения и распознавания исследуемых объектов на космических изображениях, предло-

жен один из возможных подходов к общей классификации пространства признаков, выполнен вероятностный анализ спектральных индексных представлений информации и на основе двумерных диаграмм рассеяния показаны возможности совместной обработки данных при анализе многоспектральных изображений.

В целом представленные результаты позволяют сделать некоторые общие выводы.

1. Необходимость построения и анализа обобщенных моделей получения, преобразования и тематической обработки информации связана с возможностями систематизации накопленных результатов и возможностью разработки единого подхода к решению различных по своему содержанию задач космического мониторинга.

2. Задачи выбора информативных признаков характерны для любых систем обнаружения, классификации или распознавания объектов, процессов и явлений. Эти задачи трудно формализуются, в их решении существенную роль играют эвристические методы и использование накопленных статистических данных.

3. В зависимости от содержания решаемых задач один и тот же информативный признак исследуемого объекта может иметь высокую эффективность для одних задач и может быть малоэффективным в задачах другого класса. К сожалению, во многих реальных ситуациях набор информативных признаков определяется не тем, что нужно было бы измерить для решения конкретной задачи, а тем, что удастся измерить.

4. При обработке и анализе многоспектральных изображений достаточно часто выполняется совместная обработка данных различных спектральных каналов и на основе некоторых линейных и нелинейных преобразований вводятся новые информативные признаки. Полезно при этом подчеркнуть, что подобные преобразования не могут приводить к увеличению информативности исследуемых многоспектральных изображений. Такие операции могут улучшать визуальное восприятие данных, повышать наглядность отображения отдельных областей на изображениях при решении задач обнаружения или классификации заданных объектов.

5. Анализ пространственно-временной вероятностной структуры изображений на основе двумерных диаграмм рассеяния дает возможность накапливать, усреднять и систематизировать выборочные данные, выполнять визуальную оценку функциональных зависимостей, проверять однородность и выявлять неоднородные по яркости фрагменты в пространстве исследуемых изображений. Помимо этого, диаграммы рассеяния дают полезную информацию для решения типовых задач сегментации и распознавания на изображениях объектов различных классов.

Литература

1. Лебедев В. В., Гансвинд И. Н. Проектирование систем космического мониторинга. — М.: Наука, 2010. — 388 с.
2. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. — N. Y.: Elsevier, 2007. — 560 p.
3. Chandra A. M., Ghosh S. K. Remote Sensing and Geographical Information System. — New Delhi: Narosa Publishing House, 2006. — 312 p.
4. Rees W. G. Physical Principles of Remote Sensing. — Cambridge: Cambridge University Press, 2001. — 336 p.
5. Книжников Ю. Ф., Кравцова В. И., Тутубалина О. В. Аэрокосмические методы географических исследований. — М.: Академия, 2011. — 416 с.
6. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Соифера. — М.: Физматлит, 2003. — 784 с.
7. Васильев В. И. Распознающие системы: справочник. — Киев: Наукова думка, 1983. — 424 с.
8. Verhagen C., Duin R., Groen F. Progress Report on Pattern Recognition // Reports on Progress in Physics. 1980. Vol. 43. N 6. P. 785–831.
9. Потапов А. С. Распознавание образов и машинное восприятие. — СПб.: Политехника, 2007. — 548 с.
10. Top J. T., Gonzalez R. C. Pattern Recognition Principles. — London: Addison-Wesley Publishing Company, 1974. — 412 p.
11. Лабутина И. А. Дешифрование аэрокосмических снимков. — М.: Аспект Пресс, 2004. — 184 с.
12. Gonzales R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. — New Jersey: Prentice Hall, 2002. — 1072 p.
13. Shapiro L. G., Stokman G. C. Computer Vision. — New Jersey: Prentice Hall, 2001. — 752 p.
14. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. — М.: Радио и связь, 1982. — 624 с.
15. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. — М.: Радио и связь, 2004. — 608 с.
16. Вероятность и математическая статистика: энциклопедия / под ред. Ю. В. Прохорова. — М.: БРЭ, 2003. — 910 с.
17. Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Введение в математическую статистику. — М.: ЛКИ, 2010. — 600 с.
18. Хименко В. И. Диаграммы рассеяния в анализе случайных потоков событий // Информационно-управляющие системы. 2016. № 4. С. 85–93. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.85

UDC 519.21:528.85

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.2

Informative Feature Analysis in Data Processing for Aerospace Monitoring

Khimenko V. I.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, vih.13@yandex.ruOkhtilev M. Yu.^{a,b}, Dr. Sc., Tech., Professor, oxt@mail.ruKlucharev A. A.^b, PhD., Tech., Associate Professor, ak@aanet.ruMatiash V. A.^b, PhD., Tech., Associate Professor, vam@aanet.ru^aJSC «The Scientific Research and Experimental Centre of Intelligent Technologies «Petrokometa», 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^bSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: We analyze a generalized model of aerospace monitoring, systematize the informative feature selection results in the problems of object detection and identification, and perform probabilistic data analysis with multispectral structure of space images. **Results:** On the base of a generalized structural model of space monitoring technologies, some specific problems have been specified in relation to obtaining, transforming, processing and analyzing the information from Earth remote sensing. The most common informative features have been generally classified in relation to the problems of satellite image object segmentation, detection and recognition. We have shown the possibilities of probabilistic analysis of spectral indices and the features of multispectral image analysis by two-dimensional scattering patterns in a space of intensities. **Practical relevance:** The obtained results allow you to systematize and generalize numerous disparate studies of the selection and analysis of informative features. The processing algorithm synthesis procedures, the complexity and general efficiency of solving the basic space monitoring problems significantly depend on the choice and structure of these features.

Keywords — Space Monitoring, Data Processing, Informative Features, Image Recognition, Probabilistic Analysis, Scatterplot.

References

1. Lebedev V. V., Gansvind I. N. *Proektirovanie sistem kosmicheskogo monitoringa* [Remote Sensing Systems Design]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 388 p. (In Russian).
2. Schowengerdt R. A. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. New York, Elsevier, 2007. 560 p.
3. Chandra A. M., Ghosh S. K. *Remote Sensing and Geographical Information System*. New Delhi, Narosa Publishing House, 2006. 312 p.
4. Rees W. G. *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge, Cambridge University Press, 2001. 336 p.
5. Knizhnikov U. F., Kravtsova V. I., Tutubalina O. V. *Aerokosmicheskie metody geograficheskikh issledovanii* [Aerospace Methods of Geographical Research]. Moscow, Academia Publ., 2011. 416 p. (In Russian).
6. *Metody kompiuternoii obrabotki izobrazhenii* [Methods of Computer Image Processing]. Ed. V. A. Soifer. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 784 p.
7. Vasiliev V. I. *Raspoznaiushchie sistemy* [Recognizing Systems. Handbook]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983. 424 p. (In Russian).

8. Verhagen C., Duin R., Groen F. Progress Report on Pattern Recognition. *Reports on Progress in Physics*, 1980, vol. 43, no 6, pp. 785–831.
9. Potapov A. S. *Raspoznavanie obrazov i mashinnoe vospriatie* [Pattern Recognition and Machine Perception]. Saint-Petersburg, Politekhnik Publ., 2007. 548 p. (In Russian).
10. Ton J. T., Gonzalez R. C. *Pattern Recognition Principles*. London, Addison-Wesley Publishing Company, 1974. 412 p.
11. Labutina I. A. *Deshifrovaniye aerokosmicheskikh snimkov* [Aerospace Images Decoding]. Moscow, Aspekt Press Publ., 2004. 184 p. (In Russian).
12. Gonzales R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. New Jersey, Prentice Hall, 2002. 1072 p.
13. Shapiro L. G., Stokman G. C. *Computer Vision*. New Jersey, Prentice Hall, 2001. 752 p.
14. Tikhonov V. I. *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical Radiotechnics]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1982. 624 p. (In Russian).
15. Tikhonov V. I., Kharisov V. N. *Statisticheskii analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem* [Statistical Analysis and Synthesis of Radio Engineering Devices and Systems]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 2004. 608 p. (In Russian).
16. Prokhorov Yu. V. *Veroiatnost' i matematicheskaya statistika: entsiklopediya* [Probability and Mathematical Statistics: Encyclopedia]. Moscow, BRE Publ., 2003. 910 p. (In Russian).
17. Ivchenko G. I., Medvedev Yu. I. *Vvedenie v matematicheskuyu statistiku* [Introduction to Mathematical Statistics]. Moscow, LKI Publ., 2010. 600 p. (In Russian).
18. Khimenko V. I. Scatterplots to Analysis of Random Stream of Events. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 4, pp. 85–93 (In Russian). doi:10.15217/issn 1684-8853.2016.4.85

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуются публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (MathType или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.doc); AdobeIllustrator (*.ai); AutoCad (*.dxf); Matlab (*.ps, *.pdf или экспорт в формат *.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат *.ai, *.esp, *.wmf, *.emf, *.svg;

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

- сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;
- экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>) по разным стандартам: Литература — СИБИД РФ, References — один из мировых стандартов.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: i.us.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОПРИЕМНИКА КАК МУЛЬТИПЛИКАТИВНАЯ ПОМЕХА ПРИ МЕЖКАДРОВОЙ ОБРАБОТКЕ В ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМАХ

В. А. Рогачев^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

А. А. Закутаев^а, старший научный сотрудник, начальник лаборатории

В. Д. Лиференко^а, доктор техн. наук, профессор

М. О. Колбанев^б, доктор техн. наук, профессор

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: в телевизионных системах визуализации достаточно широко используется компенсация неравномерности чувствительности фотоприемника. Однако, несмотря на видимые улучшения, компенсация неравномерности чувствительности фотоприемника не изменяет пороговой чувствительности. **Цель:** оценка влияния неравномерности чувствительности фотоприемника при межкадровой обработке в прецизионных телевизионных системах обнаружения. **Результаты:** получены выражения параметров распределений решающих статистик при влиянии неравномерности чувствительности фотоприемника. Показано, что компенсация неравномерности чувствительности фотоприемника приводит к перераспределению влияния и не обеспечивает полного устранения неравномерности чувствительности фотоприемника. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют оценить степень влияния неравномерности чувствительности фотоприемника для основных режимов работы прецизионной телевизионной системы обнаружения, а также показывают, что в режиме ограничения фоновыми шумами при малых фоновых шумах параметр распределения решающей статистики не зависит от неравномерности чувствительности фотоприемника.

Ключевые слова — межкадровая обработка, обнаружение сигналов, режимы работы фотоприемника, неравномерность чувствительности фотоприемника, компенсация неравномерности чувствительности фотоприемника.

Введение

Прецизионные телевизионные системы (ПТС) характеризуются, помимо прочих особенностей, существенной неравномерностью выходного сигнала фотоприемника — «геометрическим шумом» [1].

Эта неравномерность определяется двумя параметрами: неравномерностью темнового тока, проявляющейся при отсутствии внешней освещенности, и неравномерностью чувствительности фотоприемника (НЧФ). Причиной этих неравномерностей, как правило, является разброс технологических параметров при изготовлении фотоприемника.

Неравномерность чувствительности фотоприемника представляет собой помеху, которая при равномерной засветке поля фотоприемника дает различные значения сигнала для различных элементов [1].

Относительная неравномерность выходного сигнала фотоприемника согласно ГОСТ 28953-91 [2] оценивается следующим образом: $\Delta = (U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min})$, где U_{\max} и U_{\min} — максимальное и минимальное значения сигналов отдельных элементов фотоприемника.

Компенсация НЧФ как мультипликативной помехи производится умножением сигнала

каждого элемента фотоприемника на величину, обратную его чувствительности (в одной или нескольких точках), и является гораздо более сложной операцией, чем компенсация темнового тока, представляющего собой аддитивную помеху [3–7].

В телевизионных системах визуализации неравномерность выходного сигнала достаточно хорошо корректируется (компенсируется) [3–7]. Однако при обнаружении сигналов компенсация НЧФ не улучшает пороговой чувствительности [8].

Ранее [9, 10] были рассмотрены задачи обнаружения в ПТС без учета НЧФ. В данной работе рассмотрим особенности влияния НЧФ на характеристики обнаружения в различных режимах работы ПТС с компенсацией и без компенсации НЧФ.

Ограничимся случаем межкадровой обработки сигнала фотоприемника, когда производится поэлементное сравнение соседних кадров и можно сравнить элементы фотоприемника с одинаковой чувствительностью. Оценки влияния НЧФ на характеристики обнаружения ПТС уже рассматривались, но только для случая внутрикадровой обработки [11].

Анализ проведем на основе модели с двумя источниками шумов, применяемой в видеоинформационных (телевизионных) системах [12].

Такая модель приводит к появлению многих режимов работы ПТС, обусловленных взаимным соотношением токов и шумов на выходе фотоприемника [13].

Световой отклик каждого элемента фотоприемника, как правило, различен, тем самым и образуется НЧФ. Введем относительный коэффициент чувствительности для i -го элемента фотоприемника, имеющий различные значения для различных элементов: $\gamma_i = U_i / U_{\min}$. Значение относительного коэффициента чувствительности будет лежать в диапазоне $1 \leq \gamma_i \leq U_{\max} / U_{\min}$.

Рассмотрим влияние НЧФ отдельно для каждого режима, в котором может работать система. При этом полагаем, что размеры проекции обнаруживаемого объекта могут быть любыми в пределах матрицы фотоприемника. Для обработки имеется несколько кадров M , в которых нет полезного сигнала («опорных» кадров), и несколько кадров N , в которых сигнал присутствует. Полезный сигнал занимает некоторое количество элементов, его амплитуда может изменяться от элемента к элементу, ее значение неизвестно и стационарно от кадра к кадру. Характеристики НЧФ (среднее значение чувствительности и ее разброс) считаем стационарными по полю фотоприемника.

Для определения «контраста» между кадрами вычисляется некоторая функция (статистика), зависящая от режима, в котором работает ПТС [9, 11, 13].

Режим ограничения внутренним шумом

В этом случае наличие НЧФ приводит к изменению параметров модели с нормальным распределением по сравнению со случаем отсутствия НЧФ.

Проверяемые гипотезы о наличии H_1 или отсутствии H_0 сигнала будут иметь вид:

$$H_0 : x \in N(d, \sigma^2), y \in N(d, \sigma^2);$$

$$H_1 : x \in N(d, \sigma^2), y \in N(d + \gamma s, \sigma^2),$$

где d — темновой ток; σ^2 — дисперсия внутреннего шума; γ — относительный коэффициент чувствительности данного элемента фотоприемника; s — сигнал.

После вычитания темнового тока (полагаем, что дисперсия оценки темнового тока пренебрежимо мала) модель изменится и будет иметь следующий вид:

$$H_0 : x \in N(0, \sigma^2), y \in N(0, \sigma^2);$$

$$H_1 : x \in N(0, \sigma^2), y \in N(\gamma s, \sigma^2).$$

Для принятия решения о наличии или отсутствии сигнала для этого режима необходимо вычислить статистику Стьюдента [9, 11, 13]:

$$t = \left[\frac{\bar{y}}{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (x_i)^2}} \right] / (M),$$

где в числителе вычисляется среднее по сигнальной области с числом элементов M , а в знаменателе — оценка дисперсии по фоновой области окна обработки с числом элементов N .

Данная статистика имеет нецентральное распределение Стьюдента с параметром нецентральности $\phi_t = s/\sigma$ (при отсутствии неравномерности чувствительности) [9–13]. Этот параметр нецентральности пропорционален отношению сигнал/шум.

Определим, каким образом влияет НЧФ на параметр нецентральности распределения Стьюдента.

Вследствие наличия НЧФ числитель параметра нецентральности изменится и примет значение

$$\phi_t^\gamma(i) = (s\gamma_i) / \sqrt{\sigma^2} = (s/\gamma_i) / \sigma,$$

где i — номер элемента фотоприемника.

Таким образом, наличие НЧФ приводит к изменению параметра нецентральности и, следовательно, к изменению мощности (вероятности правильного обнаружения) алгоритма Стьюдента.

После компенсации НЧФ модель будет иметь следующий вид:

$$H_0 : x \in N(0, \sigma^2), y \in N(0, \sigma^2);$$

$$H_1 : x \in N(0, \sigma^2), y \in N(s, \sigma^2 / \gamma^2).$$

Параметр нецентральности распределения Стьюдента не изменится:

$$\phi_t^{1/\gamma}(i) = (s) / \sqrt{\sigma^2 / \gamma_i^2} = (s\gamma_i) / \sigma.$$

Таким образом, компенсация НЧФ не устраняет влияние неравномерности чувствительности в режиме ограничения внутренним шумом.

Режим обнаружения случайного сигнала

Для этого случая НЧФ будет проявляться следующим образом:

$$H_0 : x \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab), y \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab);$$

$$H_1 : x \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab),$$

$$y \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab + \gamma as),$$

где ab — дисперсия фонового шума; b — фоновый ток.

После вычитания темнового тока модель изменится и будет иметь следующий вид:

$$H_0: x \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab), y \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab);$$

$$H_1: x \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab), y \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab + \gamma as).$$

Для принятия решения о наличии или отсутствии полезного сигнала необходимо вычислить статистику Фишера [9–13]:

$$z = \left[\sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y})^2 / (N-1) \right] / \left[\sum_{i=1}^M (x_i - \bar{x})^2 / (M-1) \right].$$

В этой статистике используются оценки средних и дисперсии в «опорных» и «сигнальных» кадрах.

Данная статистика имеет центральное распределение Фишера с параметром, пропорциональным отношению сигнал/шум $\phi_i = (\sigma^2 + ab + as) / (\sigma^2 + ab)$ (при отсутствии неравномерности чувствительности) [9–13].

С учетом влияния НЧФ данный параметр будет равен

$$\phi_z^\gamma(i) = \left[\sigma^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right] / \left[\sigma^2 + \gamma_i ab \right].$$

Таким образом, наличие НЧФ приводит к изменению мощности алгоритма Фишера.

После компенсации НЧФ модель будет иметь следующий вид:

$$H_0: x \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma),$$

$$y \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma);$$

$$H_1: x \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma),$$

$$y \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma + as / \gamma),$$

поэтому параметр нецентральности распределения Фишера также изменится:

$$\phi_z^{1/\gamma}(i) = \left[\sigma^2 / \gamma_i + ab + as \right] / \left[\sigma^2 / \gamma_i + ab \right].$$

Таким образом, компенсация НЧФ не устраняет влияние неравномерности чувствительности в режиме обнаружения случайного сигнала.

Необходимо отметить, что если внутренние шумы малы, т. е. $\sigma^2 \ll ab + as$, то параметр нецентральности не зависит от НЧФ.

Режим ограничения фоновым шумом

Для этого случая НЧФ будет проявляться следующим образом:

$$H_0: x \in N(\gamma b, \gamma ab), y \in N(\gamma b, \gamma ab);$$

$$H_1: x \in N(\gamma b, \gamma ab), y \in N(\gamma b + \gamma s, \gamma ab + \gamma as),$$

где ab — дисперсия фонового шума; as — дисперсия сигнального шума.

Для принятия решения о наличии или отсутствии полезного сигнала необходимо вычислить статистику [8, 10]:

$$q = \left[\sum_{j=1}^N (y_j)^2 / N \right] / \left[\sum_{i=1}^M (x_i)^2 / M \right].$$

Данная статистика имеет дважды нецентральное распределение Фишера с параметром распределения $\phi_q = [(b + s)^2 + a(b + s)] / (b^2 + s)$ (при отсутствии неравномерности чувствительности) [9, 10].

В случае наличия НЧФ параметр распределения, пропорциональный отношению сигнал/шум, изменится:

$$\phi_q^\gamma(i) = \left[\gamma_i^2 (b + s)^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right] / \left[\gamma_i^2 b^2 + \gamma_i ab \right].$$

Таким образом, НЧФ приводит к изменению мощности алгоритма.

После компенсации НЧФ модель будет иметь следующий вид:

$$H_0: x \in N(b, ab / \gamma), y \in N(b, ab / \gamma);$$

$$H_1: x \in N(b, ab / \gamma), y \in N(b + s, ab / \gamma + as / \gamma),$$

поэтому параметр нецентральности дважды нецентральное распределения Фишера примет следующую форму:

$$\phi_q^{1/\gamma}(i) = \left[(b + s)^2 + ab / \gamma_i + as / \gamma_i \right] / \left[b^2 + ab / \gamma_i \right].$$

Таким образом, компенсация НЧФ не устраняет влияние неравномерности чувствительности в режиме ограничения фоновым шумом.

Следует отметить, что если шумы, вызываемые фоном, малы, т. е. $b^2 \gg ab$, то параметр нецентральности не зависит от НЧФ в этом режиме.

Режим общий

Для этого случая НЧФ будет проявляться следующим образом:

$$H_0: x \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab), y \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab);$$

$$H_1: x \in N(d + \gamma b, \sigma^2 + \gamma ab),$$

$$y \in N(d + \gamma b + \gamma s, \sigma^2 + \gamma ab + \gamma as).$$

После вычитания темнового тока модель изменится и будет иметь следующий вид:

$$H_0: x \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab), y \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab);$$

$$H_1: x \in N(\gamma b, \sigma^2 + \gamma ab),$$

$$y \in N(\gamma b + \gamma s, \sigma^2 + \gamma ab + \gamma as).$$

Для принятия решения о наличии или отсутствии полезного сигнала необходимо вычислить модифицированную статистику Фишера [9, 10]:

$$r = \left[\sum_{j=1}^N (y_j - \bar{x})^2 / N \right] / \left[\sum_{i=1}^M (x_i - \bar{x})^2 / (M - 1) \right].$$

Данная статистика имеет нецентральное распределение Фишера с параметром $\phi_r = s^2 / (\sigma^2 + ab + as)$ (при отсутствии НЧФ) [9, 10].

Для этого режима при наличии НЧФ параметр распределения, пропорциональный отношению сигнал/шум, будет равен

$$\phi_r^\gamma(i) = \left[\gamma_i^2 s^2 \right] / \left[\sigma^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right].$$

Таким образом, НЧФ приводит к изменению мощности алгоритма.

После компенсации НЧФ модель будет иметь следующий вид:

$$H_0: x \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma),$$

$$y \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma);$$

$$H_1: x \in N(b, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma),$$

$$y \in N(b + s, \sigma^2 / \gamma^2 + ab / \gamma + as / \gamma).$$

Параметр нецентральности дважды нецентрального распределения Фишера будет иметь вид

$$\phi_r^{1/\gamma}(i) = \left[s^2 \right] / \left[\sigma^2 / \gamma_i^2 + ab / \gamma_i + as / \gamma_i \right].$$

Таким образом, компенсация НЧФ не устраняет влияние неравномерности чувствительности в общем режиме.

Для каждого из режимов работы ПТС получены выражения параметров распределений решающих статистик при отсутствии НЧФ, учитывающие влияние НЧФ, а также при компенсации НЧФ (таблица). Параметры для каждого из рассмотренных режимов пропорциональны отношению сигнал/шум и зависят от НЧФ.

Наличие НЧФ изменяет постоянную и случайную составляющие как сигнала, так и фона и не затрагивает внутренние шумы. Компенсация НЧФ перераспределяет (переносит) влияние НЧФ и не приводит к полному устранению влияния НЧФ.

Таким образом, наличие НЧФ вызывает изменение параметров распределений решающих статистик, что в свою очередь приводит к изменению вероятностей правильного обнаружения.

■ Влияние неравномерности чувствительности на параметры функций вероятностей правильного обнаружения

Режим	Параметр статистики при условии		
	отсутствия НЧФ	наличия НЧФ	компенсации НЧФ
Ограничения внутренним шумом	$\phi_t^1 = (s) / \sqrt{(\sigma^2)}$	$\phi_t^\gamma(i) = (s\gamma_i) / \sqrt{(\sigma^2)}$	$\phi_t^{1/\gamma}(i) = (s) / \sqrt{\sigma^2 / \gamma_i}$
Обнаружения случайного сигнала	$\phi_z^1 = \left[\sigma^2 + ab + as \right] / \left[\sigma^2 + ab \right]$	$\phi_z^\gamma(i) = \left[\sigma^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right] / \left[\sigma^2 + \gamma_i ab \right]$	$\phi_z^{1/\gamma}(i) = \left[\sigma^2 / \gamma_i + ab + as \right] / \left[\sigma^2 / \gamma_i + ab \right]$
Ограничения фоновым шумом	$\phi_q^1 = \left[(b + s)^2 + a(b + s) \right] / \left[b^2 + ab \right]$	$\phi_q^\gamma(i) = \left[\gamma_i^2 (b + s)^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right] / \left[\gamma_i^2 b^2 + \gamma_i ab \right]$	$\phi_q^{1/\gamma}(i) = \left[(b + s)^2 + ab / \gamma_i + as / \gamma_i \right] / \left[b^2 + ab / \gamma_i \right]$
Общий	$\phi_r^1 = s^2 / (\sigma^2 + ab + as)$	$\phi_r^\gamma(i) = \left[\gamma_i^2 s^2 \right] / \left[\sigma^2 + \gamma_i ab + \gamma_i as \right]$	$\phi_r^{1/\gamma}(i) = \left[s^2 \right] / \left[\sigma^2 / \gamma_i^2 + ab / \gamma_i + as / \gamma_i \right]$

Следует отметить, что в режиме ограничения фоновыми шумами при малых фоновых шумах параметр распределения решающей статистики не зависит от НЧФ. Аналогичная ситуация складывается и в режиме обнаружения случайного сигнала при малых внутренних шумах.

Заключение

В работе получены выражения параметров распределений решающих статистик при влиянии неравномерности чувствительности фотоприемника.

Литература

1. Solid State Imaging/Ed. by P. Jespers, F. Van de Wiele, M. White. — Noordhoff-Leyden, 1976. — 752 p.
2. ГОСТ 28953-91. Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Методы измерения параметров. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 31 с.
3. Брондз Д. С., Харитонова Е. Н. Коррекция геометрического шума МФПУ с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов передаточных характеристик матрицы полиномом Т-порядка // Журнал радиоэлектроники. 2008. № 11. С. 1–29.
4. Сергунов А. А. Методы коррекции неравномерности чувствительности инфракрасных матричных фотоприемников // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Вып. 8. С. 38–42.
5. Scribner D. A., Kruer M. R., and Griedly C. J. Physical Limitations to Nonuniformity Correction in Focal Plane Arrays//Proc. SPIE. 1987. Vol. 865. P. 185–201.
6. Wang R., Chen P., and Tsien P. An Improved Nonuniformity Correction Algorithm for Infrared Focal Plane Arrays which is Easy to Implement// Infrared Physics and Technology. 1998. Vol. 39. P. 15–21.
7. Emerson G. P., Little S. J. Flat-Fielding for CCDs in AAVSO Observations//AAVSO. 1999. Vol. 27. P. 49–54.

Показано, что операция компенсации не обеспечивает полного устранения неравномерности чувствительности фотоприемника.

Полученные результаты позволяют оценить степень влияния неравномерности чувствительности фотоприемника для основных режимов работы прецизионной телевизионной системы обнаружения, а также показывают, что в режиме ограничения фоновыми шумами при малых фоновых шумах параметр распределения решающей статистики не зависит от неравномерности чувствительности фотоприемника.

8. Рогачев В. А., Фантиков О. И. Влияние неравномерности чувствительности фотоприемника на пороговую чувствительность ТВ-систем // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1987. № 2. С. 48–55.
9. Колбанев М. О., Рогачев В. А. Оптимизация выделения полезного сигнала в многорежимных информационных системах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РЛТ. 2010. Вып. 1. С. 92–101.
10. Колбанев М. О., Рогачев В. А. Анализ проблемы обнаружения в инфракрасных системах // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5. С. 51–54.
11. Колбанев М. О., Рогачев В. А., Закутаев А. А. Неравномерность чувствительности фотоприемника и ее компенсация при обнаружении в инфракрасных системах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2015. Вып. 5. С. 79–88.
12. Цыцулин А. К., Адамов Д. Ю., Манцетов А. А., Зубакин И. А. Твердотельные телекамеры: Накопление качества информации. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. — 272 с.
13. Рогачев В. А. Особенности обработки сигнала в прецизионных телевизионных системах // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2011. Вып. 2. С. 18–26.
14. Lehmann E. L., Romano J. P. Testing Statistical Hypotheses. — Springer, 2005. — 800 p.

UDC 519.248, 621.384.3

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.13

Photodetector Sensitivity Non-Uniformity as a Multiple Interference in High-Precision Television Systems with Interframe Processing

Rogachev V. A.^a, PhD, Tech., Senior Researcher, rogachevv50@gmail.com

Zakutaev A. A.^a, Senior Researcher, Head of a Research Laboratory, zakutaev.a@mail.ru

Liferenko V. D.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, li.viktor2013@yandex.ru

Kolbanev M. O.^b, Dr. Sc., Tech., Professor, mokolbanev@mail.ru

^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bState University of Economics, 21, Sadovaya St., 191023, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Television visualization systems often compensate the non-uniformity of photodetector sensitivity. However, in spite of the apparent improvement, this compensation does not alter the threshold sensitivity. **Purpose:** The goal of this research is assessing the influence of non-uniform photodetector sensitivity over inter-frame processing in high-precision TV detection systems. **Results:** We

have obtained the distribution parameters for decisive statistics when the photodetector sensitivity is non-uniform. The compensation of this non-uniformity redistributes its influence and does not provide its complete elimination. **Practical relevance:** The obtained results allow you to assess the degree of influence of photodetector sensitivity non-uniformity for the main operation modes of a high-precision TV detection system. In the background limitation mode, when the background noise is low, the distribution parameter of the decisive statistics does not depend on the non-uniformity.

Keywords — Interframe Processing, Signal Detection, Photodetector Operation Modes, Photodetector Sensitivity Non-Uniformity, Photodetector Sensitivity Non-Uniformity Compensation.

References

1. *Solid State Imaging*. Ed. by P. Jespers, F. Van de Wiele, M. White. Noordhoff-Leyden, 1976. 752 p.
2. State Standard 28953-91. Methods of Parameters Measurement. Photosensitive Devices with Charge Transfer. Moscow, Standartov Publ., 2004. 31 p. (In Russian).
3. Brondz D. S., Haritonova E. N. Nonuniformity Correction of Matrix Photodetector with Least Squares Approximation of the Transfer Characteristics of the Matrix using T-order Polynom. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2008, no. 11, pp. 1–29 (In Russian).
4. Sergunov A. A. Methods of Nonuniformity Sensitivity Correction of Matrix Infrared Photodetectors. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2009, no. 8, pp. 38–42 (In Russian).
5. Scribner D. A., Krueer M. R., and Griedly C. J. Physical Limitations to Nonuniformity Correction in Focal Plane Arrays. *Proc. SPIE*, 1987, vol. 865, pp. 185–201.
6. Wang R., Chen P., and Tsien P. An Improved Nonuniformity Correction Algorithm for Infrared Focal Plane Arrays which is Easy to Implement. *Infrared Physics and Technology*, 1998, vol. 39, pp. 15–21.
7. Emerson G. P., Little S. J. Flat-Fielding for CCDs in AAVSO Observations. *AAVSO*, 1999, vol. 27, pp. 49–54.
8. Rogachev V. A., Fantikov O. I. The Influence of Nonuniformity Sensitivity of the Photodetector on the Threshold Sensitivity of TV Systems. *Tekhnika sredstv svyazi. Ser. Tekhnika teledeniia* [Communications Equipment Technology. Ser. Television Technology], 1987, no. 2, pp. 48–55 (In Russian).
9. Kolbanev M. O., Rogachev V. A. Useful Signal Detection Optimization at the Multimode Information Systems. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Radiolokatsionnaia tekhnika* [Questions of Radio-electronics. Ser. Radio Locating Technique], 2010, iss. 1, pp. 92–101 (In Russian).
10. Kolbanev M. O., Rogachev V. A. An Analysis of the Detection Problem in Infrared Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2010, no. 5, pp. 51–54 (In Russian).
11. Kolbanev M. O., Rogachev V. A., Zakutaev A. A. Nonuniformity Sensitivity of the Photodetector and his Compensation at the Infrared Detection Systems. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika teledeniia* [Questions of Radio-electronics. Ser. Television Technology], 2015, iss. 5, pp. 79–88 (In Russian).
12. Tsitsulin A. K., Adamov D. U., Mantsvetov A. A., Zubakin I. A. *Tverdotel'nye telekamery: Nakoplenie kachestva informatsii* [Solid State TV Cameras: the Accumulation of Information]. Saint-Petersburg, LETI Publ., 2014, 272 p. (In Russian).
13. Rogachev V. A. Signal Processing Features in Precision Television Systems. *Voprosy radioelektroniki. Ser. Tekhnika teledeniia* [Questions of Radio-electronics. Ser. Television Technology], 2011, iss. 2, pp. 18–26 (In Russian).
14. Lehmann E. L., Romano J. P. *Testing Statistical Hypotheses*. Springer, 2005. 800 p.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ДЛЯ РЕШЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НАУЧНЫХ ЗАДАЧ В ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДАХ

А. В. Скатков^а, доктор техн. наук

А. А. Брюховецкий^а, канд. техн. наук, доцент

Д. В. Моисеев^а, канд. техн. наук, доцент

Т. А. Абрамов^а, старший преподаватель

^аСевастопольский государственный университет, Севастополь, РФ

Цель исследования: разработка интеллектуальной системы мониторинга для решения крупномасштабных научных задач в облачных вычислительных средах в условиях дефицита априорной информации о состоянии среды. **Результаты:** проведен многоуровневый анализ данных об изменении значений метрик ИТ-сервисов. Разработан комплекс моделей классификации информационных ситуаций, позволяющих облачным брокерам поддерживать процесс принятия решений по выбору оптимальной стратегии решения задач мониторинга. Для создания интеллектуальной системы мониторинга были использованы адаптивные методы, оценивающие достоверность и изменчивость информационных ситуаций, возникающих при анализе облачных сред. Рассмотренные стратегии мониторинга учитывают нестационарность облачной среды и, таким образом, могут быть применены при проактивном анализе ее состояний. Использование малых объемов выборки при проведении оценки ИТ-сервисов облачной среды позволяет понизить трудоемкость проведения мониторинга. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть применены для мониторинга облачных вычислительных сред при решении крупномасштабных научных задач в рамках расширенной эталонной архитектуры NIST, ориентированной на взаимодействие триады облачных акторов «клиент — брокер — провайдер».

Ключевые слова — интеллектуальная система, система мониторинга, ИТ-сервисы, метрики ресурсов, адаптивная модель, информационное состояние объекта, критерии оценки, неоднородность наблюдений.

Введение

Увеличивающиеся масштабы и сложность облачных вычислительных сред (ОВС) предъявляют все более жесткие требования к системам мониторинга (СМ), ставшим неотъемлемой частью ОВС. При этом цели мониторинга могут быть разными. С одной стороны — это отслеживание сбоев, предкритических ситуаций, которые могут привести к неправильной работе программ или к выходу из строя компонентов вычислительной системы. С другой стороны, усложнение архитектуры ОВС приводит к необходимости постоянного контроля эффективности использования дорогостоящих ресурсов. Обе эти задачи в большинстве случаев требуют отслеживания десятков параметров с каждого вычислительного узла с периодом порядка единиц секунд, а в перспективе и долей секунды [1, 2]. Такие потоки информации с сотен, тысяч узлов современных систем и с сотен тысяч для перспективных систем требуют новых подходов к СМ.

Целью работы является разработка методов построения модели интеллектуальной СМ для решения крупномасштабных научных задач в ОВС в условиях дефицита априорной информации о состоянии среды на основе многоуровневой обработки и анализа данных об изменении значений метрик физических ресурсов и ИТ-сервисов и их статистическая оценка с использованием задан-

ных критериев. Особое внимание уделяется разработке комплекса моделей классификации информационных ситуаций, возникающих при выполнении задач мониторинга многомерных объектов. Это позволит брокерам облачных сервисов обеспечивать поддержку принятия решений по выбору одной из альтернативных стратегий при решении функциональных задач мониторинга. Таким образом, при возникновении коллизионных ситуаций в вычислительной среде будет предоставлена возможность поддержки требуемого уровня качества ИТ-сервисов, что в свою очередь повысит эффективность взаимодействия триады агентов облачного сервиса «клиент — брокер — провайдер» [3].

Отметим следующие особенности крупномасштабных научных задач в ОВС: иерархичность графового представления задач, вложенные графовые структуры; существенная неоднородность вычислительного графа решения задачи, большая вариация мощности сечений графа; композитность приложений, что требует разнообразия физических ресурсов и ИТ-сервисов; различие в трудоемкости решения задачи по числу операций; необходимость согласования директивных сроков выполнения задач; параметрическая и структурная неустойчивость.

При решении поставленной задачи возникают проблемы обработки больших данных: высокая вычислительная сложность, обусловленная

обработкой огромных объемов данных; высокая динамика мониторируемых объектов; дефицит априорной информации о мониторируемых объектах; нестационарность информационной ситуации состояния объектов и среды; обеспечение высокой скорости обработки запросов; предоставление метрик информационных ресурсов и сервисов в реальном времени.

Для разрешения указанных проблем предлагается использовать комплексный подход к построению СМ, которому будут присущи отличительные функциональные и структурные особенности. Разрабатываемая СМ будет обладать очевидными преимуществами по сравнению с подходами, реализованными в известных СМ. Основные отличия предлагаемых решений по построению интеллектуальной СМ состоят в использовании малых объемов выборок при проведении измерений метрик объектов мониторинга; методов, обладающих низкой трудоемкостью и высоким быстродействием; критериев для оценки информационных ситуаций изменения состояния объектов; адаптивных подходов, позволяющих отслеживать изменчивость информационных ситуаций объектов ОВС; метода актуализации баз данных, содержащих информацию о мониторируемых объектах ОВС; стратегий мониторинга, осуществляющих проактивный анализ состояния объектов ОВС и учитывающих нестационарность среды и объектов.

Разработка интеллектуальных СМ, решающих поставленные задачи, является актуальной, имеющей научную новизну и практический интерес.

Обзор известных систем мониторинга

Современные СМ предназначены для контроля и анализа состояния физических ресурсов и качества предоставления ИТ-сервисов. На сегодняшний день в системный мониторинг входят задачи управления и оперативного прогнозирования изменений сложных систем [4, 5]. Для выявления корреляций внутри таких систем необходимо осуществлять непрерывный мониторинг их объективных параметров. В работах [6–8] описываются решения задач по оптимизации распределения ресурсов ОВС и принципам функционирования программного обеспечения в распределенных средах.

Одной из крупномасштабных критических задач для экономики Российской Федерации является информационное обеспечение процессов поиска и разведки месторождений углеводородов, мониторинга экологического состояния акваторий, в которых расположены объекты инфраструктуры нефтегазового комплекса, в целях обеспечения их безотказного и безопасного

функционирования. Практическое осуществление данной задачи происходит с использованием аэрокосмических средств мониторинга, обладающих высоким пространственным разрешением. Для эффективного функционирования таких систем необходимо решение научных и прикладных задач оперативного анализа данных мониторинга систем, установленных в местах месторождений нефти и газа, а также внедрение технологий анализа критических ситуаций, возникающих при эксплуатации каналов передачи энергоресурсов [9].

Важным аспектом проведения мониторинга акватории моря, в частности Азово-Черноморского региона, является разработка комплекса новых методов и технических средств, позволяющих производить сведение данных из различных источников, таких как спутниковое дистанционное зондирование [10–12], мониторинг акватории, выполняемый береговыми станциями, и измерения, производимые экспедиционными судами. Объем собираемых данных в настоящее время составляет до 1 ТБ/сут [13].

В ряде стран существует тенденция к свободному распространению информации, в том числе и научных измерений гидрологических и гидрохимических показателей акватории, полученных со спутников и береговых станций. В частности, такими организациями, как ЮНЦ РАН и МО УкрНИГМИ, предоставляются мониторинговые данные морей Восточной Арктики, Азово-Черноморского региона и Каспийского моря [14]. Учитывая объем предоставляемых данных и динамику их обновления, становятся очевидными преимущества использования облачных вычислений для их анализа в реальном времени.

В своей работе [15] А. Н. Ширяев представляет вероятностно-статистические методы теории принятия решений, объясняющие, «как по наблюдениям за реализацией случайного процесса обнаружить спонтанно возникающие эффекты, когда свойства процесса изменяются скачкообразно». В ОВС большая часть проблем анализа данных связана с исследованиями стохастических динамических систем, в которых обнаружение существенных, но редких информационных ситуаций часто имеет решающее значение.

В то же время на практике нет СМ, которые бы успешно разрешали проблемы, касающиеся обработки больших данных, адаптации стратегий мониторинга к текущему информационному состоянию объектов, использования статистических критериев для оценки информационных ситуаций изменения состояния объектов и др. Проведенный анализ показывает, что предлагаемые на мировом рынке СМ имеют в основном типовые функции, которые, как правило, ограничиваются сбором статистических данных об

измеряемых метриках ресурсов и ИТ-сервисов. Основной недостаток известных СМ состоит в том, что в них отсутствуют характеристики уровня правдоподобия при оценке и прогнозировании информационных состояний объектов ОВС и не учитывается стохастическая природа состояний объектов и нестационарность процессов.

Методы построения и функции интеллектуальной системы мониторинга в расширенной эталонной архитектуре NIST

Решение функциональной задачи оценки изменения состояния объектов основано на модели ОВС, адаптированной для крупномасштабных научных вычислений в рамках концепции «сервис-ориентированной науки». Предлагается использовать расширенную эталонную архитектуру NIST (National Institute of Standards and Technology) [1, 4]. В предлагаемой авторами архитектуре [3] выделено семь взаимодействующих субъектов (акторов), выполняющих определенные функциональные задачи.

Мониторинговые функции объектов ОВС и их оценка в соответствии с эталонными значениями метрик качества ИТ-сервисов выполняются Аудитором. Облачный Аудитор в классической модели — сущность, производящая независимую оценку облачных услуг, обслуживания информационных систем, производительности и безопасности реализации облака. С учетом ряда формальных правил эта сущность выполняет функции внешнего аудита Потребителей, Провайдеров и Брокеров.

Система мониторинга для решения крупномасштабных научных задач в ОВС является сложной системой, а значит, для проектирования и разработки таких СМ объектов (ресурсов, приложений, сервисов) необходимо использовать принципы системного подхода, позволяющие сформулировать последовательность функциональных задач, которым должна удовлетворять разрабатываемая система.

1. Для реализации подхода требуется разработать СМ, содержащую функциональные подсистемы: обработки значений метрик объектов ОВС; классификации информационных ситуаций об изменении состояний объектов; определения стратегий контроля в зависимости от частоты/глубины контроля, объемов контролируемых выборок; выбора оптимальной альтернативной стратегии мониторинга объектов ОВС с использованием заданных критериев; определения моментов времени актуализации информации в базе данных, содержащей сведения о значениях метрик мониторируемых объектов, стратегии мониторинга каждого объекта и др.

2. Предлагается использовать подход к обнаружению изменений информационных состояний объектов, который базируется на методах математической статистики и теории вероятностей, оценки энтропии, непараметрической статистики, теории оптимальных решений, интеллектуального анализа данных.

3. Функционирование системы должно поддерживаться экспертом на основе многократных результатов измерений, получаемых при оценке контролируемых значений метрик нестационарного состояния объектов за различные временные интервалы.

4. В целях адаптации параметров выбора стратегий мониторинга к текущему состоянию объекта настройка параметров СМ должна быть не однообразной, а постоянной в процессе функционирования, поскольку контролируемая среда является нестационарной, и со временем информативность настраиваемых параметров уменьшается.

5. Необходимо использовать средства имитационного моделирования, которые повышают быстродействие, реактивность системы, адекватность принятия решений при настройке параметров системы, сокращают объем хранимых данных и восполняют дефицит контролируемой информации.

Система мониторинга для исследования изменений состояния объектов содержит статистические критерии. Системообразующим фактором является процесс вычисления статистических критериев, что определяет структуру подсистем и связи между ее модулями. При дальнейшей эксплуатации системы следует адаптировать ее параметры к изменяющимся условиям и руководствоваться накопленным к этому моменту опытом ее эксплуатации.

Для достижения перечисленных выше целей необходимо определить функции системы. К числу основных функций относятся: определение информационного состояния объектов мониторинга (ОМ) сети; определение стратегии контроля (СК) состояния объекта (постоянная, периодическая, случайное квантование); классификация информационных состояний объектов на основе оценки информационной меры Кульбака и оценки дисперсии D остатков по критерию Спирмена; определение стратегии мониторинга (СТМ) состояния объектов в зависимости от таких параметров мониторинга, как частота, глубина, объем выборки, достоверность принятия решения; формирование и актуализация базы данных, содержащей информацию об ОМ, стратегии мониторинга, векторе P — вероятностей выбора стратегии мониторинга, векторе метрик ИТ-сервисов — SLA.

На основе описанного подхода предлагается адаптивная СМ, этапы функционирования которой представлены на рисунке. СМ может функ-



■ Этапы функционирования CM для решения крупномасштабных научных задач в облачных вычислительных средах

ционировать в одном из трех функциональных режимов: рабочем (стационарном), обучения и оптимизации. Адаптивные свойства системы реализуются посредством использования двух последних режимов. В рабочем режиме адаптивной CM происходит также самотестирование системы. По его результатам принимается решение, если необходимо, о смене стратегии мониторинга. Пусть стратегия мониторинга j -го объекта OBC i -м средством описывается кортежем

$$CTM_{ij} = (SK, SO, SLA, P).$$

В свою очередь каждый из параметров **SK**, **SO** может быть представлен как

$$SK = (f, \Delta t, \tau); SO = (Kr, n, p, z, r),$$

где f — частота мониторинга состояния объекта; Δt — ширина временного окна (глубина мониторинга), длительность; τ — период повторения измерения метрик; n — объем контролируемой вы-

борки при использовании критерия Kr ; p — уровень достоверности при использовании критерия Kr ; z — затраты на распознавание изменения состояния объекта при использовании критерия Kr ; r — коэффициент использования ресурсов (времени, памяти и т. п.).

Функционирование системы состоит в следующем. На основании поступления запросов от акторов OBC на этапе формирования запроса производится выбор значения u_{ij} из бинарной матрицы **U**, задающей подключение объектов OBC к определенным средствам мониторинга (j — номер объекта OBC, i — тип используемого средства мониторинга).

На этапе измерения значений метрик физических ресурсов и показателей качества ИТ-сервисов производится формирование векторов **OM** и **SLA**. Сформированные векторы **OM** и **SLA** подвергаются обработке, скаляризации и записываются в соответствующие поля базы данных.

На этапе определения стратегии контроля **SK** принимается одна из альтернативных стратегий:

постоянная, периодическая, случайное квантование. При оценке отдельной метрики необходимо измерять отношение ее среднего значения к размаху. В случае, если оно оказывается небольшим, наблюдается эффект зашумления. Чем больше отношение полученного среднего значения к размаху, тем больший объем мониторинга требуется для обеспечения необходимого уровня достоверности.

На этапе классификации состояния объекта **SO** проводится оценка значений метрик вектора **OM** с использованием заданного критерия Kr и уровня достоверности p . Информационное состояние **SO** может классифицироваться как стационарное, почти стационарное, кусочно-стационарное на основе оценки информационной меры Кульбака и оценки дисперсии D остатков по критерию Спирмена. Если информационное состояние **SO** — стационарное, текущая стратегия мониторинга признается оптимальной. В противном случае текущая стратегия мониторинга **СТМ** подвергается оптимизации. На этапе оптимизации новая стратегия мониторинга **СТМ'** содержит откорректированную стратегию контроля состояния **SK'** за счет выбора оптимальных значений параметров при возможном участии лица, принимающего решение.

В случае изменения текущей стратегии мониторинга **СТМ'** производится актуализация соответствующих полей базы данных: **OM**, **SLA**, **СТМ**, **P**. Выходными значениями системы мониторинга являются значения метрик векторов **OM** и **SLA'**, которые передаются актору, от которого поступил запрос.

Заключение

Проведенный анализ известных **СМ** для решения крупномасштабных научных задач в облачных вычислительных средах показывает, что при решении поставленной задачи возникают проблемы обработки больших данных, к числу которых относятся высокая вычислительная сложность, обусловленная обработкой огромных объемов данных; высокая динамика и нестационарность информационной ситуации состояния физических ресурсов и ИТ-сервисов; дефицит априорной информации о состоянии среды и объектов; обеспечение высокой

скорости обработки запросов в реальном времени и др. Для разрешения указанных проблем предлагается адаптивный подход, который обладает очевидными преимуществами по сравнению с известными. Основные отличия предлагаемых решений по построению интеллектуальной **СМ** состоят в использовании малых объемов выборок при проведении измерений метрик объектов мониторинга; методов, обладающих низкой трудоемкостью и высоким быстродействием; адаптивных методов, позволяющих оценить достоверность и изменчивость информационных ситуаций объектов **ОВС**; стратегий мониторинга, осуществляющих проактивный анализ состояния объектов **ОВС** и учитывающих нестационарность среды.

Предлагаемый подход к построению интеллектуальной **СМ** для решения крупномасштабных научных задач в **ОВС** в рамках расширенной эталонной архитектуры **NIST**, ориентированной на взаимодействие триады агентов облачного сервиса «клиент — брокер — провайдер», может быть эффективно использован для решения задач оперативного мониторинга изменений в процессах, протекающих, например, в природных комплексах; обеспечения пользователей широкого профиля интегральной информацией о системе, что позволяет строить долгосрочные прогнозы глобальных климатических изменений, полученных, например, с помощью спутникового дистанционного зондирования и телеметрии геоинформационными системами.

Применение предложенного подхода построения интеллектуальных **СМ** позволит совершить переход к качественно новым знаниям, оптимизировать процессы обработки, анализа, интеграции гетерогенных данных, происходящие в крупномасштабных научных исследованиях, повысить достоверность и оперативность принимаемых решений по адаптивному управлению стратегиями мониторинга.

В развитие проведенных исследований планируется разработка программных моделей по оценке качественного изменения состояния сетевого трафика, в который привносится измененный поток интенсивности обработки заявок.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-29-07936).

Литература

1. Mell P., Grance T. The NIST Definition of Cloud Computing: Recommendations of the National Institute of Standards and Technology, 2010. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf> (дата обращения: 15.10.2016).
2. Никитенко Д. А., Стефанов К. С. Исследование эффективности параллельных программ по данным мониторинга // Вычислительные методы и программирование. 2012. Т. 13. № 2. С. 97–102.
3. Скатков А. В., Шевченко В. И. Расширение референтной модели облачной вычислительной среды в концепции крупномасштабных научных исследо-

- ваний // Тр. Института системного программирования РАН. 2015. Т. 27. № 6. С. 285–306.
4. Ceilometer Developer Documentation. <https://ceilometer.readthedocs.org/en/latest/measurements.html> (дата обращения: 15.10.2016).
 5. Homepage of Zabbix. The Enterprise-class Monitoring Solution for Everyone. <http://www.zabbix.com/ru/> (дата обращения: 15.10.2016).
 6. Грушин Д. А., Кузюрин Н. Н. Балансировка нагрузки в системе Unihub на основе предсказания поведения пользователей // Тр. Института системного программирования РАН. 2015. Т. 27. № 5. С. 23–34.
 7. Циперман Г. Н. Стохастическая модель процесса идентификации сервисов информационной системы // Тр. Института системного программирования РАН. 2015. Т. 26. № 5. С. 7–28.
 8. Suznjevic M., Skorin-Kapov L., and Humar I. User Behavior Detection Based on Statistical Traffic Analysis for thin Client Services // Computer Science and Information Systems. 2015. Vol. 12. N 2. P. 587–605. doi: 10.2298/CSIS140810018S
 9. Бондур В. Г. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса. — М.: Научный мир, 2012. — 558 с.
 10. Ратнер Ю. Б., Толстошеев А. П., Холод А. Л. Создание базы данных мониторинга Черного моря с использованием дрейфующих поверхностных буев // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 3. С. 50–69.
 11. Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. — М.: ИКИ РАН, 2011. — 480 с.
 12. Коротаев Г. К., Демьшев С. Г., Ли М. Е. Спутниковый мониторинг морских акваторий. — Киев: Академперіодика, 2014. — С. 91–100.
 13. Балашов И. В., Халикова О. А. Организация автоматического получения наборов информационных продуктов из центров архивации и распространения спутниковых и метеоданных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 9–20.
 14. Матишов Г. Г., Бердников С. В., Жичкин А. П. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013). — Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2014. — 256 с.
 15. Ширяев А. Н. Вероятностно-статистические методы в теории принятия решений. — М.: МЦНМО, 2014. — 144 с.

UDC 004.56

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.19

Intelligent Monitoring System for Solving Large-Scale Scientific Problems in Cloud Computing Environments

Skatkov A. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, AVSkatkov@sevsu.ru,

Brjuhoveckij A. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, bryukhovetskiy@sevsu.ru,

Moiseev D. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, DVMoiseev@sevsu.ru

Abramov T. A.^a, Senior Lecturer, TAAbramov@sevsu.ru

^aSevastopol State University, 33, Universitetskaya St., 299053, Sevastopol, Russian Federation

Purpose: The goal is to develop an intelligent monitoring system for solving large-scale scientific problems in cloud computing environments under the deficiency of a priori information about the state of the environment. **Results:** We have performed a multi-level analysis of the data about the changes in the values of IT-service metrics, and developed a complex of models for classifying information situations. This will allow cloud brokers to support decision-making when choosing the optimal strategy for solving the problems of monitoring. To create an intelligent monitoring system, adaptive approaches were used, assessing the accuracy and variability of the information situations which arise during the cloud environment analysis. The considered monitoring strategies take into account the non-stationary nature of a cloud environment. Therefore, they can be used for proactive analysis of its states. Using small volumes of samples in cloud IT-service evaluation allows you to reduce the complexity of the monitoring. **Practical relevance:** The obtained results can be used for the monitoring of cloud computing environments when solving large-scale scientific problems in the framework of expanded reference NIST architecture focused on the interaction between the triad of cloud actors: consumer – broker – provider.

Keywords — Smart System, Monitoring System, IT Services, Resource Metrics, Adaptive Model, Object Information State, Evaluation Criteria, Observation Heterogeneity.

References

1. Mell P., Grance T. *The NIST Definition of Cloud Computing*. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology, 2010. Available at: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf> (accessed 15 October 2016).
2. Nikitenko D. A., Stefanov K. S. The Study of the Effectiveness of Parallel Programs Based on Monitoring Data. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*, 2012, vol. 13, no. 2, pp. 97–102 (In Russian).
3. Skatkov A. V., Shevchenko V. I. Expansion of the Reference Model of the Cloud Computing Environment in the Concept of Large-Scale Scientific Research. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniia RAN*, 2015, vol. 27, no. 6, pp. 285–306 (In Russian).
4. *Ceilometer Developer Documentation*. Available at: <https://ceilometer.readthedocs.org/en/latest/measurements.html> (accessed 15 October 2016).
5. *Homepage of Zabbix. The Enterprise-class Monitoring Solution for Everyone*. Available at: <http://www.zabbix.com/ru/> (accessed 15 October 2016).
6. Grushin D. A., Kuziurin N. N. Load Balancing in the Unihub System Based on Prediction of user Behavior. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniia RAN*, 2015, vol. 27, no. 5, pp. 23–34 (In Russian).

7. Tsiperman G. N. Stochastic Model of the Process of Identification of Information System Services. *Trudy Instituta sistemnogo programirovaniia RAN*, 2014, vol. 26, no. 5, pp. 7–28 (In Russian).
8. Suznjevic M., Skorin-Kapov L., and Humar I. User Behavior Detection Based on Statistical Traffic Analysis for thin Client Services. *Computer Science and Information Systems*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 587–605. doi: 10.2298/CSIS140810018S
9. Bondur V. G. *Krugi bez granic. Aerokosmicheskii monitoring ob'ektov neftegazovogo kompleksa* [Aerospace Monitoring of Oil and Gas Facilities]. Moscow, Nauchnyi Mir Publ., 2012. 558 p. (In Russian).
10. Ratner I. B., Tolstosheev A. P., Kholod A. L. Establishment of a Black Sea Monitoring Database using Drifting Surface Buoys. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2009, no. 3, pp. 50–69 (In Russian).
11. Lavrova I. B., Kostianoi A. G., Lebedev S. A. *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* [Integrated Satellite Monitoring of the Seas of Russia]. Moscow, IKI RAN Publ., 2011. 480 p. (In Russian).
12. Korotaev G. K., Demyshev S. G., Li M. E. *Sputnikovyi monitoring morskikh akvatorii* [Satellite Monitoring of Marine Areas]. Kiev, Akadempriodika Publ., 2014, pp. 91–100 (In Russian).
13. Balashov I. V., Khalikova O. A. The Organization of Automatic Receipt of Sets of Information Products from the Centers of Archiving and Distribution of Satellite and Meteorological Data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2013, vol. 10, no. 3, pp. 9–20 (In Russian).
14. Matishov G. G., Berdnikov S. V., Zhichkin A. P. *Atlas klimaticheskikh izmenenii v bol'shikh morskikh ekosistemi-makh Severnogo polushariia (1878–2013)* [Atlas of Climatic Changes in Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1878–2013)]. Rostov-na-Donu, IuNTs RAN Publ., 2014. 256 p. (In Russian).
15. Shiriaev A. N. *Veroiatnostno-statisticheskie metody v teorii priniatiia reshenii* [Probabilistic-Statistical Methods in Decision Theory]. Rostov-na-Donu, MTsNMO Publ., 2014. 144 p. (In Russian).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

О СИТУАЦИОННО-СОБЫТИЙНОМ ПОДХОДЕ К УПРАВЛЕНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

В. М. Шпаков^а, канд. техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,
Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: процессы управления зависят от логики и динамики развития процессов в объекте управления и должны отвечать требованиям логики и динамики управления. Задача состоит в спецификации и реализации требуемых зависимостей. При этом предъявляются требования к удобству и выразительности спецификаций и эффективности получаемых на их основе программных реализаций процессов управления. Логико-динамические ситуации, используемые для спецификации гибридных процессов, пока не находят применения для реализации процессов управления. **Цель:** экспериментальное исследование технологии реализации процессов управления, основанной на использовании логико-динамических ситуаций. **Результаты:** разработан метод спецификации процессов управления дискретно-непрерывными процессами, основанный на применении трансформационных правил, условными частями которых являются логико-динамические ситуации. Метод обладает хорошей выразительностью, обеспечивает низкую трудоемкость разработки, прозрачность спецификаций и эффективность компьютерной реализации процессов. Возможности спецификации иллюстрируются на примере разработки компьютерной модели системы автоматического управления позиционированием перевернутого маятника. **Практическая значимость:** использование логико-динамических ситуаций для спецификации процессов управления позволит упростить разработку систем управления дискретно-непрерывными процессами.

Ключевые слова — автоматическое управление, логико-динамические системы, основанное на правилах программирование.

Введение

Функционирование многих современных технических систем определяется совокупностями взаимодействующих дискретно-непрерывных процессов. Наглядное представление о таких системах дают большие промышленные автоматизированные установки, такие, например, как воздухоразделительные установки по производству жидкого азота и сжатого кислорода. Технологический процесс в установке зависит от дискретных состояний клапанов, дросселей, вентилей (открыт-закрыт), компрессоров, насосов, детандеров (включен-выключен) и от состояний непрерывных процессов изменения температур, давлений, концентраций и уровней.

Понятие логико-динамической ситуации используется при логико-динамической спецификации гибридных процессов [1–3]. Дискретно-непрерывный процесс с точки зрения динамики является гибридным процессом, т. е. таким, в котором наряду с непрерывными изменениями состояния происходят дискретно-событийные изменения состояния и (или) динамики процесса. Очевидно, чисто непрерывные и чисто дискретно-событийные процессы являются частными случаями гибридных процессов.

Логико-динамическая спецификация процессов ориентирована на их компьютерную реализацию. Текущее состояние гибридных процессов определяется множеством вещественных пере-

менных состояния X , представляющих непрерывные составляющие, и множеством символьных переменных W , представляющих дискретные составляющие процессов. Среди этих переменных выделяются подмножества независимых внешних символьных воздействий (команд) V и непрерывных вещественных воздействий X_i . В составе множества W выделяются также подмножество Q , содержащее переменные для представления дискретных состояний и режимов процессов, и подмножество предикатов от непрерывных состояний G . Предикаты могут определять состояния дискретных и режимы гибридных процессов. В результате для представления процессов имеем следующие множества переменных:

$$W = V \cup Q \cup G; \quad (1)$$

$$X = X_i \cup X_s, \quad (2)$$

где X_s — множество переменных состояния непрерывных процессов.

Для спецификации процессов необходимо определить функции транзитивных переходов следующих типов:

$\sigma: W \rightarrow Q$ — функция трансформации состояний дискретно-событийных процессов и режимов гибридных процессов;

$\delta: W \times X \rightarrow X_s$ — функция трансформации непрерывных состояний для возможных режимов гибридных процессов;

$\gamma: X \rightarrow G \rightarrow \{False, True\}$ — зависимость значений предикатов от непрерывных состояний процессов.

Спецификация процессов сводится к заданию конкретных способов определения и вычисления указанных выше функций перехода. Эти способы существенным образом влияют на качество спецификации, которое определяется выразительностью, надежностью и удобством реализации процессов.

Поскольку в общем случае мощности множеств значений дискретных состояний могут быть больше двух, то эти состояния должны представляться символическими переменными. Любую символическую переменную всегда можно представить с помощью формулы нескольких логических переменных. Использование логических переменных и формул для представления дискретных состояний позволяет, на наш взгляд, повысить выразительность спецификаций и эффективность получаемых на их основе исполняющих процедур. Будем все элементы множества W представлять логическими переменными. В этом случае функцию перехода σ можно представить в следующем виде:

$$\sigma: W \rightarrow Q \times \{False, True\}. \quad (3)$$

Функция γ является логической по определению, ее реализация связана с вычислением неравенств, например, следующего вида:

$$(x_{j_1} \geq (a_k + x_{j_2})) \wedge (x_{j_3} \leq (b_k + x_{j_4})) \rightarrow g_k, \quad (4)$$

где $x_{j_1}, \dots, x_{j_4} \in X$; $g \in G$; a_k и b_k — некоторые константы.

Функцию перехода σ задают с помощью совокупности продукционных правил вида «Условие \rightarrow Действие» [4, 5]. В качестве условия предлагается использовать элементарные конъюнкции логических переменных, а в качестве действия — присвоение требуемых значений определенным дискретным состояниям и режимам процессов. Такие конъюнкции интуитивно понятным образом могут интерпретироваться как динамические ситуации. В общем случае для формализации процесса могут потребоваться произвольные логические формулы. Поэтому правила между собой должны быть соединены логической связкой \vee (ИЛИ). Это значит, что одно и то же действие может быть произведено при выполнении различных условий, т. е. условия могут образовывать дизъюнкции. Поскольку дизъюнкция элементарных конъюнкций представляет собой дизъюнктивную нормальную форму, то можно утверждать, что таким способом можно в качестве условия действия представить любую логическую формулу. Логико-динамическую

ситуацию можно определить с помощью следующих утверждений:

1) любая логическая переменная (воздействие, состояние, режим, предикат) или ее отрицание является динамической ситуацией;

2) если S_i и S_j — динамические ситуации, то $S_i \wedge S_j$ также является динамической ситуацией;

3) других ситуаций нет.

С учетом этого определение логико-динамической ситуации S_j можно представить в виде

$$S_j = s_{j_1}, \dots, s_{j_i}, \dots, s_{j_n},$$

где $s_{j_i} \in W \times \{False, True\}$; $n = 1 \dots N_w$, $N_w = |W|$.

Таким образом, ситуация представляет собой логическую функцию от логических аргументов. Ситуация имеет значение *True*, если значение каждого из ее аргументов совпадает со значением, указанным в определении ситуации. Если значение хоть одного аргумента отличается от указанного, то ситуация имеет значение *False*.

Представляют интерес две возможные разновидности или два типа правил трансформации ситуаций, различающихся по выразительным возможностям спецификации процессов и по надежности получаемых спецификаций. Условная часть обоих типов правил представляет собой логико-динамическую ситуацию. В исполнительные части правил 1-го типа могут включаться как сами логические состояния, так и их отрицания. Правила этого типа имеют вид

$$S_j \rightarrow q'_{j_1}, \dots, q'_{j_i}, \dots, q'_{j_m}, \quad (5)$$

где $q'_{j_i} \in Q \times \{False, True\}$; $m = 1, \dots, |Q|$.

Если ситуация в условной части такого правила имеет значение *True*, то переменным из исполнительской части присваиваются указанные значения (*True* или *False*). В противном случае значения переменных остаются неизменными.

Правила 2-го типа отличаются тем, что в их исполнительную часть помещаются только те переменные, которым необходимо присвоить значения *True*, т. е. эти правила имеют вид

$$S_j \rightarrow q'_{j_1}, \dots, q'_{j_i}, \dots, q'_{j_m}, \quad (6)$$

где $q'_{j_i} \in Q \times \{True\}$; $m = 1, \dots, |Q|$.

При использовании этих правил исполняющая процедура их сканирует, запоминая идентификаторы переменных, которым в соответствии с ситуациями должны быть присвоены значения *True*, и в конце каждого шага алгоритма обновления состояния присваивает эти значения соответствующим координатам вектора состояния, а всем остальным координатам присваива-

ется значение *False*. В этом случае исключается возможность появления в базе правил противоречивых правил, однако несколько усложняется присваивание переменным значения *False*. При этом оказывается реализованным принцип, в соответствии с которым «отсутствие» трактуется как «отрицание». Наличие в базе правил нескольких правил, присваивающих одной и той же переменной состояния значения *True*, вполне допустимо и может соответствовать реальному поведению системы.

С каждой ситуацией могут быть связаны два события: одно — с возникновением ситуации, второе — с ее исчезновением. Для реализации событий необходимо запоминать предыдущие значения ситуаций. Логические переменные, представляющие события, могут иметь значение *True* только в течение одного шага цикла обновления состояний. Они могут быть использованы в условных частях трансформационных правил только 1-го типа (5). В этом случае эти правила специфицируют новые события. События могут использоваться в условных частях этих правил совместно с ситуациями. Одни и те же события в разных ситуациях могут специфицировать различные новые события. Использование событий повышает выразительные возможности спецификаций, но усложняет их верификацию.

Для задания функции перехода δ необходимо определить алгоритмы вычисления транзитивных отношений между непрерывными состояниями для каждого режима. Предлагается это делать на основе использования передаточных функций элементарных динамических звеньев, функциональных преобразователей и структурных схем их соединения [6]. В этом случае формализация знаний о произвольных непрерывных процессах может быть проведена с помощью алгоритмов вычисления транзитивных отношений для элементарных динамических звеньев. К таким звеньям относятся интеграторы, апериодические, колебательные и дифференцирующие звенья, а также звенья чистого запаздывания [7].

При рассмотрении транзитивных моделей процессов используется соглашение о том, что именем переменной со штрихом обозначается состояние процесса, непосредственно следующее за состоянием, обозначенным этим же именем без штриха. В случае свободного одномерного непрерывного процесса отношение следования, или транзитивное отношение (transitive dependence), представляет собой бинарное отношение на множестве вещественных чисел вида $\tau(y, y')$ или $y' = \tau(y)$, где y — текущее состояние процесса, а y' — следующее состояние процесса. Транзитивное отношение τ определяется параметрами элементарного динамического звена и длительностью интервала времени Δt между y и y' .

В случае вынужденного процесса оно также зависит от внешнего воздействия x . Для задания зависимости непрерывных состояний от логики развития гибридного процесса алгоритмы вычисления этих отношений включаются в исполнительные части правил, условными частями которых являются требуемые значения соответствующих режимов. В принятых обозначениях эти правила имеют вид

$$S_j \rightarrow x'_k = \tau_k(x_k, x), x_k \in X_s, x \in X, \quad (7)$$

где S_j — ситуация, определяющая режим; τ_k и x_k — отношение и состояние соответственно; x — произвольная переменная процесса. В условных частях правил (7) могут также использоваться события, специфицированные правилами (5). Такие правила позволяют специфицировать дискретные изменения состояний гибридных процессов.

Таким образом, знания о развитии процессов могут быть формализованы путем спецификации множеств логических и вещественных состояний (1), (2) и формирования совокупности трансформационных правил (4)–(7).

О реализации ситуационно-событийного подхода к спецификации взаимодействующих процессов различной динамики

Компьютерная реализация процессов, специфицированных трансформационными правилами (4)–(7), производится путем использования интерпретатора этих правил. Интерпретатор представляет собой программный продукт, который может быть легко реализован с помощью компьютерных средств, использующих алгоритмические языки программирования, например Delphi. Архитектура и алгоритмы функционирования интерпретатора достаточно просты. Множества переменных состояния процессов (X и W) в интерпретаторе представляются массивами записей, каждая из которых содержит имя переменной и ее значение. Все правила реализуются с помощью условных операторов «if...then...». Обе части оператора содержат записи об использованных в данном правиле переменных. Основу интерпретатора составляет исполняющая процедура, которая в цикле сканирует списки правил. Алгоритм обработки правил вычисляет значение условной части правила. В случае правила (5), (6) если это значение равно *True*, то запускается процедура выполнения исполнительной части правила, которая логическим переменным из этой части правила присваивает указанные значения. При этом, естественно, могут измениться значения ситуаций, в определения которых эти пере-

менные входят. В случае правила (7) процедура, указанная в исполнительной части правила, запускается, если значение ситуации или события соответствует значению, указанному в условной части. Эта процедура вычисляет новое значение состояния непрерывного процесса и присваивает его соответствующей переменной.

На каждом шаге цикла обновления состояний процессов производится продвижение времени на интервал Δt . Возможны два режима продвижения времени. В режиме реального времени измеряется длительность каждого цикла, и время увеличивается на измеренное значение. В этом случае быстроедействие соответствует реальным процессам, а точность зависит от производительности компьютера и размерности модели. В режиме модельного времени время продвигается после каждого цикла на заданную пользователем величину. При этом точность определяется величиной заданного приращения времени, а быстроедействие зависит от производительности компьютера и размерности модели. Использование современных персональных компьютеров для реализации моделей, содержащих тысячу правил, позволяет обеспечить величину приращения реального времени, не превышающую нескольких десятков микросекунд, что обеспечивает точность, приемлемую для большинства приложений.

Экспериментальные исследования описываемой технологии проводятся в СПИИРАН с помощью разработанного исследовательского прототипа компьютерной среды EnviCon [8], реализующей описываемый подход. Среда имеет достаточно наглядный интерфейс представления трансформационных правил и средства визуализации процессов. Рассматриваемые ниже примеры спецификации процессов будут представлены в форматах редакторов этой среды. Технологию использования логико-событийного подхода покажем на примере моделирования автоматической системы позиционирования перевернутого маятника.

Модель позиционирования перевернутого маятника

Маятник представляет собой груз массы m_1 , находящийся на одном конце жесткого невесомого подвеса длины L . Второй конец подвеса укреплен на шарнире, установленном в центре масс тележки, имеющей массу m_2 . Тележка может двигаться по прямой линии в горизонтальной плоскости. Управление состоянием маятника производится с помощью управляющего воздействия в виде силы, прилагаемой к тележке в том или другом направлении. В исходном состоянии маятник находится в покое. Угол отклонения подвеса от вертикали $\varphi = 0$. Задача состоит в том,

чтобы раскачать маятник до амплитуд, близких к 180° , после чего перейти в режим стабилизации перевернутого маятника. Вторая задача управления состоит в перемещении тележки с перевернутым маятником из исходной позиции x_0 в заданную целевую позицию $x_{ц}$. Таким образом, необходимо реализовать два режима работы системы: режим раскачивания маятника и режим стабилизации перевернутого маятника и управление положением тележки.

Рассмотрим использование ситуационно-событийного подхода для спецификации комплекса, состоящего из модели маятника на тележке (объекта управления) и модели контроллера, реализующего указанную задачу управления. Логико-динамическая спецификация процессов формируется на основании физической модели процессов. На рис. 1 представлена функциональная схема маятника на тележке.

При отклонении подвеса от вертикали в системе возникают незатухающие колебания. Нас будут интересовать процесс изменения угла отклонения подвеса от вертикали φ и процесс изменения координаты центра тяжести тележки x_m . Изменения угла происходят вследствие перемещения как груза, так и тележки. Пусть в начальном положении $\varphi = \varphi_0$ и $x_m = 0$. Значения ускорения и скорости груза, и ускорения и скорости тележки, а также значение времени равны нулю. Для спецификации возникающих процессов необходимо на основании начальных значений выполнить следующую последовательность вычислений.

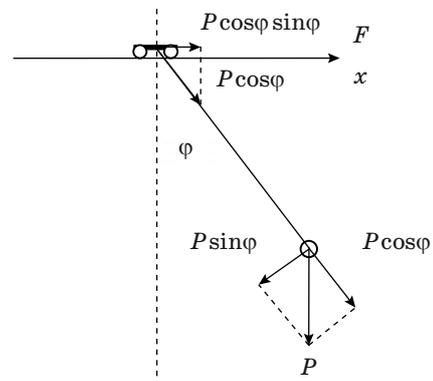
$$\text{Ускорение груза } a_1 = g \sin \varphi;$$

$$\text{скорость груза } V_1' = V_1 + \int_t^{t+\Delta t} a_1 dt;$$

$$\text{угловая скорость от перемещения груза } \omega_1 = V_1/L;$$

$$\text{ускорение тележки } a_2 = (P \cos \varphi \sin \varphi)/m_2;$$

$$\text{скорость тележки } V_2' = V_2 + \int_t^{t+\Delta t} a_2 dt;$$



■ Рис. 1. Маятник на тележке

новое значение координаты тележки

$$x'_m = x + \int_t^{t+\Delta t} V_2 dt;$$
 угловая скорость от перемещения тележки
 $\omega_2 = (V_2/L)\cos\varphi;$
 суммарная угловая скорость $\omega = \omega_1 + \omega_2;$
 новое значение угла $\varphi' = \varphi + \int_t^{t+\Delta t} \omega dt.$

Далее вычисления повторяются для новых значений состояний процессов на каждом обороте цикла обновления состояний процессов. Приведенная совокупность математических зависимостей представляет собой физическую модель данной динамической системы. Поскольку эта совокупность не содержит логических зависимостей, она может быть специфицирована совокупностью только правил (7), в которых в качестве условия использована логическая константа *EverTrue*, равная *True*. Исполнительные части правил практически однозначно соответствуют приведенным вычислениям. На рис. 2 (редактор правил) показана совокупность этих правил, представленных в формате редактора правил среды EnviCon. Выходными переменными модели являются *fi угол* и *X тележки*.

Валидацию этой модели можно произвести путем измерения периода колебаний, возникающих в системе при отклонении груза на небольшой угол. Расчетное значение периода $T = 2\pi\sqrt{\frac{Lm_2}{g(m_1+m_2)}} = 1,4187$, а полученное при моделировании $T = 1,4190$. При моделировании устанавливались начальное значение $\varphi_0 = 1^\circ$ и дискрет продвижения времени $\Delta t = 0,00001$ с.

Рассмотрим модель контроллера. Логическую переменную для представления режима раскачивания маятника назовем *Раскачивание*, а пе-

ременную для стабилизации и управления — *Управление*. В исходном состоянии *Раскачивание = True*, а *Управление = False*. Входными переменными для модели контроллера являются угол φ и координата тележки X_m . Выходной переменной контроллера является управляющее воздействие *Управ. возд.*

Раскачивание производится путем приложения к тележке постоянной силы F в положительном или отрицательном направлении. Сила определяет возникновение ускорения и скорости в определенном направлении. Скорость тележки V_2 определяет возникновение дополнительной угловой скорости маятника $\omega_2 = -(V_2/L)\cos\varphi$. Для того чтобы происходило увеличение угловой скорости, необходимо, чтобы знак дополнительной угловой скорости совпадал со знаком текущей угловой скорости маятника ω_1 . С учетом этого и того, что раскачивание наиболее эффективно происходит при малых углах, примем следующий алгоритм раскачивания. В ситуации, когда угловая скорость положительна и угол находится в диапазоне от -45° до $+45^\circ$, прикладываем силу F в отрицательном направлении (имя ситуации *сила F справа*), а в положительном направлении прикладываем силу (имя ситуации *сила F слева*), когда угол находится в том же диапазоне, но угловая скорость отрицательна. Когда угол выходит за пределы указанного диапазона, имеет смысл тормозить движение тележки, формируя управляющее воздействие в виде силы, пропорциональной скорости и направленной против нее. Логической переменной, представляющей эту ситуацию, присвоим идентификатор *Торможение*. Таким образом, для спецификации процесса раскачивания маятника необходимо определять величину угловой скорости маятника ω и величину скорости тележки V_m . На рис. 3 приведены три правила (6), специфицирующие

Редактор правил трансформации непрерывных состояний, Объект

Исх. ПМ вых. **Логические** Возд. Входы Состояния Предикаты ПМ сост. из модели Объект

№	Переменная	Процедура	Кэф.циент	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация / событие	имя параметра	значение
1	sin fi	Синус	1.00	fi угол		Ever True		
2	cos fi	Косинус	1.00	fi угол		Ever True		
3	a1 ускор. груза	Умножение	-1.00	g ускор. св. пад.	sin fi	Ever True		
4	V1 скорость груза	Интеграл	1.00	a1 ускор. груза		Ever True		
5	Om1 угл. скор. гр	Деление	57.2958	V1 скорость груза	L длина подвеса	Ever True		
6	P cos fi	Умножение	1.00	P вес	cos fi	Ever True		
7	P cos fi sin fi	Умножение	1.00	P cos fi	sin fi	Ever True		
8	a2 ускор. тел.	Деление	1.00	P cos fi sin fi	m2 масса тел.	Ever True		
9	V2 скорость тел.	Интеграл	1.00	a2 ускор. тел.		Ever True		
10	X тележки	Интеграл	1.00	V2 скорость тел.		Ever True		
11	V2 / L	Деление	1.00	V2 скорость тел.	L длина подвеса	Ever True		
12	Om2 угл. скор. тел	Умножение	-57.2958	V2 / L	cos fi	Ever True		
13	Om угл. скор. сум.	Сумма / разность	1.00	Om1 угл. скор. гр	Om2 угл. скор. тел	Ever True	2-ой коэффициент	1.00
14	fi угол	Интеграл	1.00	Om угл. скор. сум.		Ever True		

■ Рис. 2. Правила спецификации модели маятника на тележке

логику режима раскачивания маятника. В правилах имя переменной, значение которой равно *False*, представлено на черном фоне. При этом необходимо, конечно, с помощью правил (4) специфицировать предикаты $\Omega > 0$ и $-45 < \varphi < 45$.

Для переключения в режим *Управление* используем события, связанные с возникновением ситуаций, определяемых предикатами $\varphi > 160$ и $\varphi < -160$. В данном случае необходимо применять правила (5), допускающие использование событий и непосредственное присваивание ситуациям значения *False*. Эти два правила представлены в редакторе правил (рис. 4).

Входными переменными контроллера в режиме *Управление* являются выходные переменные объекта управления: угол φ и координата тележки x_m . Выходной переменной контроллера является управляющее воздействие *Упр. возд.* Управляющее воздействие используется как для стабилизации перевернутого маятника, так и для перемещения тележки в целевую позицию.

Исходн.	Сорт. "If"	Сорт. "then"
0. If	Раскачивание	$\Omega > 0$
then	Сила F справа	$-45 < \varphi < 45$
1. If	Раскачивание	$\Omega > 0$
then	Сила F слева	$-45 < \varphi < 45$
2. If	Раскачивание	$-45 < \varphi < 45$
then	Торможение	

■ Рис. 3. Правила спецификации логики раскачивания маятника

Исходн.	Сорт. "If"	Сорт. "then"
0. If	$\varphi > 160$	
then	Управление	Раскачивание
1. If	$\varphi < -160$	
then	Управление	Раскачивание

■ Рис. 4. Правила переключения режимов управления маятником

Исходными данными для формирования управляющего воздействия являются отклонение угла от 180 (-180) градусов $\Delta \varphi$ и отклонение тележки от целевой координаты $\Delta x_{мел}$. Поскольку к вертикальному положению маятник может подходить как со стороны положительных углов, так и со стороны отрицательных углов, то для вычисления $\Delta \varphi$ необходимо использовать два правила: одно для $\varphi > 0$ и другое для $\varphi < 0$. В данном случае процесс управления должен иметь две составляющие: одну для стабилизации угла и другую для перемещения тележки в целевую позицию. Для уменьшения негативного влияния этих составляющих друг на друга целесообразно разнести эти процессы по быстродействию. Поскольку управление тележкой допускает меньшее быстродействие, то в алгоритм его формирования введем инерционное (апериодическое) звено с постоянной времени $T = 0,050$ с. Для формирования обеих составляющих управления будем использовать правила, исполнительные части которых содержат процедуры, реализующие пропорционально интегрально дифференциальные (ПИД) законы управления. В результате для спецификации контроллера получаем совокупность правил (7) (рис. 5).

Первые два правила специфицируют процессы реальных дифференцирующих звеньев. Они на основании входных переменных формируют процессы изменения угловой скорости маятника и скорости движения тележки. Угловая скорость нужна для формирования ситуаций, используемых в режиме *Раскачивание*. Скорость тележки используется в правиле 5 для формирования управляющего воздействия в ситуации *Торможение*. Следующие три правила формируют управляющие воздействия в ситуациях, имеющих место в режиме *Раскачивание*. Правила 6 и 7 вычисляют отклонение угла от вертикали для положительных и отрицательных значений угла. Правила 9 и 12 специфицируют процессы управления, соответствующие ПИД-законам

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация / событие	имя параметра	значение	имя параметра	значение
1	Ω угл. скор.	Производная,Сгл.	1.00	угол φ		Ever True	Пост. времени	0.0001		
2	V_t скор. тел.	Производная,Сгл.	1.00	X тележки		Ever True	Пост. времени	0.001		
3	Упр. возд.	Пропорциональная	-1.00	F const		Сила F справа				
4	Упр. возд.	Пропорциональная	1.00	F const		Сила F слева				
5	Упр. возд.	Пропорциональная	-50.00	V_t скор. тел.		Торможение				
6	$\Delta \varphi$ fi	Сумма / разность	1.00	180 const	угол φ	$\varphi > 0$	2-ой коэффициент	-1.00		
7	$\Delta \varphi$ fi	Сумма / разность	-1.00	180 const	угол φ	$\varphi > 0$	2-ой коэффициент	1.00		
8	$\Delta \varphi$ fi сгл.	Апериодическая	1.00	$\Delta \varphi$ fi		Управление	Пост. времени	0.0001		
9	Управление φ	ПИД	5.00	$\Delta \varphi$ fi сгл.		Управление	Интеграл. коэф.	0.00	Дифф. коэф.	2.20
10	Δx тел.	Сумма / разность	1.00	X тележки	X цели	Управление	2-ой коэффициент	-1.00		
11	Δx сглаж.	Апериодическая	1.00	Δx тел.		Управление	Пост. времени	0.050		
12	Управление X тел.	ПИД	20.00	Δx сглаж.		Управление	Интеграл. коэф.	0.00	Дифф. коэф.	40.00
13	Упр. возд.	Сумма / разность	1.00	Управление φ	Управление X тел.	Управление	2-ой коэффициент	1.00		

■ Рис. 5. Правила спецификации процессов управления

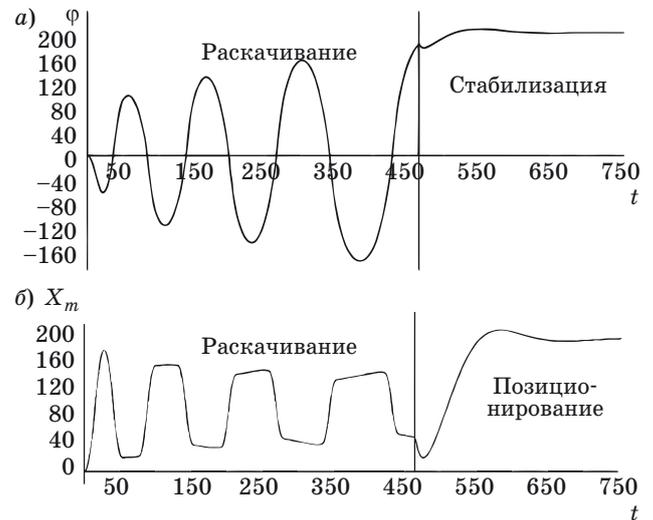
F управления	Насыщение	1.00	Управл. возд.		Ever True
F сумм.	Сумма / разность	1.00	F управления	$P \cos \varphi_i \sin \varphi_i$	Ever True
a2 ускор. тел.	Деление	1.00	F сумм.	m2 масса тел.	Ever True

■ Рис. 6. Правила, специфицирующие взаимодействие объекта с контроллером

управления. Их параметрами являются пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты передачи. Правило 8 сглаживает процесс изменения отклонения по углу. Дело в том, что в правилах, специфицирующих ПИД-управление, использованы идеальные дифференцирующие звенья. Поскольку в компьютере непрерывные процессы представляются ступенчатыми процессами, то эти звенья могут выдавать очень большие пиковые значения, которые даже могут вызывать остановку компьютера. Правила 10 и 11 формируют сглаженное отклонение тележки от целевой позиции. Правило 13 формирует выходное значение управляющего воздействия *Упр. возд.*, представляющего сумму управлений по углу и по положению тележки. Переменная модели контроллера *Упр. возд.* является (соединена с) входной переменной модели маятника *Управл. возд.* Управляющее воздействие контроллера преобразуется исполнительным устройством объекта в силу (переменная *F управления*), приложенную к тележке. Эта сила складывается с силой $P \cos \varphi \sin \varphi$, действующей на тележку со стороны груза. Сила, создаваемая исполнительным устройством, пропорциональна управляющему воздействию, но ограничена по величине.

Для спецификации взаимодействия контроллера с объектом модель последнего должна быть расширена. В нее необходимо добавить правило, специфицирующее исполнительное устройство, и правило, суммирующее действующие на тележку силы. Кроме того, необходимо изменить правило 8 (см. рис. 2), вычисляющее ускорение тележки. Дополнительные правила и измененное правило представлены на рис. 6.

Проведенное моделирование подтвердило работоспособность описанных моделей. В ходе моделирования путем изменения параметров алгоритма раскачивания маятника менялась длительность процесса раскачивания. Путем вариации коэффициентов в правилах ПИД-регулирования менялось качество процессов стабилизации перевернутого маятника и позиционирования тележки. На рис. 7, а представлена графическая визуализация процессов среды EnviCon — график изменения угла маятника в режимах раскачивания маятника и стабилизации перевернутого маятника. На рис. 7, б приведен график изменения положения тележки в режиме раскачивания и в режиме позиционирования.



■ Рис. 7. График процесса изменения угла маятника (а) и положения тележки (б)

Графики получены при значениях параметров, представленных в вышеприведенных правилах. Масштабный коэффициент по времени равен 50, масштаб по углу равен 1, а по координате тележки — 100.

Заключение

Достоинством рассмотренного подхода является возможность достаточно естественно и наглядно специфицировать взаимовлияние дискретных и непрерывных составляющих процессов друг на друга. Это достигается за счет использования в условных частях правил трансформации состояний процессов логико-динамических ситуаций, которые определяются как значениями дискретных состояний, так и предикатами от непрерывных состояний. Наглядность, в частности, обеспечивается использованием логических переменных. Совокупности условных частей правил позволяют формировать дизъюнкции элементарных конъюнкций логических переменных и таким образом специфицировать широкий класс логических функций, описывающих процессы трансформации ситуаций.

Вторым достоинством является то, что трансформационные правила (7) позволяют специфицировать сложные непрерывные процессы в виде схем произвольных соединений элементарных

процессов и различных, в том числе нелинейных, функциональных преобразователей.

Спецификация дискретно-непрерывных процессов с помощью баз трансформационных правил может выполняться непосредственно специ-

алистами в прикладных и проблемных областях, вместе с тем она является пригодной для непосредственной компьютерной реализации процессов.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы № 0073-2014-0005 плана НИР СПИИРАН.

Литература

1. Шпаков В. М. Компьютерная реализация процессов. — Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2016. — 252 с.
2. Шпаков В. М. Компьютерная реализация процессов на основе их логико-динамической спецификации // Информационно-управляющие системы. 2016. № 4. С. 68–76. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.68
3. Alur R., Henzinger T. A., Lafferriere G., Pappas G. J. Discrete Abstractions of Hybrid Systems // Proc. of the IEEE 88. 2000. P. 971–984.
4. Lacoste-Julien S. Hybrid Systems Modeling // Technical Report. McGill University, School of Computer Science. Aug. 2002. <http://msdl.cs.mcgill.ca/people/slacoste/research/report/SummerReport.html> (дата обращения: 30.06.2016).
5. Brownston L., Farrell R., Kant E., Martin N. Programming Expert Systems in OPS5: An Introduction to Rule-Based Programming: Addison-Wesley Series in Artificial Intelligence. — Addison-Wesley, 1985. — 471 p.
6. Howe R. M. Analog Computer Fundamentals // IEEE Contr. Syst. Mag. 2005. Vol. 25. N 3. P. 29–36.
7. Шпаков В. М. Спецификация знаний динамики на основе транзитивной модели непрерывных процессов // Тр. СПИИРАН / под ред. Р. М. Юсупова. СПб.: Наука, 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 191–197.
8. Шпаков В. М. Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов // Имитационное моделирование. Теория и практика: сб. докл. Второй Всерос. конф., Санкт-Петербург, 19–21 октября 2005 г. Т. II. С. 292–295.

UDC 681.5.017

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.26

About Situation-Event Approach to Control of Interacting Discrete-Continuous Processes

Shpakov V. M.^a, PhD, Tech. Associate Professor, vlad@iias.spb.su

^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Control processes depend on the logics and dynamics of the processes in the controlled object, and must meet the requirements of the control logics and dynamics. The challenge is the specification and implementation of the required dependencies. There are certain requirements to the convenience and expressiveness of the specifications and to the efficiency of the control processes obtained on the basis of their software implementations. Logic-dynamic situations used for the specification of hybrid processes are not yet widely used for the implementation of control processes. **Purpose:** Experimental research of technology of control process implementation based on using logic-dynamic situations. **Results:** We have developed a method for the specification of control over discrete-continuous processes based on transformation rules whose conditional parts are logic-dynamic situations. The method has a good expressiveness, providing low cost of the development, transparent specifications and effective computer implementation of the processes. Specification features are illustrated by an example of developing a computer model for a system of automatic control over inverted pendulum positioning. **Practical relevance:** The usage of logic-dynamic situations for control process specification will facilitate the development of control systems for discrete-continuous processes.

Keywords — Automatic Control, Logic-dynamic Systems, Rules-based Programming.

References

1. Shpakov V. M. *Komp'yuternaya realizatsiya protsessov* [Computer Processes Implementation]. Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, 2016. 252 p. (In Russian).
2. Shpakov V. M. Computer Implementation of Processes on the Base of their Logic-Dynamic Specification. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 4, pp. 68–76 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.68
3. Alur R., Henzinger T. A., Lafferriere G., Pappas G. J. Discrete Abstractions of Hybrid Systems. *Proc. of the IEEE* 88, 2000, pp. 971–984.
4. Lacoste-Julien S. *Hybrid Systems Modeling*. Technical Report. McGill University, School of Computer Science, August 2002. Available at: <http://msdl.cs.mcgill.ca/people/slacoste/research/report/SummerReport.html> (accessed 14 December 2016).
5. Brownston L., Farrell R., Kant E., Martin N. *Programming Expert Systems in OPS5: An Introduction to Rule-Based Programming*. Addison-Wesley Series in Artificial Intelligence. Addison-Wesley, 1985. 471 p.
6. Howe R. M. Analog Computer Fundamentals. *IEEE Contr. Syst. Mag.*, 2005, vol. 25, no. 3, pp. 29–36.
7. Shpakov V. M. Dynamic Knowledge Specification Based on Transitive Model of Continuous Processes. *Trudy SPIIRAN*, 2006, iss. 1, vol. 3, pp. 191–197 (In Russian).
8. Shpakov V. M. An Environment Prototype for Modeling of Structured Sets of Cooperating Processes. *Sbornik dokladov Vtoroi Vserossiiskoi konferentsii "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriia i praktika"* [Proc. 2nd All-Russian Conference "Simulation. Theory and Practice"], Saint-Petersburg, 2005, vol. 2, pp. 292–295 (In Russian).

УДК 629.78

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.34

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ УРОВНЯ АВТОНОМНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Г. Н. Мальцев^а, доктор техн. наук, профессор

В. Л. Якимов^а, канд. техн. наук, доцент

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Цель: проанализировать и систематизировать современные подходы к классификации сложных беспилотных систем по уровню автономности функционирования, ввести конструктивный показатель уровня автономности и построить единую классификацию космических аппаратов по уровню автономности. **Результаты:** проведены анализ подходов к оценке уровня автономности сложных беспилотных систем и адаптация рассмотренных схем классификации для космических аппаратов. На основе анализа статистических данных получено выражение, аппроксимирующее зависимость уровня автономности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли от пропускной способности каналов управления и передачи специальной информации, длительности сеансов управления и интервала автономного функционирования. Показано влияние возможностей бортовых и наземных средств диагностирования технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на уровень их автономности. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при оценивании системных показателей космических аппаратов различного назначения и обосновании путей обеспечения заданного уровня надежности функционирования космических аппаратов с высоким уровнем автономности на основе выбора периодичности проведения сеансов управления и диагностирования технического состояния бортовой аппаратуры.

Ключевые слова — автономность, космический аппарат, диагностирование, техническое состояние.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется повышению уровня автономности функционирования сложных технических систем различного назначения: наземных робототехнических комплексов, беспилотных летательных и подводных аппаратов, а также космических аппаратов (КА) [1–4]. Автономность характеризуется различными уровнями и зависит от сложности решаемых задач, влияния внешних факторов и возможностей автономного управления функционированием анализируемой технической системы. Для КА уровень автономности функционирования является одним из системных показателей. Он зависит от возможностей бортового комплекса управления (БКУ) КА, и обеспечение высоко-го уровня автономности КА напрямую связано с эффективностью решения целевых задач и снижением расхода ресурсов на проведение сеансов управления КА средствами наземного комплекса управления (НКУ) [2]. Кроме того, автономность функционирования беспилотных средств, к которым могут быть отнесены КА, рассматривается в настоящее время в контексте соотношения между объемом передаваемых на них управляющих воздействий и объемом поступающей от них специальной (целевой) информации. Так, для КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) такой информацией являются данные наблюдения (дистанционного зондирования) в различных спектральных диапазонах, для переда-

чи которых с КА требуются высокоскоростные радиоканалы, пропускная способность которых значительно превышает пропускную способность радиоканалов управления КА [5].

Повышение автономности КА может быть реализовано за счет увеличения времени его автономного функционирования, в течение которого управление бортовой аппаратурой КА осуществляет БКУ без взаимодействия с НКУ. При этом условием увеличения времени автономного функционирования КА является повышение надежности и отказоустойчивости бортовой аппаратуры КА, в том числе на основе совершенствования средств диагностирования технического состояния бортовой аппаратуры и восстановления ее работоспособности [6, 7]. В то же время можно говорить о сложности понятия автономности КА и отсутствии единых подходов к оценке ее уровня. Проведенный анализ показал, что в отечественных источниках вопросы оценивания уровня автономности КА рассматриваются, в основном, применительно к определенным типам КА, в частности к КА ДЗЗ [8]. В этих условиях в качестве первого шага к построению единой классификации КА по уровню автономности может рассматриваться представленная в настоящей статье адаптация существующих классификационных схем и формульных выражений, используемых зарубежными организациями ракетно-космической отрасли для определения автономности сложных беспилотных систем [9, 10].

Анализ подходов к вопросу классификации беспилотных систем по уровню автономности и их адаптация для автоматических КА

Применительно к автоматическим КА понятие автономности можно сформулировать как способность КА и его БКУ к самостоятельному функционированию и выполнению полетных операций без информационного взаимодействия с НКУ [7]. Автономность характеризуется различными уровнями и зависит от сложности решаемых задач, влияния внешних факторов и возможностей БКУ. Простейшее определение уровня автономности КА основано на определении доли операций управления КА, выполняемых БКУ, от общего числа операций управления КА, выполняемых НКУ и БКУ.

В связи с тем, что в отечественных источниках вопросы оценивания уровня автономности КА рассматриваются, в основном, применительно к определенным типам КА, проанализируем подходы к вопросу классификации уровней автономности сложных беспилотных систем, используемые зарубежными организациями ракетно-космической отрасли. В качестве наиболее интересных можно выделить классификации Шеридана, NASA (National Aeronautics and Space Administration) и Министерства обороны (МО США [9, 10].

В классификации Шеридана имеется 10 уровней автономности в системе «оператор — компьютер», соответствующих различной степени участия человека-оператора в принятии решения при управлении сложной беспилотной системой. Адаптированная версия классификации

Шеридана для управления автоматическими КА средствами НКУ и БКУ приведена в табл. 1.

В классификации NASA имеется шесть уровней автономности беспилотных систем, для каждого уровня приводится доля в процентах участия внешнего оператора в управлении беспилотной системой [9]. Адаптированная версия классификации NASA для управления автоматическими КА средствами НКУ и БКУ приведена в табл. 2.

В классификации МО США имеется 10 уровней автономности, характеризующих способность беспилотных систем самостоятельно выполнять полетные операции и целевые задачи тактического и стратегического уровня. Адаптированная версия классификации МО США для управления автоматическими КА средствами НКУ и БКУ приведена в табл. 3.

За последние десятилетия наблюдается экспоненциальный рост уровня автономности аэрокосмических объектов, что совпадает по времени с появлением за рубежом новых программ в рамках создания автономных беспилотных аэрокосмических систем: DS-1, EO-1, Cassini, ISHM, X-45, Mars Exploration Rovers, Spirit, Opportunity и др. [9].

Следует отметить направление создания автономных КА, предназначенных для инспекции различных космических объектов: XSS-10, XSS-11, SBSS (США), BX-1 и «Шицзянь-12» (Китай), PRISMA (Швеция), SNAP-1 (Великобритания), — а также проекты малых КА, обслуживающих другие, более крупные КА: AERCam Sprint, Mini AERCam, X-Mir-Inspector, Orbital Express. Значительный интерес также представляют текущие и планируемые проекты в области повышения автономности аэрокосмических летательных аппаратов одной из ведущих научно-иссле-

■ **Таблица 1.** Уровни автономности КА согласно классификации Шеридана

Уровень автономности	Характеристика уровня автономности
1	Управление КА полностью осуществляется оператором средства НКУ
2	БКУ предлагает оператору средства НКУ набор альтернатив действий на принятие решения
3	БКУ сужает выбор оператора средства НКУ до нескольких альтернатив
4	БКУ предлагает оператору средства НКУ единственное решение
5	БКУ реализует единственное решение, получив подтверждение на выполнение операций от оператора средства НКУ
6	БКУ предоставляет оператору средства НКУ ограниченное время на принятие решения перед автоматическим выполнением операций
7	БКУ действует автоматически, при этом обязательно информирует оператора средства НКУ о выполнении операций
8	БКУ действует автоматически и по запросу оператора средства НКУ информирует его о выполнении операций
9	БКУ действует автоматически и информирует оператора средства НКУ, если считает нужным, после выполнения операций
10	БКУ самостоятельно принимает решение по управлению КА

■ Таблица 2. Уровни автономности КА согласно классификации NASA

Уровень автономности	Характеристика уровня автономности	Доля участия оператора НКУ, %
0	Дистанционное управление всеми полетными операциями КА средствами НКУ	100
1	Автономное управление БКУ отдельными полетными операциями КА под наблюдением операторов средств НКУ	80
2	Автономное управление БКУ основными полетными операциями КА на основе программы управления, переданной на КА средствами НКУ	50
3	Автономное управление БКУ большинством полетных операций КА, включая оценку ситуации и принятие решения по управлению КА, на основе полетного задания, переданного на КА средствами НКУ	20
4	Полностью автономное управление БКУ полетными операциями КА, включая оценку ситуации, планирование выполнения полетных операций и принятие комплексного решения по управлению КА, на основе исходных данных, переданных на КА средствами НКУ	5
5	Совместное функционирование в составе орбитальной системы нескольких автономных КА без информационного взаимодействия с НКУ	0

■ Таблица 3. Уровни автономности КА согласно классификации МО США

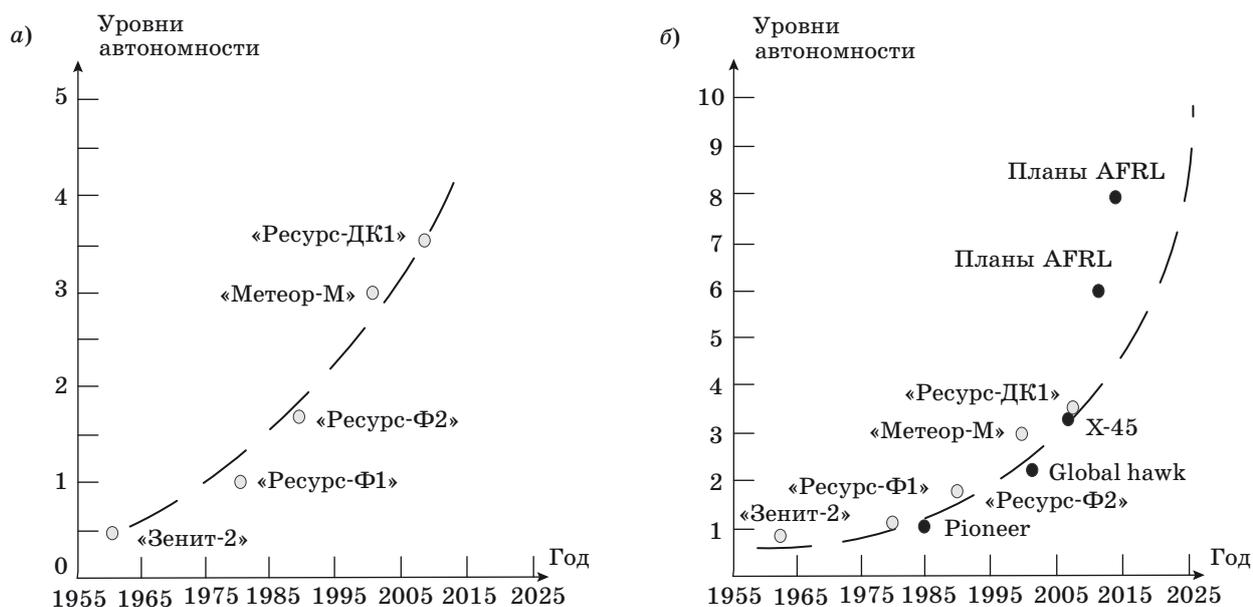
Уровень автономности	Характеристика уровня автономности
1	Дистанционное управление всеми полетными операциями КА средствами НКУ
2	Автономное управление БКУ отдельными полетными операциями КА под наблюдением операторов средств НКУ, в том числе автономное диагностирование и восстановление работоспособности бортовой аппаратуры
3	Возможность адаптации БКУ к сбоям и состоянию бортовой аппаратуры при выполнении КА целевых задач по предназначению
4	Возможность БКУ к самостоятельному планированию маршрута КА и выполнению основных полетных операций
5	Самостоятельная координация БКУ действий группы КА
6	Самостоятельное тактическое планирование БКУ действий группы КА
7	Наличие у группы КА тактических целей, достигаемых при управлении БКУ
8	Распределенное управление БКУ между автономными КА
9	Наличие у группы КА стратегических целей, достигаемых при управлении БКУ
10	Полностью автономная группировка КА, управляемых БКУ

довательских организаций США — Air Force Research Laboratory (AFRL). В большинстве указанных проектов вопросам совершенствования БКУ и системы диагностирования технического состояния КА, обеспечивающей восстановление работоспособности бортовой аппаратуры КА в процессе автономного управления, уделяется первоочередное внимание.

Стремление повысить автономность КА характерно и для отечественных разработчиков космических средств. При этом распределение задач управления между БКУ и НКУ отечественных КА изменилось в пользу БКУ с 20 % в 70-е годы до 90 % в настоящее время [5]. Аналогичным образом изменилась и доля задач контроля технического состояния и диагностирования бортовой

аппаратуры КА, решаемых бортовыми средствами: если в 60-е годы все решения о техническом состоянии и восстановлении работоспособности КА при возникновении нештатных ситуаций на борту КА принимались в НКУ, то в настоящее время, по мнению разработчиков перспективных КА ДЗЗ, до 90 % таких нештатных ситуаций могут отрабатываться с использованием возможностей БКУ [6].

На рис. 1 представлены сводные данные по зарубежным и отечественным проектам последних десятилетий автоматических КА, полученные на основе источников [5, 9], с определением их уровня автономности по классификации NASA (рис. 1, а) и МО США (рис. 1, б) в соответствии с табл. 2 и 3. Планируемые проекты AFRL обо-



■ Рис. 1. Уровни автономности некоторых зарубежных и отечественных аэрокосмических средств: а — по классификации NASA; б — по классификации МО США

значены как «Планы AFRL», по классификации МО США они характеризуются наиболее высоким уровнем автономности. Из отечественных проектов наиболее высокий уровень по классификациям NASA и МО США имеет КА «Ресурс-ДК1».

Следует отметить, что, несмотря на возросшую роль средств самодиагностирования и самовосстановления автоматических КА при обеспечении отказоустойчивости бортовой аппаратуры, важность решения задачи диагностирования бортовой аппаратуры с использованием средств НКУ, составляющих наземный сегмент системы информационно-телеметрического обеспечения (СИТО), не только не снизилась, а наоборот — повысилась. Это приводит к необходимости разработки адекватного алгоритмического аппарата, позволяющего реализовать планово-периодический углубленный анализ технического состояния бортовой аппаратуры с учетом особенностей КА с высоким уровнем автономности [7].

Помимо классификаций, представленных в табл. 1–3, для оценки уровня автономности беспилотных систем используются различные аналитические математические выражения [10]. Так, в работах [9, 10] предлагается определение уровня автономности A беспилотной системы, исходя из соотношения между объемом передаваемых на нее управляющих воздействий и объемом поступающей от нее специальной (целевой) информации в соответствии с выражением

$$A = C_n \left(\frac{n_y}{N} \right)^{-i} \left(\frac{t_y}{T_A} \right)^{-j}, \quad (1)$$

где n_y — количество информации, используемой для управления беспилотной системой внешними средствами управления в ходе выполнения целевой задачи; N — суммарное количество информации, переданной и полученной с беспилотной системы в ходе выполнения целевой задачи; t_y — время, затраченное на управление беспилотной системой внешними средствами управления в течение выполнения целевых задач; T_A — время, отводимое беспилотной системе для решения целевых задач в режиме автономного функционирования; C — эмпирический коэффициент, характеризующий вероятность обеспечения связи между беспилотной системой и внешними средствами управления; i и j — эмпирические показатели, определяемые опытным путем.

Правая часть выражения (1) для уровня автономности A содержит три составляющие: отношение $(n_y/N)^{-i}$, отношение $(t_y/T_A)^{-j}$ и коэффициент C . Первая составляющая $(n_y/N)^{-i}$ характеризует способность беспилотной системы автономно выполнять целевые функции и передавать результаты своей работы потребителю в виде больших объемов специальной (целевой) информации при малых объемах информации, используемой для управления беспилотной системой внешними средствами управления. Данная составляющая позволяет как охарактеризовать информационное взаимодействие между беспилотной системой и внешними средствами управления, так и подчеркнуть сложность выполняемых беспилотной системой задач, влияющих на его уровень автономности. Вторая составляющая $(t_y/T_A)^{-j}$ характеризует способность беспилотной

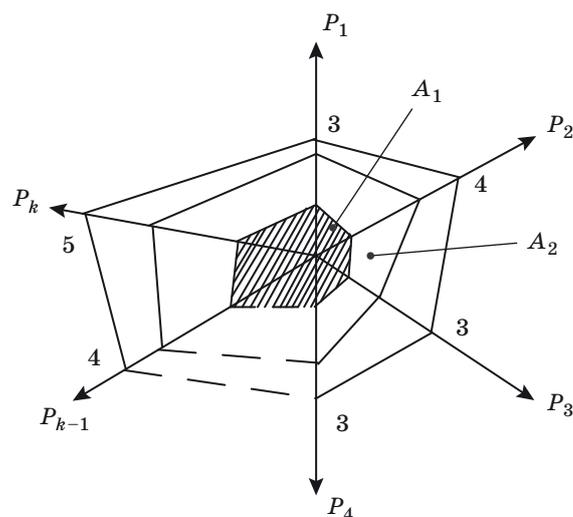
системы длительно находиться в режиме автономного функционирования без информационного взаимодействия с внешними средствами управления. Третья составляющая в виде коэффициента C введена для возможности корректного сравнения уровней автономности объектов, функционирующих в различных средах и условиях передачи информации, изменение которых может привести к увеличению времени и интенсивности информационного взаимодействия КА и НКУ. Таким образом, в выражении (1) учтены особенности определения уровня автономности беспилотной системы, связанные с учетом интенсивности ее информационного взаимодействия с внешними средствами управления беспилотной системой, внешних условий и сложности решаемых беспилотной системой целевых задач.

Передача на Землю больших объемов специальной (целевой) информации характерна, прежде всего, для КА ДЗЗ. Выражение (1) может быть непосредственно использовано для определения их уровня автономности, а также может быть преобразовано к следующему виду:

$$A = P \left(\frac{t_y}{T_A(P)} \right)^{-j}, \quad (2)$$

где t_y — средняя продолжительность проведения сеансов управления КА средствами НКУ перед интервалом автономного функционирования КА; $T_A(P)$ — продолжительность интервала автономного функционирования КА, гарантированно достигаемая с вероятностью P . Значение $T_A(P)$ зависит от достоверности диагностирования технического состояния бортовой аппаратуры КА средствами бортового и наземного сегментов СИТО. Выражение (2) может быть использовано для оценки уровня автономности любых КА, имеющих режим автономного функционирования.

Рассмотренные способы оценки уровня автономности отражают лишь отдельные аспекты вопроса обеспечения автономности беспилотных систем, в том числе автоматических КА. Более глубоким и объективным подходом к оценке уровня автономности беспилотных систем является подход на основе представленной на рис. 2 «паутинной» модели в виде совокупности многоугольников, построенных в системе осей, на которых откладываются значения показателей P_1, P_2, \dots, P_k , характеризующих работу бортовых подсистем беспилотной системы — управления, навигации, диагностирования и др. Число осей k и значения соответствующих показателей отражают степень реализации в беспилотной системе современных технологий, влияющих на уровень ее автономности.



■ Рис. 2. Подход к оценке уровня автономности на основе «паутинной» модели

Уровень автономности беспилотной системы A численно определяет площадь многоугольника. Задается характеризующий уровни автономности набор значений A_1, A_2, \dots, A_n , где n — количество уровней автономности [9]. Данный подход также называют «звездой ориентиров» Босселя, и он является наиболее эффективным из рассмотренных подходов, поскольку позволяет комплексно оценить уровень автономности беспилотной системы, используя множество различных ее параметров и характеристик [2].

Одной из характеристик, используемых для оценки уровня автономности автоматических КА, является средний интервал автономного функционирования \bar{T}_A , который может быть определен как выборочное среднее случайной величины — времени автономного функционирования КА:

$$\bar{T}_A = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m T_A(l), \quad (3)$$

где $l = 1, 2, \dots, m$ — номер обращения; m — число обращений на анализируемом интервале времени; $T_A(l)$ — интервал времени между l -м и $(l-1)$ -м обращениями БКУ к НКУ в процессе выполнения КА целевой задачи по предназначению:

$$T_A(l) = t_b(l) - t_b(l-1) - T_d(l). \quad (4)$$

Здесь $t_b(l), t_b(l-1)$ — время двух последовательных обращений БКУ к НКУ; $T_d(l)$ — время диагностирования и восстановления работоспособного состояния бортовой аппаратуры КА средствами наземного сегмента СИТО. Определение величины $T_A(l)$ в виде (4) отражает то обстоятельство, что для КА с высоким уровнем автономности обращение БКУ к НКУ, как правило,

обусловлено возникновением нештатных ситуаций, устранение которых требует проведения углубленного технического диагностирования бортовой аппаратуры КА средствами наземного сегмента СИТО [7].

На практике в целях эффективного планирования работы БКУ КА и НКУ важно знать интервал автономного функционирования $T_A(P_3)$, гарантированно достигаемый с заданной вероятностью $P = P_3$ [7]. Для оценки \bar{T}_A или $T_A(P_3)$ необходимо набрать статистику значений $T_A(l)$, построить функцию плотности вероятности распределения случайной величины T_A и найти соответствующий временной интервал.

Таким образом, несмотря на экспоненциальный рост уровня автономности создаваемых в настоящее время автоматических КА, на сегодняшний день не существует полноценной методики оценивания уровня автономности КА. Для его определения можно адаптировать наиболее известные подходы, применяемые для классификации сложных беспилотных систем, а также использовать интегральный показатель A или временные показатели \bar{T}_A или $T_A(P_3)$.

Определение уровня автономности КА ДЗЗ на основе агрегирования различных подходов и результаты моделирования

Большинство рассмотренных подходов к оценке уровня автономности КА являются эвристическими и основываются на знании экспертов, в результате чего полученные оценки могут иметь недостаточную точность. Одним из способов улучшения оценки уровня автономности КА является агрегирование результатов классификации с использованием нескольких рассмотренных схем и приведение полученной оценки к единой числовой шкале. Рассмотрим совместное использование подходов к определению уровня автономности КА ДЗЗ на основе классификации NASA (см. табл. 2) и аналитического выражения (1).

Введем следующие допущения:

- количество переданной с КА специальной информации (данных ДЗЗ) n_n равно произведению пропускной способности канала передачи информации C_n и времени t_n , в течение которого эта передача осуществляется ($n_n = C_n t_n$);

- пропускная способность канала передачи с КА специальной информации C_n значительно выше пропускной способности каналов управления и передачи телеметрической информации C_y , относящихся к контуру управления КА ($C_n \gg C_y$);

- вероятность обеспечения связи между КА ДЗЗ и наземным пунктом приема специальной информации, относящимся к подсистеме потребителей, равна единице ($C_n = 1$).

Полагая, что $N = n_n + n_y$ и $C_n = 1$, преобразуем выражение (1) для определения уровня автономности КА ДЗЗ следующим образом:

$$A = C_n \left(\frac{n_y}{N} \right)^{-i} \left(\frac{t_y}{T} \right)^{-j} = \left(\frac{C_y t_y}{C_n t_n + C_y t_y} \right)^{-i} \left(\frac{t_y}{T_A} \right)^{-j}, \quad (5)$$

где t_y — средняя длительность сеанса управления КА; t_n — средняя длительность сеанса передачи специальной информации с КА. Поскольку продолжительность зоны радиовидимости КА одинаковая как для наземных средств управления, так и для наземных средств приема информации, можно полагать, что $t_y = t_n$. Тогда при $C_n \gg C_y$ уровень автономности КА ДЗЗ определяется выражением

$$A = \left(\frac{C_y}{C_n} \right)^{-i} \left(\frac{t_y}{T_A} \right)^{-j}. \quad (6)$$

Осуществим логарифмическое преобразование левой и правой частей полученного выражения (6):

$$\lg A = i \lg \left(\frac{C_n}{C_y} \right) + j \lg \left(\frac{T_A}{t_y} \right). \quad (7)$$

Анализ полученного уравнения (7) показывает, что коэффициенты i и j должны принимать только положительные значения ($i > 0, j > 0$), а входящие в правую часть уравнения слагаемые должны оказывать примерно одинаковое

влияние на его левую часть: $i \lg \left(\frac{C_n}{C_y} \right) \approx j \lg \left(\frac{T_A}{t_y} \right)$.

В противном случае искажается физический смысл выражения (1): наблюдается уменьшение уровня автономности A с ростом T и C_n и исчезает равнозначность влияния составляющих на его величину.

В результате уравнение (7) можно разделить на две части и решить их независимо друг от друга:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \lg A = i \lg \left(\frac{C_n}{C_y} \right) \\ \frac{1}{2} \lg A = j \lg \left(\frac{T_A}{t_y} \right) \end{cases}. \quad (8)$$

Значения коэффициентов i и j для КА ДЗЗ можно определить статистическим путем с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [11]. Для этого сформируем табл. 4 с характеристиками различных КА ДЗЗ, соответствующих нескольким временным периодам: $C_{ng}, C_{yg}, T_{Ag}, t_{yg}, A_g$, где $g = 1, 2, \dots, 5$ — номер анализируемого временного периода. Данные

■ Таблица 4. Статистические данные о характеристиках КА ДЗЗ

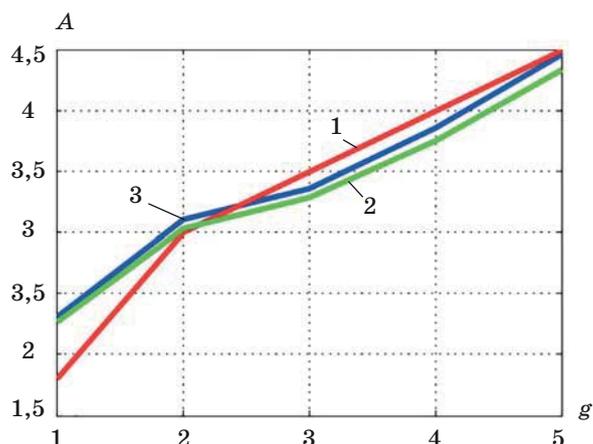
Номер временного периода g	Доля операций БКУ, %	Оценка уровня автономности КА A_g	Пропускная способность канала связи C_n , Мбит/с	Интервал автономного функционирования T_A , сут
1	40	1,8	8	1
2	80	3	120	4
3	90	3,5	300	5
4	95	4	800	12
5	97	4,5	3000	24

для заполнения таблицы получены в результате обобщения информации по отечественным КА ДЗЗ, представленной в различных источниках [2, 4, 5, 7, 12]. Часть данных в табл. 4 получена путем интерполяции и экстраполяции во временной области имеющихся в наличии характеристик и уровня автономности КА ДЗЗ с учетом их экспоненциального роста [9].

Среднее время сеанса управления и пропускная способность каналов управления приняты одинаковыми во всех рассмотренных случаях и равными 5 мин и 32 Кбит/с соответственно. Для оценки уровня автономности КА ДЗЗ A_g использована классификация NASA (см. табл. 2). Приведенные данные могут быть уточнены на основе обработки статистических данных летной эксплуатации КА ДЗЗ и имитационного моделирования.

Запишем уравнения (8) в виде $Y = iX_1$ и $Y = jX_2$, где Y — вектор-столбец из элементов левой части уравнений (8); X_1 и X_2 — матрицы из элементов правых частей первого и второго уравнения (8) соответственно. Компонентами вектора Y являются величины $y_g = \frac{1}{2} \lg A_g$, компонентами вектора X_1 являются величины $x_{1,g} = \lg \left(\frac{C_{ng}}{C_{yg}} \right)$, компонентами вектора X_2 являются величины $x_{2,g} = \lg \left(\frac{T_A g}{t_y} \right)$, $g = 1, 2, \dots, 5$.

В результате решения уравнений (8) с помощью МНК найдены значения коэффициентов $i = 0,0662$, $j = 0,0802$ и получена аппроксимация приведенных в табл. 4 уровней автономности КА ДЗЗ. Зависимости уровня автономности A КА ДЗЗ от номера временного периода g показаны на рис. 3. Кривая 1 соответствует исходным данным по автономности КА ДЗЗ, приведенным в табл. 4, кривая 2 соответствует аппроксимации уровней



■ Рис. 3. Уровни автономности КА ДЗЗ для различных временных периодов

автономности КА ДЗЗ с использованием МНК, кривая 3 соответствует аппроксимации уровней автономности КА ДЗЗ с использованием алгоритма SPSA [13].

Алгоритм SPSA представляет собой рекуррентную процедуру и основан на случайном пробном возмущении оптимизируемых параметров, в данном случае коэффициентов i и j , в целях поиска их оптимальных значений. Преимуществом алгоритма SPSA является возможность применения различных критериев (например, минимума максимального значения абсолютной погрешности), а также построения комбинированных целевых функций, учитывающих условия вида

$$i \lg \left(\frac{C_{ni}}{C_{yi}} \right) \approx j \lg \left(\frac{T_A}{t_y} \right).$$

В результате применения алгоритма SPSA получены уточненные значения коэффициентов $i = 0,0657$, $j = 0,0842$.

Использование наряду с МНК алгоритма SPSA было обусловлено тем, что при использовании МНК погрешности аппроксимации могут суммироваться негативным образом и ухудшить общую погрешность аппроксимации исходных данных. В рассмотренном случае среднеквадратическая погрешность аппроксимации при использовании МНК составляет $\gamma = 0,298$. Применение процедуры стохастической оптимизации на основе алгоритма SPSA позволило получить меньшее значение среднеквадратической погрешности аппроксимации $\gamma = 0,281$. При принятых допущениях и уточнении значений коэффициентов i и j результирующее аналитическое выражение для определения уровня автономности КА ДЗЗ имеет следующий вид:

$$A = \left(\frac{C_y}{C_n} \right)^{-0,0657} \left(\frac{t_y}{T_A} \right)^{-0,0842}. \quad (9)$$

Используя зависимость интервала автономного функционирования КА, гарантированно достигаемого с заданной вероятностью P_3 от показателей достоверности диагностирования бортовой аппаратуры КА средствами бортового D_1 и наземного D_2 сегментов СИТО, представленную в работе [7], полученное выражение (9) для оценки уровня автономности A и данные для КА «Ресурс-ДК1» [2, 4, 5], определим влияние показателей достоверности диагностирования бортовой аппаратуры КА D_1 и D_2 на уровень автономности КА. В качестве показателей достоверности D_1 и D_2 выступают вероятности правильного обнаружения, распознавания и локализации неисправности бортовой аппаратуры КА средствами бортового сегмента СИТО (D_1); правильного обнаружения неисправности и диагностирования бортовой аппаратуры КА при углубленном анализе ее технического состояния средствами НКУ (D_2). Задавалась вероятность гарантированного достижения заданного интервала автономного функционирования КА $P_3 = 0,97$.

Результаты анализа представлены на рис. 4 в виде зависимостей уровня автономности A от показателя достоверности D_1 бортового сегмента СИТО.

Кривая 1 соответствует высокой достоверности внешнего диагностирования бортовой аппаратуры КА наземным сегментом СИТО ($D_2 = 1$), кривая 2 — средней достоверности внешнего диагностирования бортовой аппаратуры КА наземным сегментом ($D_2 = 0,8$), кривая 3 — условиям, когда внешнее диагностирование бортовой аппаратуры КА наземным сегментом практически не осуществляется ($D_2 = 0,1$).

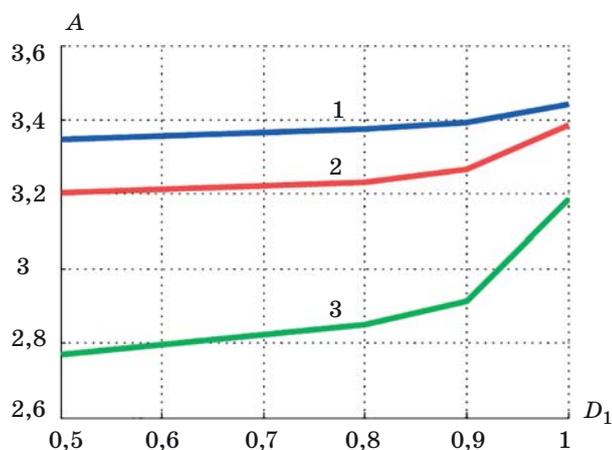
Представленные зависимости позволяют сделать вывод о влиянии характеристик средств диагностирования СИТО на уровень автономно-

сти КА и его изменение в пределах 14 % используемой шкалы. Данная величина приобретает значимый вес на фоне изменения уровня автономности КА двух последующих друг за другом поколений, которое достигает 10–24 % этой же шкалы (см. табл. 4).

Таким образом, на основе классификации уровней автономности КА и статистических данных было получено аналитическое выражение для определения уровня автономности КА ДЗЗ с учетом параметров, характеризующих продолжительность интервала автономного функционирования КА и его информационную производительность. Отметим, что рассмотренный подход ориентирован на использование по отношению к КА ДЗЗ, поскольку учитывает особенности их целевого применения, в частности, результат целевого применения в виде передачи на Землю специальной (целевой) информации — данных ДЗЗ. Кроме того, принятые допущения не учитывают перспективной технологии передачи с КА данных ДЗЗ с ретрансляцией [14], при использовании которой продолжительность сеансов передачи специальной информации с КА может быть существенно увеличена. При принятом определении уровня автономности A с учетом объема передаваемой с КА специальной информации это приведет к увеличению A , однако такой случай требует отдельного рассмотрения, поскольку при этом возможно нарушение равнозначности влияния на уровень автономности интервала автономного функционирования и информативности КА ДЗЗ.

Заключение

В настоящее время существуют различные подходы к вопросам классификации сложных беспилотных систем, которые можно адаптировать и использовать для определения уровня автономности КА. Повышение автономности является насущной задачей при создании перспективных КА ДЗЗ, о чем свидетельствует экспоненциальный рост уровня автономности аэрокосмических средств, наблюдаемый в последние десятилетия как у нас в стране, так и зарубежом. Одним из способов достижения высокой автономности КА является повышение отказоустойчивости их бортовой аппаратуры, в том числе путем совершенствования средств бортового и наземного сегментов СИТО в части диагностирования технического состояния и восстановления работоспособности бортовой аппаратуры КА. Представленные результаты качественно подтверждают данное утверждение, а предлагаемые способы определения уровня автономности могут быть использованы при оценке системных показателей КА с высоким уровнем автономности.



■ Рис. 4. Зависимости уровня автономности КА от достоверности автономного диагностирования технического состояния

Литература

1. Соловьев В. А., Лысенко Л. Н., Любинский В. Е. Управление космическими полетами. Ч. 1. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 476 с.
2. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Соллогуб А. В., Макаров В. П. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии. — М.: Машиностроение, 2010. — 384 с.
3. Филаретов В. Ф. Устройства и системы управления подводных роботов. — М.: Наука, 2005. — 270 с.
4. Борисов А. В., Ковальский Н. П., Любченко Ф. Н. Перспективные направления создания комплексов приема, обработки и распространения космической информации дистанционного зондирования Земли и связанные с этим проблемы // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 5. С. 9–15.
5. Кириллин А. Н., Аншаков Г. П., Ахметов Р. Н., Сторож Д. А. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». — Самара: Волга-Дизайн, 2011. — 280 с.
6. Ахметов Р. Н. Модели и методы автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2008. № 2. С. 194–210.
7. Мальцев Г. Н., Назаров А. В., Якимов В. Л. Имитационное моделирование процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования // Информационно-управляющие системы. 2016. № 4. С. 34–43. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.34
8. Ахметов Р. Н., Макаров В. П., Соллогуб А. В. Оценка автономности низкоорбитальных КА дистанционного зондирования Земли // Полет. 2009. № 10. С. 7–14.
9. Wang Y., Liu J. Evaluation Methods for the Autonomy of Unmanned Systems // Chinese Science Bulletin. 2012. Vol. 57. P. 3409–3428.
10. Curtin T., Crimmins D., Curcio J. Autonomous Underwater Vehicles: Trends and Transformations // Marine Technology Society Journal. 2005. Vol. 39. P. 65–75.
11. Химельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. — М.: Мир, 1973. — 957 с.
12. Назаров А. В., Козырев Г. И., Шитов И. В. и др. Современная телеметрия в теории и на практике. — СПб.: Наука и Техника, 2007. — 672 с.
13. Граничин О. Н. Введение в методы стохастической оптимизации и оценивания. — СПб.: СПбГУ, 2003. — 131 с.
14. Романов А. А. Основы космических информационных систем. — М.: Радиотехника, 2013. — 352 с.

UDC 629.78

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.34

Modern Approaches to Determining Spacecraft Autonomy Level

Maltsev G. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, georgy_maltsev@mail.ru.

Yakimov V. L.^a, PhD, Tech., Associate Professor, yakim78@yandex.ru.

^aA. F. Mozhayskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197082, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Our goal is to analyze and systematize the modern approaches to classifying sophisticated unmanned systems by their operation autonomy level, to introduce a constructive index of the autonomy level and to build a uniform classification of spacecrafts by their autonomy level. **Results:** We have analyzed the approaches to assessing sophisticated unmanned system autonomy level, and adapted the considered classification schemes to spacecrafts. On the base of statistical data analysis, we have obtained an expression which approximates the dependence of the autonomy level of Earth remote sensing spacecrafts on the throughput of the control paths and information transmission channels, on the control session duration and on the independent operation interval. We have demonstrated how the possibilities of onboard and terrestrial devices for the diagnostics of the onboard equipment of spacecrafts affect the level of their self-sufficiency. **Practical relevance:** The obtained results can be used to evaluate the system indices of various spacecrafts, and to substantiate the ways of providing the required operational reliability for spacecrafts with a high level of autonomy by choosing the periodicity of control sessions and diagnosing the technical state of the onboard equipment.

Keywords — Autonomy, Spacecraft, Diagnosing, Technical State.

References

1. Solov'ev V. A., Lysenko L. N., Liubinskii V. E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Mission Control]. Part 1. Moscow, MGTU imeni N. E. Baumana Publ., 2009. 476 p. (In Russian).
2. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Sollogub A. V., Makarov V. P. *Metody obespecheniia zhivuchesti nizkoorbital'nykh avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov zondirovaniia Zemli: matematicheskie modeli, komp'iuternye tekhnologii* [Methods of Support of Survivability of Low-Orbit Automatic Spacecrafts of Earth Sounding: Mathematical Models, Computer Technologies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 384 p. (In Russian).
3. Filaretov V. F. *Ustroistva i sistemy upravleniia podvodnykh robotov* [Devices and Management Systems of Underwater Robots]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 270 p. (In Russian).
4. Borisov A. V., Koval'skij N. P., Ljubchenko F. N. The Perspective Directions of Creation of Complexes of Reception, Processing and Distribution of Space Information of Remote Sensing of Earth and Problems Connected to it. *Kosmonavtika i raketrostroenie*, 2008, no. 5, pp. 9–15 (In Russian).
5. Kirillin A. N., Anshakov G. P., Akhmetov R. N., Storozh D. A. *Kosmicheskoe apparatostroenie: nauchno-tekhnicheskie issledovaniia i prakticheskie razrabotki GNPRKTs «TsSKB-Progress»* [Space Vehicle Building: Scientific and Technical Research and Practical Development of SSPRSC «TsSKB-Progress»]. Samara, Volga-Dizain Publ., 2011. 280 p. (In Russian).
6. Ahmetov R. N. Models and Methods of Off-Line Control by Survivability of Earth Remote Sensing Automatic Space-

- crafts. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2008, no. 2, pp. 194–210 (In Russian).
7. Maltsev G. N., Nazarov A. V., Yakimov V. L. The Simulation Modeling of Complex Technical System Diagnosing Process with the Autonomy High Level of Functioning. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 4, pp. 34–43 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.34
 8. Akhmetov R. N., Makarov V. P., Sollogub A. V. Assessment of Low-Orbit Spacecraft Autonomy of Earth Remote Sensing. *Polet*, 2009, no. 10, pp. 7–14 (In Russian).
 9. Wang Y., Liu J. Evaluation Methods for the Autonomy of Unmanned Systems. *Chinese Science Bulletin*, 2012, vol. 57, pp. 3409–3428.
 10. Curtin T., Crimmins D., Curcio J. Autonomous Underwater Vehicles: Trends and Transformations. *Marine Technology Society Journal*, 2005, vol. 39, pp. 65–75.
 11. Himel'blau D. *Analiz processov statisticheskimi metodami* [The Analysis of Processes by Statistical Methods]. Moscow, Mir Publ., 1973. 957 p. (In Russian).
 12. Nazarov A. V., Kozyrev G. I., Shitov I. V., et al. *Sovremennaya telemekhanika v teorii i na praktike* [Modern Telemetry in Theory and Practice]. Saint-Petersburg, Nauka i Tekhnika Publ., 2007. 672 p. (In Russian).
 13. Granichin O. N. *Vvedenie v metody stokhasticheskoi optimizatsii i otsenivaniia* [Introduction in Methods of Stochastic Optimisation and Estimation]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2003. 131 p. (In Russian).
 14. Romanov A. A. *Osnovy kosmicheskikh informatsionnykh sistem* [Fundamentals of Space Information Systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013. 352 p. (In Russian).

**Научный журнал
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»
выходит каждые два месяца.**

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4800 рублей, для подписчиков стран СНГ — 5400 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу: «Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»
Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,
эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,
сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru,

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru,

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>;

РУКОНТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru/>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2016 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/>

journal/n/informatsionno-upravlyayushchiesistemy).

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Т. М. Татарникова^а, доктор техн. наук, доцент

М. А. Елизаров^б, аспирант

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: при развертывании систем Интернета вещей необходимо выбирать режим информационного взаимодействия сенсорных устройств с сервером, при реализации которого коллизии источников данных будут минимально возможными. **Цель исследования:** разработка модели оценки вероятностно-временных характеристик информационного взаимодействия в Интернете вещей с учетом возникновения коллизий. **Результаты:** предложена имитационная модель, реализующая различные режимы информационного взаимодействия сенсорных устройств и сервера: опроса, прерываний и множественного доступа. Модель позволяет оценить вероятностно-временные характеристики информационного взаимодействия с учетом стохастического характера процесса доступа сенсорных устройств к серверу и вероятности возникновения коллизий. **Практическая значимость:** модель может найти применение на ранних стадиях проектирования систем Интернета вещей для определения реальных условий их функционирования.

Ключевые слова – Интернет вещей, стохастический процесс передачи данных, организация доступа к разделяемым ресурсам, коллизия, режим опроса, режим прерываний, множественный доступ, количество сенсоров в кластере, имитационная модель, эксперимент на модели.

Введение

Одним из развивающихся направлений информационных технологий является Интернет вещей (Internet of Things — IoT).

Internet of Things — это совокупность разнообразных сенсорных устройств (приборов, датчиков), объединенных в сеть посредством доступных каналов связи, использующих ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth и другие протоколы беспроводной связи малой зоны действия для взаимодействия между собой и IP-протокол для доступа в сеть Интернет [1–3].

Примером IoT является сеть «умного дома». Несколько таких «умных сетей» могут быть объединены в сеть мониторинга и управления системой пожаротушения города, а «умные городские сети» в свою очередь могут быть объединены сетью Интернет для общего доступа к информации об уровне пожарной безопасности на любой территории страны [4].

Технология IoT находится на стадии ранней реализации и активных исследований. Одним из актуальных вопросов является оптимальная организация сети IoT с учетом требований к быстродействию, формату данных, энергосбережению устройств [5, 6]. Среди различных методов физической организации IoT предпочтение отдается централизованной организации взаимодействия, поскольку нагрузка, связанная с обработкой данных, переносится на сервер, и предоставляются надежные средства хранения, в том числе облачные сервисы [7, 8]. Общая топологическая

структура сети IoT приведена на рис. 1. Данные от сенсорных устройств (СУ) по доступным каналам связи передаются в шлюзы, которые помимо агрегации данных от СУ выполняют функцию сопряжения неоднородных участков IoT [9].

Передача данных от СУ на сервер является стохастическим процессом и в общем случае состоит из следующих этапов:

- накопление информации;
- включение или выход из режима сна;

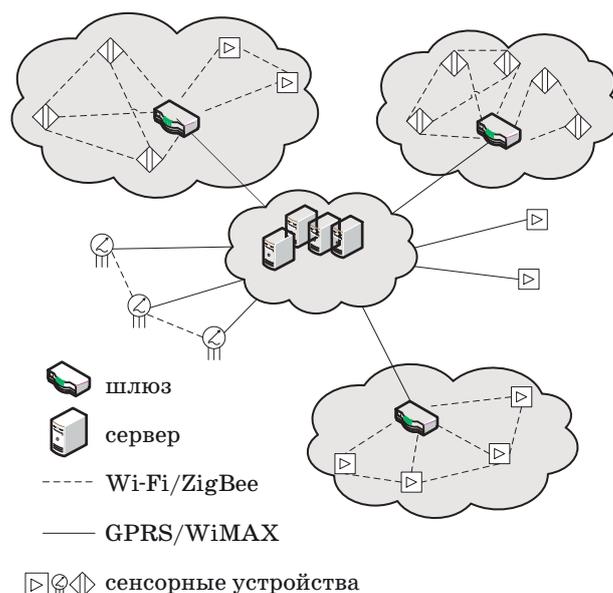


Рис. 1. Топологическая структура сети Интернета вещей

- установка соединения с сервером;
- передача информации на сервер;
- переход в спящий режим или выключение СУ.

При реализации сети IoT необходимо учитывать возможность одновременной передачи сразу от нескольких СУ, приводящей к коллизиям источников данных. Управляющая программа сервера должна распознавать и устранять такую ситуацию [10, 11]. В статье предлагается модель, позволяющая оценить время передачи данных с учетом возникновения коллизий при организации разных режимов доступа СУ к серверу.

Описание режимов организации доступа к серверу

Известны несколько режимов организации доступа к разделяемым ресурсам — каналу связи и вычислительным ресурсам сервера: опрос, прерывания и множественный доступ [12].

Рассмотрим режимы подробнее в целях адекватного моделирования и сравнения результатов в зависимости от нагрузки и других параметров IoT.

Режим опроса

В схеме опроса сенсорные устройства начинают передачу данных только по запросу сервера. Если у СУ нет подготовленного для передачи пакета данных, то специальный логический механизм СУ формирует пакет состояния и оповещает сервер о своей работоспособности. Время, необходимое для выполнения операции опроса, зависит от физических характеристик канала взаимодействия, которые и определяют задержку распространения [13, 14].

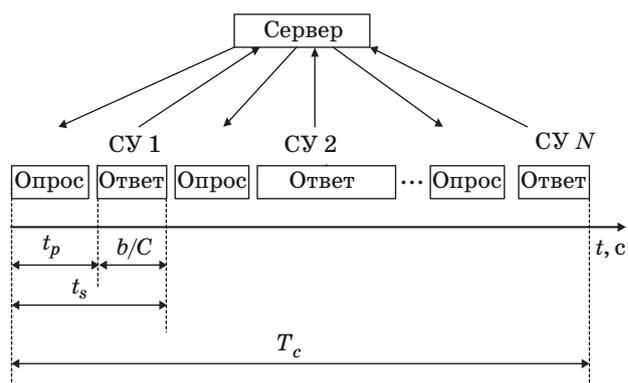
Время обслуживания t_s сенсорного устройства в режиме опроса формируется следующим образом:

$$t_s = t_p + \frac{\bar{b}}{C}, \quad (1)$$

где t_p — время, затрачиваемое на сигнал опроса, с; \bar{b} — среднее значение длины пакета, бит; C — пропускная способность канала, бит/с.

Соответственно, полный цикл взаимодействия N сенсорных устройств и сервера составляет $T_c = Nt_s$. Связь этих переменных представлена на рис. 2.

Время t_p включает как время формирования опроса, так и задержку распространения. Отношение b/C — это время, необходимое для передачи b бит со скоростью C бит в секунду. Если опрашиваемое СУ не имеет готового сообщения для передачи, то b — очень мало, поскольку передается стандартное управляющее сообщение о том, что данные для передачи отсутствуют.



■ Рис. 2. Временная диаграмма реализации режима опроса

Если же в буфере сформирован пакет данных, то b равно числу бит пакета.

Отношение (1) позволяет оценить среднее время обслуживания одного СУ при условии, что дисперсия b значительно меньше, чем \bar{b} .

Если каждое СУ передает в среднем λ пакетов в секунду, то при наличии в системе N сенсорных устройств общая интенсивность потока данных составит λN пакетов в секунду, а средний интервал между их поступлениями равен $1/\lambda N$ секунд. Следовательно, во избежание неограниченного роста очередей время обслуживания t_s должно соответствовать условию

$$\bar{t}_s = t_p + \frac{\bar{b}}{C} \leq \frac{1}{\lambda N}. \quad (2)$$

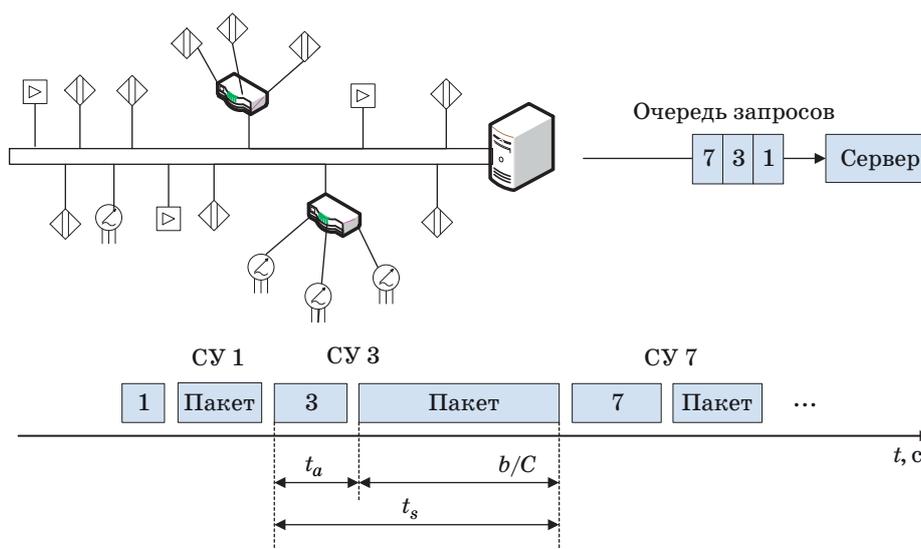
Решая (2) относительно C , получим условие, гарантирующее отсутствие очереди для каждого сенсорного устройства:

$$C \geq \frac{\lambda N \bar{b}}{1 - \lambda N t_p}.$$

В соответствии с данным условием любое из сенсорных устройств опрашивается каждые $1/\lambda$ секунд, и в то же время в нем формируется очередной пакет данных.

Режим прерываний

Отличие режима прерываний от режима опроса в том, что вместо послышки сигналов опроса сервер принимает и ставит в очередь сигналы от СУ о готовности начать передачу. Таким образом, система, управляемая по прерываниям, предполагает соперничество за право передать данные на сервер [15]. Сенсорные устройства спонтанно посылают запросы на передачу данных серверу, который выстраивает их в очередь и направляет положительные подтверждения. Если по истечении определенного интервала времени такое под-



■ Рис. 3. Схема и временная диаграмма реализации режима прерываний

тверждение не поступает, запрос автоматически повторяется. При свободном канале сервер принимает данные от запрашивающего СУ. После завершения передачи сервер переходит к приему данных от следующего в очереди запроса. На рис. 3 приведены схема и временная диаграмма реализации режима прерываний.

Для случайно поступающих запросов на передачу данных вероятность пересечения двух или более запросов

$$P_c = 1 - e^{-N\lambda T},$$

где T — время передачи пакета длиной b бит.

При повторении запросов реальная интенсивность их поступления превысит λ . В соответствии с законом Пуассона получим следующую вероятность возникновения конфликта:

$$P_c = 1 - e^{-\Lambda T},$$

где Λ — реальная интенсивность поступления пакетов в T -секундном интервале, $\Lambda = N\lambda + P_c\lambda$.

Тогда производительность такой системы равна $N\lambda T = \Lambda T e^{-\Lambda T}$.

Чтобы найти максимальную производительность, продифференцируем $N\lambda T$ по ΛT и результат приравняем к нулю:

$$\frac{d(N\lambda T)}{d\Lambda T} = e^{-\Lambda T} - \Lambda T e^{-\Lambda T} = 0;$$

$$1 - \Lambda T = 0, \Lambda T = 1.$$

Подставляя это значение ΛT в выражение для $N\lambda T$, определим максимальное количество сенсорных устройств N_{\max} , при котором при задан-

ной полосе пропускания можно избежать критического уровня коллизий: $(N\lambda T)_{\max} = 1/e$.

С учетом того, что $T = b/C$:

$$N_{\max} = \frac{C}{e\lambda b}.$$

Эти уравнения получены из предположения о существовании отдельного канала для посылки запросов.

Время пребывания запросов в очереди t_a может быть найдено из соотношения интенсивностей их поступления и обслуживания. Общее время обслуживания t_s включает время доступа t_a и время передачи данных $\frac{\bar{b}}{C}$. Таким образом:

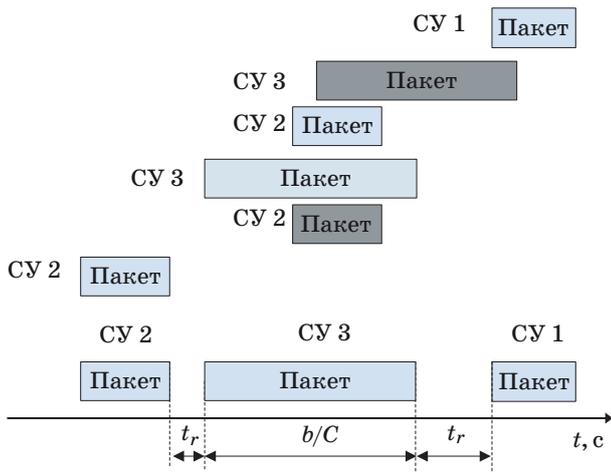
$$t_s = t_a + \frac{\bar{b}}{C}.$$

Это уравнение аналогично (1) для режима опроса. За меру производительности такого режима взаимодействия можно принять коэффициент загрузки ρ .

Если $\rho > 1$, то запросы поступают быстрее, чем они могут быть обслужены, что приводит к неограниченному росту очередей. При $\rho \leq 1$ очередь остается конечной. Физический смысл ρ есть отношение среднего времени обслуживания к среднему интервалу времени между поступлением запросов.

Режим множественного доступа

Доступ к серверу распределяется между конкурирующими СУ в соответствии с управляемым вероятностным арбитражем. При наличии данных на обработку СУ начинает передачу пакета



■ Рис. 4. Временная диаграмма режима множественного доступа

на сервер. Передача аварийно завершается и заново планируется сенсорным устройством при обнаружении пересечения с пакетами другими СУ. В отсутствие пересечения пакет будет послан по назначению. Во избежание повторения конфликтов сенсорные устройства вновь осуществляют передачу в случайные интервалы времени t_r . Чтобы обеспечить оптимальное использование канала при изменении нагрузки, интервалы повторной передачи пакетов вычисляются как функции от предыстории конфликтов (рис. 4). Множественный доступ может быть реализован в режиме тактируемой или нетактируемой передачи. При нетактируемом режиме СУ передают данные в любой момент времени. При тактируемом режиме передача разрешена только в заранее определенные интервалы времени. Такт равен максимальному интервалу времени между моментом, когда СУ начинает передачу, и моментом обнаружения конфликта:

$$P = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{(N-1)},$$

где P — вероятность того, что ровно одно СУ попытается передать пакет в течение такта и получит доступ к серверу; N — количество СУ в очереди на передачу.

Эффективность режима множественного доступа или доля времени, в течение которого пакеты передаются без повторения, определяется следующим образом:

$$\rho = \frac{b/C}{b/C + WT_T},$$

где W — среднее число тактов, прошедших в интервал конкуренции, пока СУ не получит доступ

для передачи данных, $W = (1 - P)/P$; T_T — длительность такта.

Пусть дано: N — количество СУ, взаимодействующих с сервером; ΔT — период дискретизации. Средствами имитационного моделирования оценим время передачи данных от сенсорных устройств на сервер при разных режимах доступа в условиях возникновения коллизий.

Особенности реализации имитационного моделирования передачи данных от сенсоров при разных режимах доступа

Всем сенсорным устройствам назначается идентификатор ID в соответствии с их IP-адресом в составе сети IoT. Далее для всех СУ генератором случайных положительных целых чисел (обозначим их RND) разыгрывается значение времени t начала передачи из диапазона $[L, R]$:

$$t = r\Delta T,$$

где r — случайное число, $r \in \text{RND}$.

Сервер устанавливает соединение с тем СУ, для которого $\min_t [t_{i=1,n}]$, пусть ID этого сенсора равен k . Для остальных СУ новое время начала передачи определяется по формуле

$$J_i \Delta T = J_{i-1} \Delta T + r_{pak} \Delta T + r \Delta T, \quad (3)$$

где J_i — точка отсчета начала последующей передачи данных; J_{i-1} — точка начала передачи данных предыдущего $(k-1)$ -го СУ; r_{pak} — число точек отсчета времени, необходимого для передачи данных (постоянная величина, зависит от длины пакета данных); r — число, задающее число точек отсчета для определения:

- времени t_p , затрачиваемого на сигнал опроса k -го СУ при реализации режима опроса;
- времени доступа t_a при реализации режима прерываний;
- случайной задержки относительно окончания передачи данных $(k-1)$ -м СУ при реализации режима множественного доступа.

Выражение (3) является основой реализации имитационной модели. Поясним некоторые особенности предлагаемой модели.

Распределение начала передачи данных от СУ во времени для каждой итерации представлено как двумерная матрица $\|p_{ij}\|_{N \times M}$, где M — отсчеты времени. Для каждого СУ разыгрывается случайная задержка t_i , $i=1, N$ начала обращения к серверу относительно окончания передачи данных предыдущего СУ в виде значения случайного числа $r \in \text{RND}[L, R]$.

Например, «1» в первой строке матрицы $\|p_{ij}\|$ означает, что для СУ с $ID = 0$ задержка начала передачи $t = 3$, наличие «1» во второй строке матрицы $\|p_{ij}\|$ означает, что для СУ с $ID = 1$ задержка начала передачи $t = 1$, и т. д.:

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Далее выполняется поиск ID с минимальным запаздыванием начала передачи, в примере $ID = 1$. В случае обнаружения коллизии определяются новые точки отсчета начала передачи в соответствии с выражением (3). Если коллизия отсутствует, тогда управление передается серверу для считывания данных с последующей их обработкой и хранением. Разрешение на считывание данных определяется следующими условиями:

— если $(J_{i_k} - J_{i-1_k}) > r$, $k = \overline{1, N}$, то СУ с $ID = k$ передает данные;

— если $(J_{i_k} - J_{i-1_k}) \leq r$, $k = \overline{1, N}$, то СУ с $ID = k$ вступил в коллизия, и ему определяется новое значение J_i .

Анализ результатов моделирования

Результаты проведенных экспериментов показывают уменьшение среднего времени передачи с ростом r_{pak} . Это объясняется увеличением точности вычисления времени начала передачи, поскольку период дискретизации ΔT с ростом r_{pak} уменьшается, и, следовательно, «вес» точки отсчета в общем времени моделирования уменьшается. С другой стороны, с увеличением r_{pak} время моделирования резко возрастает.

С увеличением количества СУ, взаимодействующих с сервером, среднее время передачи увеличивается. Таким образом, исходя из требований ко времени передачи, модель позволяет определить максимально возможное количество СУ, подключенных к серверу. На рис. 5, а показана зависимость максимального числа СУ от нагрузки ρ . Сравнительные результаты демонстрируют преимущество множественного доступа при организации взаимодействия СУ с сервером на низких и средних нагрузках. Таким образом, при планировании организации кластерной структуры сети IoT модель позволяет выбрать оптимальный режим взаимодействия для прогнозируемой нагрузки в кластере.

На рис. 5, б приведены результаты зависимости среднего времени передачи данных \bar{t}_s от нагрузки ρ при $N = 10$ для разных режимов взаимо-

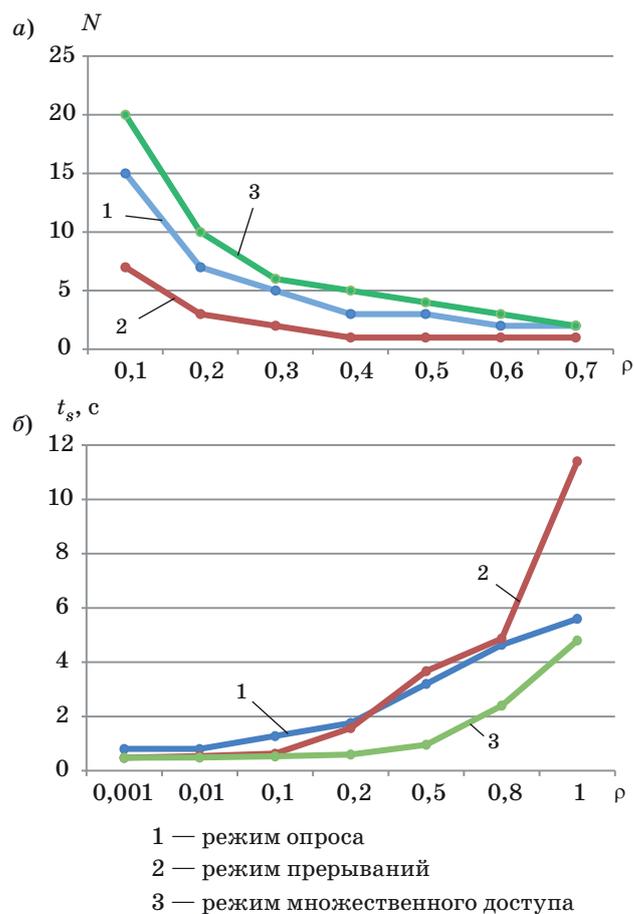


Рис. 5. Зависимость N (а) и \bar{t}_s (б) от ρ

действия СУ и сервера (интенсивность λ при этом менялась от 0,1 до 100 пакетов/с).

Анализ результатов говорит в пользу режима множественного доступа при нагрузках, начиная уже с $\rho > 0,1$. При этом необходимо учитывать, что высокая нагрузка предполагает, что сенсорные устройства все время будут находиться в активном состоянии для получения доступа к серверу, поскольку в режиме множественного доступа возрастает вероятность возникновения коллизий. Возникновение коллизий требует своего разрешения, и многократные попытки СУ получить доступ к серверу для передачи данных «вынуждают» сенсорные устройства находиться в активном состоянии. Условия высокой нагрузки имеют мало отношения к реальности, так как природа СУ такова, что необходимо чередовать «спящий» режим и режим активности для сохранения остаточной энергии и срока жизни СУ.

С другой стороны, при малых нагрузках $\rho < 0,1$, что больше соответствует реальным условиям, режимы отличаются по характеристике времени незначительно. Тем не менее в таких условиях режим опроса может быть предпочти-

тельнее, поскольку все действия выполняет сервер, а СУ могут не выходить из «спящего» режима при отсутствии данных для передачи и сохранять остаточную энергию.

Также представляет интерес результат сравнения режимов опроса и прерываний: при $\rho < 0,2$ время передачи данных меньше при организации взаимодействия сенсорных устройств с сервером в режиме прерываний, и наоборот, с увеличением ρ взаимодействие в режиме опроса становится предпочтительнее.

Заключение

Проектирование систем Интернета вещей связано с рядом задач, требующих моделирования

процессов информационного взаимодействия. Это позволяет при прогнозируемом трафике строить оптимальные режимы функционирования подобных систем.

Предложенная модель имитирует различные режимы доступа сенсорных устройств к серверу для передачи данных и позволяет оценить вероятностно-временные характеристики информационного взаимодействия с учетом стохастического характера процесса доступа и вероятности возникновения коллизий. Модель инвариантна к количеству сенсорных устройств, формату пакета данных, среднему времени передачи данных в условиях возникновения коллизий.

Модель может найти применение на ранних стадиях проектирования систем Интернета вещей.

Литература

1. Hersent O., Boswarthick D., Elloumi O. The Internet of Things: Key Applications and Protocols. — Willey, 2012. — 370 p.
2. Recommendation Y.2060: Overview of Internet of Things. — Geneva: ITU-T, February 2012. <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I> (дата обращения: 26.01.2017).
3. Recommendation Y.2069: Framework of the WEB of Things. — Geneva: ITU-T, July 2012. <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2069-201207-I> (дата обращения: 26.01.2017).
4. Росляков А. В., Ваняшин С. В., Гребешков А. Ю., Самсонов М. Ю. Интернет Вещей. — Самара: ПГУТИ, 2014. — 342 с.
5. Колбанев М. О., Татарникова Т. М. Физические ресурсы информационных процессов и технологий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 6. С. 113–122.
6. Galinina O., Andreev S., Mikhaylov K., Turlikov A. Wireless Sensor Network Based Smart Home System over BLE with Energy Harvesting Capability // Lecture Notes in Computer Science. 2014. Vol. 8638. P. 419–432.
7. Аль-Хаками Али Мохаммед Омар, Татарникова Т. М. Оценка вероятностно-временных характеристик сетей хранения данных SAN // Программные продукты и системы. 2009. № 4. С. 177–179.
8. Kellmerit Daniel. The Silent Intelligence: The Internet of Things. — Publisher: DND Ventures LLC, 2013. — 454 p.
9. Татарникова Т. М. Структурный синтез центра сопряжения корпоративных сетей // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3. С. 92–98. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.92
10. Markovich N. M., Krieger U. R. Statistical Analysis and Modeling of Peer-to-Peer Multimedia Traffic // Lecture Notes in Computer Science. 2011. Vol. 5233. P. 70–97.
11. Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В. Оценка надежности выполнения кластерами запросов реального времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 4. С. 46–48.
12. Кутузов О. И., Татарникова Т. М. Инфокоммуникационные сети. Моделирование и оценка вероятностно-временных характеристик. — СПб.: ГУАП, 2015. — 382 с.
13. Krouk E. A., Ovchinnikov A. A. Metrics for Distributed Systems // Proc. of XIV Intern. Symp. on Problems of Redundancy in Information and Control Systems, Saint-Petersburg, 1–5 June 2014. Saint-Petersburg, 2014. P. 66–70.
14. Татарникова Т. М., Елизаров М. А. Имитационная модель виртуального канала // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1120–1127. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127
15. Татарникова Т. М., Яготинцева Н. В. Оценка функциональной надежности корабельной сети передачи данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 9. С. 62–66.

UDC 004.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.44

Model of Estimating Temporal Characteristics of IoT Network Interaction

Tatarnikova T. M.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, tm-tatarn@yandex.ru

Elizarov M. A.^b, Post-Graduate Student, elizarovmaks@gmail.com

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bSaint-Petersburg State University of Economics Department, 21, Sadovaya St., 191023, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Internet of things (IoT) assumes a certain mode of information exchange between the sensor devices and the server, which would ensure the lowest probability of conflicts between the data sources. **Purpose:** We develop a model for assessing probabilistic-temporal characteristics of information exchange in IoT, taking into account possible conflicts. **Results:** We have proposed a simulation model which implements various modes of information exchange between the sensor devices and the server: polling, interrupts and multiple access. The model allows you to estimate the probabilistic-temporal characteristics of the information exchange, taking into account the stochastic nature of the access of the sensor devices to the server and the probability of conflicts. **Practical relevance:** The model can be used at early stages of developing IoT systems for determining the actual conditions of their functioning.

Keywords — Internet of Things, Stochastic Process of Data Transfer, Access to Shared Resources, Conflict, Polling Mode, Interrupt Mode, Multiple Access, Number of Sensors in a Cluster, Simulation Model, Model Experiment.

References

- Hersent O., Boswarthick D., Elloumi O. *The Internet of Things: Key Applications and Protocols*. Wiley, 2012. 370 p.
- Recommendation Y.2060: Overview of Internet of Things. Geneva, ITU-T, February 2012. Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-1> (accessed 26 January 2017).
- Recommendation Y.2069: Framework of the WEB of Things. Geneva, ITU-T, July 2012. Available at: <http://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2069-201207-1> (accessed 26 January 2017).
- Rosljakov A. V., Vanjashin S. V., Grebeshkov A. Ju., Samsonov M. Ju. *Internet Veshhej* [The Internet of Things]. Samara, PGUTI Publ., 2014. 342 p. (In Russian).
- Kolbanev M. O., Tatarnikova T. M. Physical Resources of Information Processes and Technologies. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2014, no. 6, pp. 113–122 (In Russian).
- Galinina O., Andreev S., Mikhaylov K., Turlikov A. Wireless Sensor Network Based Smart Home System over BLE with Energy Harvesting Capability. *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, vol. 8638, pp. 419–432.
- Alhakami A., Tatarnikova T. M. Likelihood-time Characteristics Estimation of Storage Area Networks. *Programmye produkty i sistemy* [Software & System], 2009, no. 4, pp. 177–180 (In Russian).
- Daniel Kellmerit. *The Silent Intelligence: The Internet of Things*. Publisher: DND Ventures LLC, 2013. 454 p.
- Tatarnikova T. M. Structural Synthesis of an Interface Center for Corporate Networks. *Informatsionno-upravlyayushhie systemy* [Information and Control System], 2015, no. 3, pp. 92–98 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.92
- Markovich N. M., Krieger U. R. Statistical Analysis and Modeling of Peer-to-Peer Multimedia Traffic. *Lecture Notes in Computer Science*, 2011, vol. 5233, pp. 70–97.
- Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V. Evaluation of Reliability Performance Cluster Real-Time Query. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2014, no. 4, pp. 46–48 (In Russian).
- Kutuzov O. I., Tatarnikova T. M. *Infokommunikatsionnye seti. Modelirovanie i otsenka veroiatnostno-vremennykh kharakteristik* [Infocommunication Network. Modeling and Evaluation of Probabilistic-time Characteristics]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2015. 382 p. (In Russian).
- Krouk E. A., Ovchinnikov A. A. Metrics for Distributed Systems. *Proc. of XIV Intern. Symp. on Problems of Redundancy in Information and Control Systems*, Saint-Petersburg, 2014, pp. 66–70.
- Tatarnikova T. M., Elizarov M. A. Virtual Channel Simulation Model. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2016, vol. 16, no. 6, pp. 1120–1127 (In Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-6-1120-1127
- Tatarnikova T. M., Yagotinceva N. V. Evolution of Functional Reliability of Shipboard Network. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2014, no. 9, pp. 62–66 (In Russian).

ОПЕРАЦИОННО-ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ИХ РЕСУРСОВ

С. А. Карина^а, канд. воен. наук, доцент

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: улучшение информативных возможностей современных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, а также увеличение числа территориально распределенных объектов, события на которых представляют интерес для мониторинга, с одной стороны, и принципиальная ограниченность возможностей систем, обеспечивающих обработку поступающих геопространственных данных, с другой стороны, требуют оперативного перераспределения ресурсов систем в целях повышения полноты решения стоящих перед ними задач. **Цель:** разработка операционно-временной модели функционирования систем комплексной обработки геопространственных данных, которая будет учитывать коэффициент относительной значимости возникающих событий и позволит разработать эффективные методы оперативного управления ресурсами таких систем. **Результаты:** определен показатель качества функционирования системы комплексной обработки геопространственных данных, который характеризует полноту решения стоящих перед ней задач в заданный промежуток времени и учитывает значимость возникающих событий. Разработана операционно-временная модель функционирования такой системы, которая учитывает коэффициент относительной значимости возникающих событий и время запаздывания реакции на них. Предложены взаимодополняющие друг друга подходы к управлению ресурсами таких систем. Первый из них заключается в прогнозировании возникновения новых событий на основе информации об уже произошедших, а второй — в перераспределении ресурсов на решение задач по реагированию на события с учетом их относительной значимости. **Практическая значимость:** предложенная операционно-временная модель позволит существенно повысить эффективность применения систем комплексной обработки геопространственных данных и при этом снизить затраты на их эксплуатацию, поскольку является основой для разработки эффективных методов оперативного управления ресурсами комплексной обработки в условиях их дефицита.

Ключевые слова — геопространственные данные, дистанционное зондирование Земли, рациональное распределение ресурсов, комплексная обработка, базы знаний, управление с прогнозированием.

Введение

В настоящее время средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического и воздушного базирования являются основным источником информации для решения расчетных и аналитических задач в интересах органов государственного и муниципального управления, связанных с мониторингом (исследованием) пространственных территориально распределенных объектов. Эти средства предоставляют до 80 % всех требуемых данных, при этом их потенциал продолжает возрастать [1, 2]. В качестве таких территориально распределенных объектов мониторинга (ОМ) могут выступать элементы городской инфраструктуры, лесные массивы, сельскохозяйственные угодья, объекты оборонно-промышленного комплекса, потенциально опасные объекты на территории муниципальных образований (склады с химически опасными компонентами, дамбы, нефтяные хранилища, промышленные предприятия) и т. п. Все вместе они составляют единую систему промышленного потенциала страны.

Обработка данных ДЗЗ, осуществляемая в указанных целях, представляется совокупностью взаимосвязанных операций в рамках единого технологического цикла (ЕТЦ). Каждая

операция выполняется одним или несколькими ресурсами, при этом результаты работы одного ресурса являются исходными данными для других. В качестве таких ресурсов могут выступать специализированные комплексы автоматизации; тематические базы и банки данных, в которых накапливаются «сырые» данные и результаты их обработки; подразделения и организации, осуществляющие отдельные сложные этапы специальной обработки в рамках ЕТЦ. При этом в совокупности они составляют единую систему комплексной обработки геопространственных данных (СКО ГПД) [3, 4].

Формулировка задачи рационального распределения ресурсов СКО ГПД

Основными задачами ЕТЦ комплексной обработки ГПД является мониторинг событий (реагирование на события), которые происходят на соответствующих ОМ. Результатами работы СКО ГПД являются разрабатываемые информационные документы и аналитические справки, которые содержат сведения, необходимые для управления этими объектами. При этом полагается, что для решения задачи реагирования на одно событие на одном ОМ требуется разработка одного документа.

Важнейшей особенностью ЕТЦ комплексной обработки ГПД является территориально распределенный характер ресурсов, входящих в СКО ГПД [3, 4].

Рассмотрим одну из основных составляющих ЕТЦ комплексной обработки ГПД — управление ресурсами СКО ГПД в целях поддержания устойчивости ее функционирования в любых условиях.

Качество функционирования СКО ГПД можно описать совокупностью следующих взаимосвязанных критериев:

1) количеством $\tilde{u}(\Delta t)$ зафиксированных событий $\{\tilde{s}_i\}$ на ОМ за период времени Δt ;

2) временем τ , требуемым на разработку одного информационного документа.

Также следует ввести комплексный показатель, характеризующий полноту решения задач системой комплексной обработки ГПД в заданный промежуток времени:

$$p(\Delta t) = \frac{\tilde{u}(\Delta t)}{u(\Delta t)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $u(\Delta t)$ — количество реально произошедших событий $\{s_i\}$ за период Δt .

Таким образом, управление ресурсами СКО ГПД сводится к проблеме рационального их распределения между решаемыми задачами таким образом, чтобы показатель $p(\Delta t)$ был максимальным (стремился к 100 %).

Однако в реальности показатель $p(\Delta t)$ в формуле (1) не может в полной мере характеризовать качество функционирования СКО ГПД, поскольку не учитывает такую характеристику, как относительная значимость зафиксированных событий.

По аналогии с подходом, предложенным в работе [5], пусть события на ОМ разделяются на M типов. Значимость ξ_m каждого типа события может определяться номером m его типа или величиной, пропорциональной m . Коэффициент пропорциональности удобно выбрать из условия, что сумма значимостей событий всех типов нормирована на 1:

$$\sum_{m=1}^M (\xi_m) = 1.$$

В итоге качество функционирования СКО ГПД можно охарактеризовать комплексным показателем $P(\Delta t)$, который учитывает значимость зафиксированных событий и определяется следующим образом:

$$P(\Delta t) = \frac{\tilde{U}(\Delta t)}{U(\Delta t)} \cdot 100\% = \frac{\sum_{m=1}^M (\xi_m \tilde{u}_m)}{\sum_{m=1}^M (\xi_m u_m)} \cdot 100\%,$$

где $\tilde{U}(\Delta t)$ — количество зафиксированных событий на ОМ за заданный период времени с учетом

их относительной значимости; $U(\Delta t)$ — количество реально произошедших событий за тот же период. При этом \tilde{u}_m определяется как количество зафиксированных $\{\tilde{s}_{m_i}\}$, а u_m — как количество произошедших $\{s_{m_i}\}$ событий заданного типа.

Сформулируем задачу рационального распределения ресурсов СКО ГПД следующим образом.

Пусть на вход СКО ГПД поступают задачи по реагированию на события разной степени значимости. Частоту поступления задач можно описать нормальным законом распределения. Каждая задача для своего решения требует подключения определенных ресурсов. Необходимо осуществить перераспределение ресурсов системы таким образом, чтобы обеспечить максимально возможное значение комплексного показателя $P(\Delta t) \rightarrow \max$.

Решение этой задачи видится в одновременном применении следующих подходов:

1) распределению ресурсов СКО ГПД в условиях их дефицита на решение задач по реагированию на события разных типов с учетом их относительной значимости;

2) минимизации общего времени τ , требуемого для решения задачи по реагированию на очередное событие m -го типа.

Разработка операционно-временной модели функционирования СКО ГПД

Задача рационального распределения ресурсов СКО ГПД отнесена к предметной области систем массового обслуживания. Но в данном случае это не просто система массового обслуживания с фиксированным набором параметров, а управляемая система с прогнозированием.

Пусть для решения задач в СКО ГПД существует N типов ресурсов. Потребности в ресурсах задаются матрицей $\mathbf{R} = \{r_{nm}\}$, $n = 1, N$, $m = 1, M$. При этом элементы матрицы определяют потребность задачи m -го типа в n -м ресурсе. Доступность ресурсов определяется вектором $\sigma = \{\sigma_n\}$, $n = 1, N$.

Обобщенная схема функционирования такой системы представлена на рис. 1.

Физический смысл элементов r_{nm} заключается в том, что они представляют собой двойку, включающую время τ_{nm} , которое тратится ресурсом для получения соответствующего результата на заданном этапе комплексной обработки, и степень χ_{nm} вклада ресурса в «общее дело»:

$$r_{nm} = \{\tau_{nm}, \chi_{nm}\}; 0 \leq \chi_{nm} \leq 1; \sum_{n=1}^N \chi_{nm} = 1.$$

Введение параметра χ_{nm} обосновано тем, что позволяет исключить из процесса решения m -й задачи в случае сильной загруженности СКО ГПД необязательный n -й ресурс, когда он требует значительного времени, а его вклад невелик.



■ **Рис. 1.** Обобщенная схема функционирования СКО ГПД

Параметр τ_{nm} определяется в соответствии со следующей формулой:

$$\tau_{nm} = \tau_{nm_1} + \tau_{nm_2} + \tau_{nm_3} + \tau_{nm_4}, \quad (2)$$

где τ_{nm_1} — время передачи n -му ресурсу при решении m -й задачи исходных данных от предыдущего ресурса (с учетом фактора их территориальной распределенности) [4, 6]; τ_{nm_2} — время поиска данных, которые могут потребоваться n -му ресурсу на данном этапе решения m -й задачи, в базах данных всех известных ресурсов $\{r_n\}$ (также с учетом фактора их территориальной распределенности и разнородности структур обрабатываемых в них данных) [4]; τ_{nm_3} — время, непосредственно затрачиваемое n -м ресурсом на процедуру выполнения текущего этапа решения m -й задачи; τ_{nm_4} — время, затрачиваемое n -м ресурсом на передачу результатов своей работы следующему ресурсу в цепочке.

Практика показывает, что указанные компоненты τ_{nm_i} в формуле (2) имеют различный «удельный вес», причем он зависит как от степени территориальной распределенности ресурсов, участвующих в решении задачи, так и от уровня автоматизации подсистем, обеспечивающих получение и поиск требуемых исходных данных. Наиболее распространенный случай предполагает, что передача исходных данных ресурсу, а также получение результатов его работы требуют информационного обмена по нестабильным каналам связи с низкой пропускной способностью. Примерами таких каналов могут выступать каналы передачи данных с космических аппаратов ДЗЗ посредством спутников-ретрансляторов, интернет-каналы, ведомственные территориально распределенные сети и т. д. Поиск необходимой ресурсу информации в тематических базах данных предполагает не автоматический, а автоматизированный или ручной режим работы.

При этом «накладные» расходы, не относящиеся непосредственно к решению задачи (времена τ_{nm_1} , τ_{nm_2} , τ_{nm_4}), будут составлять не менее 50 % всего времени, которое тратится ресурсом для получения результата на заданном этапе комплексной обработки (время τ_{nm}).

Кроме того, при значительном числе задач, которые в заданный период времени необходимо решать территориально распределенным ресурсам СКО ГПД (т. е. в период ее сильной загруженности, определяемой в первую очередь объемами добываемых и обрабатываемых данных), затраты на «накладные» расходы растут нелинейно. Так, на рис. 2 показана зависимость временных затрат на учет, первичную обработку (рис. 2, а), поиск и актуализацию (рис. 2, б) ГПД от их объемов. При этом среди основных причин нелинейного характера рассматриваемой зависимости необходимо выделить:

- во-первых, неоднородность информационных структур данных, хранящихся в разных тематических базах данных (как на разных уровнях, так и на одном уровне), которая приводит к необходимости ручного или полуавтоматического преобразования исходных данных к нужному формату, а также к значительным временным затратам при поиске требуемой информации;

- во-вторых, ручной способ ввода данных на этапах учета и первичной обработки, обусловленный отсутствием автоматизированных средств информационного взаимодействия между различными программно-техническими средствами, при помощи которых осуществляется сбор, систематизация и хранение данных;

- в-третьих, наличие так называемого «человеческого фактора» при ручном вводе данных, который обуславливает возникновение ошибок, кроме того, при значительном росте объемов данных, которые необходимо обработать, растет усталость операторов, и риск появления ошибок только увеличивается.

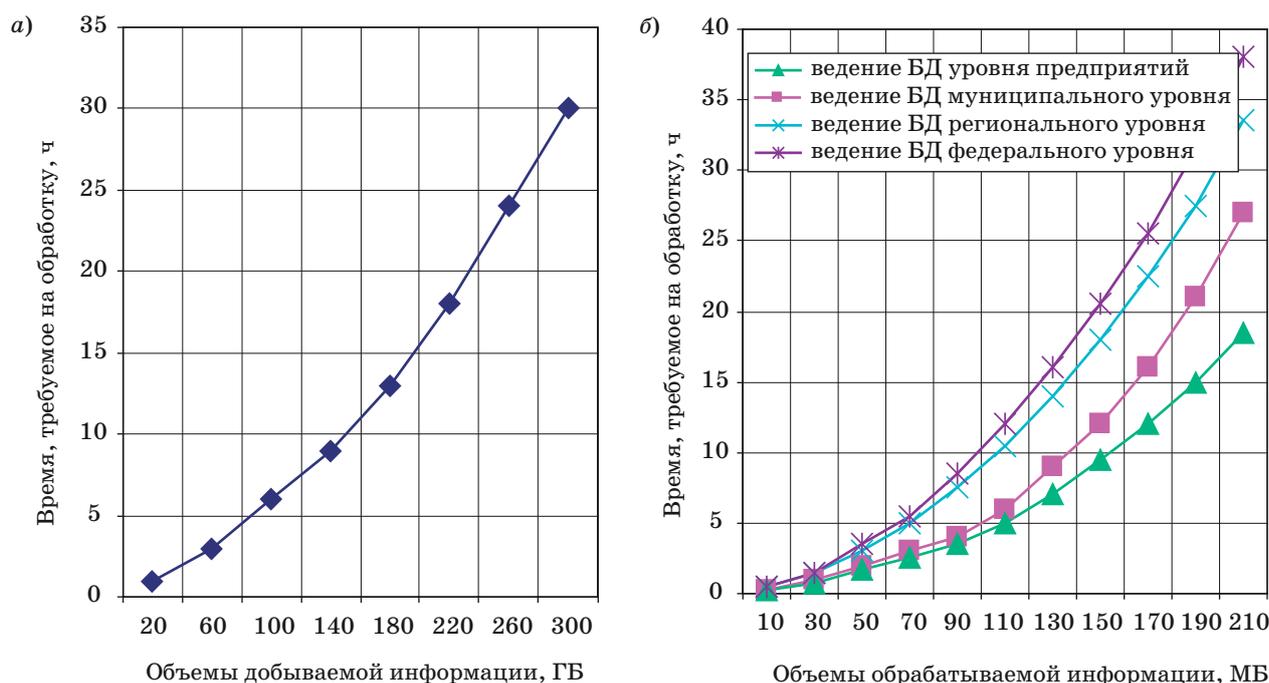


Рис. 2. Время, затрачиваемое на учет, первичную обработку (а), поиск и актуализацию (б) ГПД

Стоит отметить, что для расчета времени, в целом затрачиваемого на решение задачи реагирования на событие m -го типа, не достаточно просуммировать времена τ_{nm} . Это связано с тем, что всегда существует задержка между моментом времени, когда событие произошло, и моментом времени, когда на него началась реакция СКО ГПД. Также в условиях ограниченности имеющихся ресурсов существует время ожидания доступности требуемого ресурса (время нахождения очереди к нему).

Время, в целом затрачиваемое на решение задачи реагирования на i -е событие m -го типа на ОМ, можно определить формулой

$$\tau_{m_i} = t_{1_i} + t_{2_i} + \sum_{n=1}^N (\omega_{nm} (\tau_{nm} + T_n)),$$

где t_{1_i} — время задержки начала реакции на i -е событие; t_{2_i} — время, отводимое на доведение результатов заинтересованным лицам; T_n — время ожидания доступности n -го ресурса (нахождения в очереди);

$$\omega_{nm} = \begin{cases} 0, & \chi_{nm} \leq X \\ 1, & \chi_{nm} > X \end{cases}$$

Кроме того, стоит отметить, что времена t_{1_i} и T_n в общем случае не являются константами и зависят от загруженности СКО ГПД.

Физический смысл параметра ω_{nm} заключается в следующем. Если значение χ_{nm} не больше некоторого настраиваемого глобального конфи-

гурационного параметра X , то n -й ресурс исключается из процесса решения m -й задачи, и время τ_{nm} не учитывается при расчете общего времени, затрачиваемого на ее решение.

Физический смысл параметра t_{1_i} заключается в том, что всегда существует разница между моментом времени, когда событие на ОМ произошло, и моментом, когда оно было зафиксировано средствами ДЗЗ и передано в СКО ГПД. Связана она с тем, что, с одной стороны, наблюдение средствами ДЗЗ за заданным объектом не является непрерывным, а носит дискретный характер, а с другой — передача данных с борта космического аппарата на пункты их приема происходит не сразу после фиксации заданного объекта мониторинга, а по заданному дискретному регламенту.

Параметр T_n определяется следующим образом:

$$T_n = \varepsilon_n \cdot F(n),$$

где $F(n)$ — процедура, определяющая время ожидания доступности ресурса n -го типа; ε_n определяет возможность наличия очереди к ресурсу n -го типа.

Значение для ε_n задается на основе анализа значения соответствующего элемента вектора $\sigma = \{\sigma_n\}$, $n = 1, N$, которое определяется исходя из следующих соображений.

Ресурсы в СКО ГПД разделяются на два класса. В первый входят ресурсы, связанные с участием в процессе обработки человека-оператора, т. е. предполагающие автоматизированный или

ручной режим работы. Для таких ресурсов изначально значение $\sigma_n > 0$. Оно уменьшается на 1, когда ресурс n -го типа назначается для решения той или иной задачи, и увеличивается на 1, когда ресурс n -го типа завершает свою работу над очередной задачей. В случае, когда $\sigma_n = 0$, считается, что такой ресурс недоступен.

Во второй класс входят ресурсы, которые функционируют без участия человека-оператора, т. е. в автоматическом режиме. Считается, что временем ожидания их доступности можно пренебречь, и они способны параллельно обслуживать решение сразу большого числа задач. Для таких ресурсов $\sigma_n = -1$. Характерными примерами таких ресурсов могут служить различные базы тематических данных, а также вычислительные сервисы, функционирующие по принципу «черного ящика».

Тем самым ε_n задается следующим образом:

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1, & \sigma_n = 0 \\ 0, & \sigma_n \neq 0 \end{cases}$$

Опишем алгоритм, реализующий функцию $F(n)$.

На шаге 1 вычисляется, для решения задач какого типа назначен каждый из имеющихся ресурсов n -го типа (вычисление матрицы W_{nm}):

$$W_{nm} = \{r_{nm}^{k_n}, \Delta\tau^{k_n}\},$$

где $r_{nm}^{k_n}$ — k -й ресурс n -го типа, $k_n = 1, K_n, K_n$ — количество ресурсов n -го типа; $\Delta\tau^{k_n}$ — время, которое уже прошло с начала решения текущей задачи k_n -м ресурсом.

На шаге 2 на основе анализа регламента (r_{nm}), задающего, сколько времени должно тратиться для решения задачи m -го типа, а также информации о том, сколько времени уже решается текущая задача каждым ресурсом n -го типа, про-

изводится их ранжирование по прогнозируемому времени ожидания их доступности и вычисляется минимальное время ожидания освобождения какого-либо ресурса n -го типа:

$$T'_n = \min_{1 \leq k_n \leq K_n} (\tau_{nm} - \Delta\tau^{k_n}).$$

На шаге 3 вычисляется количество задач s_i , которые уже находятся в очереди к ресурсу n -го типа, и вычисляется время, требуемое на прохождение данной очереди:

$$T''_n = \sum_i \tau_{nm}^i.$$

На шаге 4 вычисляется общее время T_n ожидания доступности ресурса n -го типа:

$$T_n = T'_n + T''_n.$$

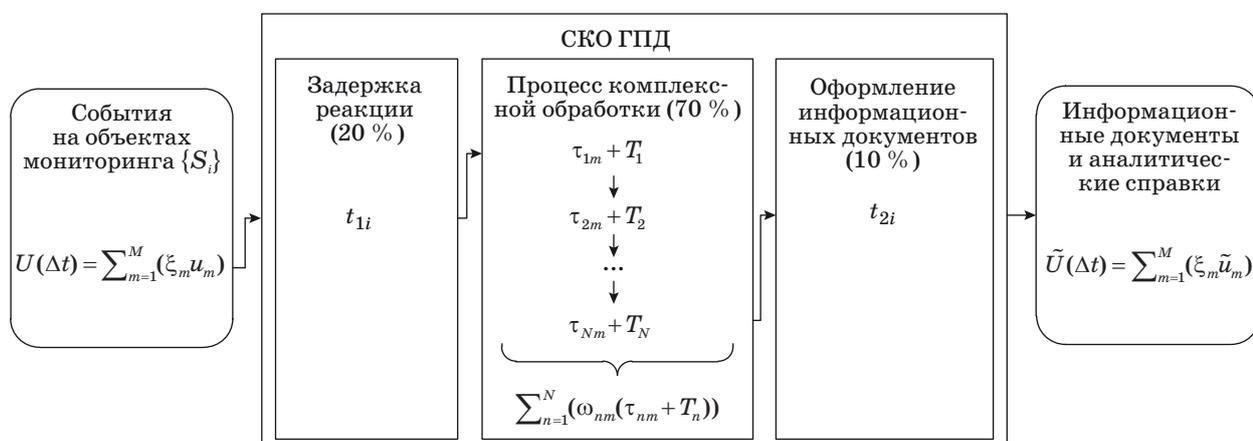
Схема операционно-временной модели функционирования системы комплексной обработки геопространственных данных представлена на рис. 3. Данная модель позволяет оценить затраты времени на основные этапы функционирования СКО ГПД.

С учетом разработанной операционно-временной модели функционирования СКО ГПД подходы к решению задачи рационального распределения ее ресурсов могут быть переформулированы следующим образом:

— во-первых, минимизация общего времени τ_{mi} , требуемого для решения очередной задачи m -го типа;

— во-вторых, перераспределение ресурсов СКО ГПД в условиях их дефицита на решение задач по реагированию на события с учетом их относительной значимости.

В рамках первого подхода необходимо констатировать, что модель функционирования существующей СКО ГПД имеет ярко выраженный ре-



■ Рис. 3. Схема операционно-временной модели функционирования СКО ГПД

активный характер, который заключается в том, что деятельность ее ресурсов либо является стационарной (плановой), либо является результатом реакции на события, произошедшие на объектах мониторинга (причем если их удалось зафиксировать средствами наблюдения). Такая модель никак не учитывает характер развития ситуаций в пространстве объектов мониторинга. Тот факт, что СКО ГПД функционирует в рамках такой модели, приводит к тому, что она всегда будет опаздывать за развитием ситуации и находиться в роли догоняющего.

Таким образом, первый подход заключается в интеллектуализации процесса функционирования СКО ГПД на основе применения баз знаний интеллектуальных систем [7–9], а именно в переходе от реактивных моделей и методов ведения мониторинга к *проактивным*, которые будут способны:

— во-первых, предвидеть возможные варианты развития ситуаций в пространстве объектов мониторинга (т. е. возникновения на них новых событий, причиной которых служат уже произошедшие события на других объектах мониторинга), в том числе в условиях неполноты информации о них [9, 10];

— во-вторых, ограничить степень участия человека в цикле управления ресурсами комплексной обработки, а также автоматически предлага-

вать варианты формирования сценариев решения задач мониторинга [11, 12].

В рамках второго подхода необходимо учесть тот факт, что событие, имеющее небольшое значение коэффициента относительной значимости, в итоге может служить причиной возникновения событий с высоким значением этого коэффициента. Тем самым с учетом положений первого подхода необходимо динамически изменять (повышать) коэффициент относительной значимости таких событий в процессе функционирования СКО ГПД.

Заключение

Следует ожидать, что использование предложенных взаимодополняющих подходов к управлению ресурсами СКО ГПД при решении задач мониторинга территориально распределенных объектов позволит существенно уменьшить время реагирования на каждое возникающее событие и тем самым повысить качество функционирования СКО ГПД в целом. При этом центральным звеном в предложенных подходах будет являться система прогнозирования возникновения событий на ОМ. Решающую роль в адекватности прогнозирования будут играть качество и полнота базы знаний о ситуациях в пространстве объектов мониторинга. Однако детальное изучение этого вопроса является предметом отдельного исследования.

Литература

1. Севастьянов Н. Н., Бранец В. Н., Панченко В. А. и др. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли // Тр. МФТИ. 2009. Т. 1. № 3. С. 14–22.
2. Макриденко Л. А., Волков С. Н., Ходненко В. П. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов // Вопросы электро-механики. 2010. Т. 114. С. 15–26.
3. Карин С. А. Интеграция в едином информационном пространстве разнородных геопространственных данных // Информационно-управляющие системы. 2012. № 2. С. 89–94.
4. Карин С. А. Построение предметно-ориентированной онтологии в системах обработки пространственных данных // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4. С. 78–84.
5. Белоусов С. М. Математическая модель многопоточной системы массового обслуживания, управляемой планировщиком ресурсов // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. Информационные технологии. 2006. Т. 4. № 1. С. 14–26.
6. Карин С. А., Дудин Е. А. Подходы к созданию распределенной системы сбора, хранения и обработки геопространственных данных // Информация и космос. 2014. № 3. С. 46–51.
7. Найханова Л. В. Технология создания методов автоматического построения онтологий с применением генетического и автоматного программирования: монография. — Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2008. — 244 с.
8. Бениаминов Е. М. Алгебраические методы в теории баз данных и представлении знаний. — М.: Научный мир, 2003. — 184 с.
9. Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. — СПб.: Питер, 2000. — 384 с.
10. Калиниченко Л. А. Машины баз данных и знаний. — М.: Наука, 1990. — 296 с.
11. Берзин Е. А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем. — М.: Сов. радио, 1974. — 304 с.
12. Лапшин В. А. Онтологии в компьютерных системах. — М.: Научный мир, 2010. — 224 с.

UDC 528.83

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.51

Operational and Temporal Model of Complex Geospatial Data Processing Systems with Insufficient ResourcesKarin S. A.^a, PhD, Mil., Associate Professor, sergey.karin@gmail.com^aA. F. Mozhayskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197082, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Improving the information capabilities of modern remote sensing satellites and increasing the number of geographically distributed objects whose events can be interesting for the monitoring are fundamentally limited by the possibilities of the geospatial data processing systems. Therefore, the system resources should be rapidly reallocated in order to solve all the problems more exhaustively. **Purpose:** To develop an operational and temporal model for the functioning of complex geospatial data processing systems, which would take into account the coefficient of relative importance of the incoming events and allow you to develop effective methods of operational management of such systems. **Results:** We have determined a quality score for the functioning of a geospatial data integrated processing system. It characterizes the completeness of solving the problems within a specified period of time, taking into account the event significance. An operational and temporal model has been developed for the functioning of such a system, which takes into account the coefficient of relative importance of incoming events and the delays in responses to them. Mutually complementary approaches have been proposed to the resource management of such systems. The first one is predicting the emergence of new events on the base of the information about the previous events. The second one is the redistribution of resources in order to meet the challenges in responding to the events according to their relative importance. **Practical relevance:** The proposed operational and temporal model can significantly improve the effectiveness of integrated geospatial data processing systems and thus reduce the cost of their operation, as it is the basis for developing efficient methods of operative management of complex processing resources when these resources are insufficient.

Keywords — Geospatial Data, Earth Remote Sensing, Rational Allocation of Resources, Complex Data Processing, Knowledge Base, Feedforward Control.

References

1. Sevast'ianov N. N., Branets V. N., Panchenko V. A., et al. Analysis of the Current Capabilities of Small Satellites to Create a Remote Sensing. *Trudy MFTI*, 2009, vol. 1, no. 3, pp. 14–22 (In Russian).
2. Makridenko L. A., Volkov S. N., Khodnenko V. P. Conceptual Questions of Creation and Application of Small Satellites. *Voprosy elektromekhaniki*, 2010, vol. 114, pp. 15–26 (In Russian).
3. Karin S. A. Integration in the Single Information Space of Heterogeneous Geospatial Data. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 2, pp. 89–94 (In Russian).
4. Karin S. A. Construction of the Domain-Dpecific Ontologies in Spatial Data Processing Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 4, pp. 78–84 (In Russian).
5. Belousov S. M. Mathematical Model of a Multi-threaded Queuing System, Controlled by the Scheduler Resources. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Informatsionnye tekhnologii*, 2006, vol. 4, no. 1, pp. 14–26 (In Russian).
6. Karin S. A., Dudin E. A. Approaches to the Creation of a Distributed System for the Collection, Storage and Retrieval of Geospatial Data. *Informatsiia i kosmos*, 2014, no. 3, pp. 46–51 (In Russian).
7. Naikhanova L. V. *Tekhnologiia sozdaniia metodov avtomaticheskogo postroeniia ontologii s primeneniem geneticheskogo i avtomatnogo programmirovaniia* [Technology for Creating Methods of Automatic Construction of Ontologies Using Genetic Programming and Automata]. Ulan-Ude, BNTs SO RAN Publ., 2008. 244 p. (In Russian).
8. Beniaminov E. M. *Algebraicheskie metody v teorii baz dannykh i predstavlenii znanii* [Algebraic Methods in the Theory of Databases and Knowledge Representation]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2003. 184 p. (In Russian).
9. Gavrilova T. A., Khoroshevskii V. F. *Bazy znanii intellektual'nykh sistem* [Knowledge Databases in Intelligent Systems]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2000. 384 p. (In Russian).
10. Kalinichenko L. A. *Mashiny baz dannykh i znanii* [Data and Knowledge Base Machines]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 296 p. (In Russian).
11. Berzin E. A. *Optimal'noe raspredelenie resursov i elementy sinteza sistem* [Optimal Allocation of Resources and Elements of Synthesis of Systems]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 304 p. (In Russian).
12. Lapshin V. A. *Ontologii v komp'iuternykh sistemakh* [Ontology in Computer Systems]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2010. 224 p. (In Russian).

ОБ ОДНОЙ КОНСТРУКЦИИ КОДОВ С МАЛОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПРОВЕРЕК НА ЧЕТНОСТЬ С ЦИКЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ МАКРОБЛОКОВ

Д. О. Иванов^а, инженер-программист

А. В. Козлов^а, ведущий инженер-программист

А. А. Овчинников^а, канд. техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: современные инфокоммуникационные системы требуют достижения высоких скоростей передачи информации с обеспечением при этом высокой надежности, т. е. низкого уровня вероятности ошибки. Для борьбы с помехами, возникающими в канале связи, традиционно используют коды, исправляющие ошибки. Одним из наиболее мощных и одновременно эффективных современных средств помехозащищенного кодирования являются коды с малой плотностью проверок на четность. Однако требование достижения крайне высоких скоростей передачи информации ставит задачу построения не просто кодов, хорошо исправляющих ошибки и имеющих простые процедуры кодирования и декодирования, а конструктивно ориентированных на возможности более эффективной реализации, в том числе аппаратной. **Цель исследования:** построение эффективных кодов с малой плотностью, структура которых позволяет оптимизировать существующие архитектуры декодеров. **Результаты:** предложена модификация конструкции кодов с малой плотностью на основе кодов Рида — Соломона, обладающая циклической структурой макроблоков. Показано, как данная структура может быть использована для оптимизации архитектуры частично параллельного декодера, основанного на многоуровневом алгоритме распространения доверия. **Практическая значимость:** предложенная конструкция и архитектура декодера позволяют достигать низких вероятностей ошибки декодирования в высокоскоростных системах передачи информации (таких, например, как оптические каналы связи).

Ключевые слова — коды с малой плотностью проверок на четность, коды с циклической структурой макроблоков, многоуровневый алгоритм распространения доверия, архитектура частично параллельных декодеров.

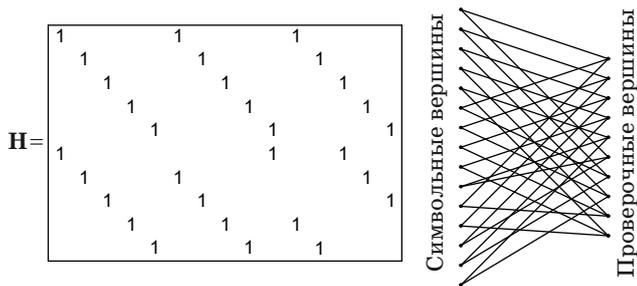
Введение

Коды с малой плотностью проверок на четность (low-density parity-check codes — LDPC) были предложены Р. Галлагером в ранних 60-х годах прошлого века [1, 2], однако были забыты вплоть до конца столетия, так как эффективность этих кодов начинает существенно проявляться с увеличением их длины, сегодня достигая значений от тысяч до сотен тысяч бит, а вычислительные возможности того времени не позволяли работать с такими длинами. С ростом производительности вычислительной техники за последние 15–20 лет LDPC-коды стали одним из основных изучаемых классов помехоустойчивого кодирования, как широко распространенным в существующих стандартах связи [3–8], так и предлагаемым для использования в перспективных, таких как мобильная связь пятого поколения (5G) или оптическая проводная связь.

Проверочная матрица LDPC-кода обладает свойством разреженности, т. е. содержит малое количество ненулевых элементов. Р. Галлагер показал, что коды с таким свойством хотя и имеют, как правило, небольшое минимальное расстояние, могут достигать высоких уровней помехозащищенности, используя итеративные посимвольные алгоритмы декодирования. Такие алго-

ритмы могут использоваться как в жестком (двоичный симметричный канал — ДСК), так и в полунепрерывном каналах связи (канал с АБГШ — аддитивным белым гауссовым шумом), а также для исправления стираний. Один из самых распространенных алгоритмов декодирования для канала с АБГШ был предложен Р. Галлагером и называется алгоритмом распространения доверия (belief propagation — BP) [1, 2, 9].

Итеративные посимвольные декодеры для LDPC-кодов обычно описываются с помощью графа Таннера [10], являющегося двудольным графом, задаваемым проверочной матрицей кода как матрицей инцидентности (рис. 1). Граф Таннера состоит из двух множеств вершин, символьных и проверочных. Алгоритмы декодирования описываются как вычисление сообщений в узлах графа и пересылка вычисленных сообщений по ребрам графа. На вероятность ошибки таких декодеров могут влиять различные структуры графа, такие как длина минимального цикла (обхват графа) [11], распределение весов ребер [12–14], блокирующие и останавливающие множества [15, 16]. Простейшим ограничением, накладываемым на структуру кода, является отсутствие в графе Таннера циклов длиной 4, т. е. с учетом четности длин циклов двудольного графа обхват графа должен быть равен по меньшей мере 6.



■ **Рис. 1.** Проверочная матрица LDPC-кода и соответствующий ей граф Таннера

На сегодняшний день известно множество конструкций LDPC-кодов, однако, несмотря на наличие некоторых эвристических подходов к их построению, для получения эффективных кодов с заданными параметрами используют интенсивный компьютерный поиск и компьютерное моделирование.

Одним из самых общих подходов, сложившихся за последние годы, является использование проверочной матрицы, состоящей из блоков матриц перестановки (так называемых блочно-перестановочных конструкций), и дальнейшее ее маскирование нулевыми блоками для варьирования весовых распределений, цикловых структур графа и т. п. [11, 17]. Это позволяет строить, как правило, квазициклические коды, для которых возможны эффективные процедуры кодирования и декодирования.

Сегодня известно множество модификаций алгоритма распространения доверия, некоторые из которых призваны уменьшить вероятность ошибки декодирования, некоторые — упростить вычисления и реализацию [18–21]. Одной из таких модификаций является многоуровневый алгоритм распространения доверия (layered belief propagation — L-BP) [22, 23]. При построении архитектур декодеров актуальными являются так называемые частично параллельные декодеры, использующие компромисс между выигрышем от распараллеливания и количеством вычислительных элементов. В данной статье рассматриваются блочно-перестановочные конструкции LDPC-кодов, обладающие дополнительным свойством — циклической структурой макроблоков в проверочной матрице. На основе этой структуры рассматривается упрощение архитектуры частично параллельного декодера для алгоритма L-BP.

Блочно-перестановочные коды, основанные на кодах Рида — Соломона

В последние годы одним из наиболее исследуемых и применяемых подходов к построению LDPC-кодов является использование так называемой блочно-перестановочной конструкции [11,

17, 24, 25]. Основой такой конструкции является проверочная матрица кода, имеющая вид

$$H = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1\rho} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2\rho} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{\gamma 1} & C_{\gamma 2} & \dots & C_{\gamma\rho} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $C_{i,j}$ — произвольные подматрицы. Чаще всего в качестве подматриц выбираются перестановочные матрицы, если же они являются степенями матрицы циклической перестановки

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

то коды, задаваемые (1), являются квазициклическими, что облегчает процедуры кодирования и декодирования, а также задает структуру для комбинаторного анализа таких кодов. Коды, задаваемые матрицей (1), являются регулярными LDPC-кодами с весом столбца γ и весом строки ρ , однако, заменив некоторые подматрицы в (1) на нулевые (такая процедура называется маскированием), можно получить нерегулярные коды, что позволяет улучшить качество работы итеративного декодера.

В работе [26] предложена следующая комбинаторная конструкция для построения блочно-перестановочных LDPC-кодов на основе кодов Рида — Соломона (RS-LDPC). Рассмотрим код Рида — Соломона (РС) над полем $GF(q)$ длиной $n = q - 1$ с двумя информационными символами. Известно [27, 28], что такой код имеет минимальное расстояние $d_{PC} = n - 1$, это значит, что любые два кодовых слова либо различны во всех позициях, либо совпадают не более чем в одной позиции. В дальнейшем будем рассматривать укороченный РС-код длиной ρ , где $\rho \leq n$. Будем считать, что элементы поля $GF(q)$ заданы целыми числами $\{0, 1, 2, \dots, q - 1\}$, где 0 и 1 — ноль и единица поля, а для всех остальных чисел справедливо $i = \alpha^{i-1}$, α — примитивный элемент поля.

Из укороченного $(\rho, 2)$ РС-кода выберем кодовое слово \mathbf{a} веса ρ и составим множество

$$C_1 = \{\beta \mathbf{a} : \beta \in GF(q), \beta \neq 0, 1\}.$$

Множество C_1 состоит из q векторов веса ρ , любая пара векторов различается во всех позициях. Разобьем линейное векторное пространство C , состоящее из кодовых слов $(\rho, 2)$ РС-кода, на смежные классы $C_i, i = 2, \dots, q$ по пространству C_1 . Для элемента $\alpha \in GF(q)$ зададим характеристический вектор $\mathbf{c}(\alpha)$ длиной q с единицей на позиции α

и нулями на всех остальных позициях. Пусть $a_{t,j}(s)$ — j -й символ ($j = 0, \dots, \rho - 1$) s -го вектора ($s = 1, \dots, q$) смежного класса C_t , тогда сформируем матрицу $H^{(t)}$ следующим образом:

$$H^{(t)} = \begin{bmatrix} c(a_{t,0}(1)) & c(a_{t,1}(1)) & \dots & c(a_{t,\rho-1}(1)) \\ c(a_{t,0}(2)) & c(a_{t,1}(2)) & \dots & c(a_{t,\rho-1}(2)) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c(a_{t,0}(q)) & c(a_{t,1}(q)) & \dots & c(a_{t,\rho-1}(q)) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Зададим проверочную матрицу RS-LDPC-кода как

$$H = \begin{bmatrix} H^{(1)} \\ H^{(2)} \\ \dots \\ H^{(\gamma)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Такой код является регулярным LDPC-кодом с весом строк ρ и весом столбцов γ . По построению обхват графа Таннера для этого кода не менее 6. Из (1) и (2) матрица H состоит из блоков

$$C_{i,j} = \begin{bmatrix} c(a_{j,i}(1)) \\ c(a_{j,i}(2)) \\ \dots \\ c(a_{j,i}(q)) \end{bmatrix},$$

являющихся матрицами перестановки. В следующем разделе мы покажем, как на основе этой конструкции можно построить квазициклические LDPC-коды, обладающие циклической структурой макроблоков.

Макроблоковые LDPC-коды на основе RS-LDPC-кодов

Рассмотрим модификацию конструкции RS-LDPC, описанной в предыдущем разделе. Как и ранее, конструкция основана на $(n, 2)$ РС-коде над полем $GF(q)$, $n = q - 1$. Код Рида — Соломона имеет подкод, являющийся кодом с повторением, состоящий из кодовых слов

$$\begin{aligned} c_1 &= (0, 0, \dots, 0), \\ c_2 &= (1, 1, \dots, 1), \\ &\dots \\ c_q &= (q - 1, q - 1, \dots, q - 1). \end{aligned}$$

Возьмем любое кодовое слово \mathbf{a} кода РС, не принадлежащее коду с повторением, и сформируем матрицу

$$X = \begin{bmatrix} \mathbf{a} + c_1 \\ \mathbf{a} + c_2 \\ \dots \\ \mathbf{a} + c_q \end{bmatrix}.$$

Матрица X является $(q \times q - 1)$ -матрицей над $GF(q)$, ее строками являются кодовые слова РС-кода вследствие линейности этого кода. Пусть x_{ij} — элемент X и $\mathbf{X}_i = [x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{qi}]^T$ — i -й столбец X . Зададим

$$Y_i = \begin{bmatrix} c(x_{1i}) \\ c(x_{2i}) \\ \dots \\ c(x_{qi}) \end{bmatrix},$$

где $c(x_{ij})$, как и ранее, — характеристический вектор элемента $x_{ij} \in GF(q)$. Заметим, что все элементы \mathbf{X}_i различны по построению, и Y_i — $(q \times q)$ -матрица перестановки, которую мы будем называть «блоком». Более того, если q — простое число, то Y_i является матрицей циклической перестановки. Сформируем $(q \times q(q - 1))$ -матрицу

$$Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_{q-1}],$$

полностью определяемую выбором первоначального кодового слова \mathbf{a} . Обозначим это кодовое слово как $\mathbf{a}^{(1)} = \mathbf{a}$, и $Y^{(1)} = Y$.

Выберем теперь значение γ , являющееся делителем $q - 1$. Так как РС-код является циклическим кодом, вектор $\mathbf{a}^{(2)} = \mathbf{a}^{(1)} \gg \gamma$, являющийся циклическим сдвигом вектора $\mathbf{a}^{(1)}$ на γ позиций, также принадлежит коду РС. Повторяя для $\mathbf{a}^{(2)}$ описанные ранее шаги, получим матрицу $Y^{(2)}$. Заметим, что $Y^{(2)} = Y^{(1)} \gg \gamma q$. Если рассматривать матрицу $Y^{(1)}$ как состоящую из блоков Y_i , то $Y^{(2)}$ — это матрица, полученная циклическим сдвигом блоков $Y^{(1)}$ на γ позиций. Задавая $Y^{(3)} = Y^{(2)} \gg \gamma q$ и т. д., получим матрицу

$$H = \begin{bmatrix} Y^{(1)} \\ Y^{(2)} \\ \dots \\ Y^{(\gamma)} \end{bmatrix},$$

имеющую в точности γ единиц в каждом столбце и $q - 1$ единиц в каждой строке. Взяв ρ блоков-столбцов из матрицы H , $\rho \leq q - 1$, получим (γ, ρ) -регулярный LDPC-код. Представим эту матрицу в блоковом виде, отдельно выделив $(q \times q)$ -макроблоки:

$$H = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} Y_1 & \dots & Y_\gamma & Y_{\gamma+1} & \dots & Y_{2\gamma} & \dots & Y_{q-\gamma} & \dots & Y_{q-1} \\ Y_{q-\gamma} & \dots & Y_{q-1} & Y_1 & \dots & Y_\gamma & \dots & Y_{q-2\gamma} & \dots & Y_{q-\gamma-1} \\ \dots & \dots \\ Y_{\gamma+1} & \dots & Y_{2\gamma} & Y_{2\gamma+1} & \dots & Y_{3\gamma} & \dots & Y_1 & \dots & Y_\gamma \end{array} \right].$$

Перенумеровав блоки-столбцы H (состоящие из q столбцов каждый) от 1 до $q - 1$, переупоря-

дочим их в соответствии со следующей перестановкой:

$$\begin{aligned} \pi = \{ & 1, \lambda + 1, 2\lambda + 1, \dots, (\gamma - 1)\lambda + 1, \\ & 2, \lambda + 2, 2\lambda + 2, \dots, (\gamma - 1)\lambda + 2, \\ & \dots \\ & \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, q - 1 \}, \end{aligned}$$

где $\lambda = (q - 1)/\gamma$. Результат переупорядочивания даст матрицу $\mathbf{H}_{\text{Macro}}$, задающую код, эквивалентный задаваемому матрицей \mathbf{H} и дополнительно обладающий циклической макроблоковой структурой, которую мы проиллюстрируем на примере.

Пусть $\gamma = 3, \rho = 9, \lambda = 3$. Тогда

$$\mathbf{H} = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 & \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_6 & \mathbf{Y}_7 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{Y}_9 \\ \mathbf{Y}_7 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{Y}_9 & \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 & \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_6 \\ \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_6 & \mathbf{Y}_7 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{Y}_9 & \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 & \mathbf{Y}_3 \end{array} \right]$$

и $\pi = \{1, 4, 7, 2, 5, 8, 3, 6, 9\}$. Применяя эту перестановку, получим

$$\mathbf{H}_{\text{Macro}} = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_7 & \mathbf{Y}_2 & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_6 & \mathbf{Y}_9 \\ \mathbf{Y}_7 & \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{Y}_2 & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_9 & \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_6 \\ \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_7 & \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{Y}_2 & \mathbf{Y}_6 & \mathbf{Y}_9 & \mathbf{Y}_3 \end{array} \right]. \quad (4)$$

Такая структура макроблоков может использоваться для реализации эффективных схем кодирования и декодирования.

При построении блочно-перестановочных кодов, задаваемых матрицей (1), для улучшения их свойств зачастую используется процедура маскирования, т. е. замена некоторых блоков проверочной матрицы на нулевые блоки. Это не только позволяет получить нерегулярные коды с оптимизированными весами строк и столбцов, но также может приводить к улучшению цикловой структуры соответствующего графа Таннера, так как нулевые блоки могут «разрывать» циклы небольшой длины, приводя к снижению их количества и их влияния на итеративное декодирование [17]. Помимо обычной процедуры маскирования, которая может применяться для рассмотренных конструкций, отметим следующий способ внесения нулевых блоков в проверочную матрицу \mathbf{H} .

Пусть $\mathbf{Y}_1 = \mathbf{Y}_2 = \dots = \mathbf{Y}_\gamma = \mathbf{0}$, тогда в приведенном выше примере для $\gamma = 3$ получим

$$\mathbf{H} = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_6 & \mathbf{Y}_7 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{Y}_9 \\ \mathbf{Y}_7 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{Y}_9 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_6 \\ \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_6 & \mathbf{Y}_7 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{Y}_9 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{array} \right].$$

После применения перестановки π получим матрицу

$$\mathbf{H}_{\text{Macro}} = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} \mathbf{0} & \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_7 & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_6 & \mathbf{Y}_9 \\ \mathbf{Y}_7 & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_9 & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_6 \\ \mathbf{Y}_4 & \mathbf{Y}_7 & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_5 & \mathbf{Y}_8 & \mathbf{0} & \mathbf{Y}_6 & \mathbf{Y}_9 & \mathbf{0} \end{array} \right].$$

В этой матрице нулевые блоки стоят на диагоналях макроблоков, таким образом сохраняя макроблоковую структуру кода. Данный код остается регулярным LDPC-кодом.

Архитектура декодера для кодов с циклической структурой макроблоков

Для декодирования LDPC-кодов используются итеративные посимвольные декодеры, в основе большинства которых лежит алгоритм ВР [1, 2]. Однако существует множество его модификаций, нацеленных как на уменьшение вероятности ошибки декодирования, так и на упрощение его реализации. Одной из таких модификаций является алгоритм L-ВР [23, 24].

Приведем описание алгоритма L-ВР. Входом декодера являются логарифмы отношения правдоподобия (log-likelihood ratio — LLR) принятых символов. Пусть \mathbf{H} — $(r \times n)$ проверочная матрица вида (3), состоящая из γ полос, где в каждой полосе в каждом столбце содержится не более одной ненулевой позиции. Пусть каждая полоса содержит q строк. Обозначим через $N(i)$ множество индексов ненулевых позиций в i -й строке \mathbf{H} , через $M(j)$ — множество индексов ненулевых позиций в j -м столбце \mathbf{H} . Ниже приведен алгоритм L-ВР.

Вход алгоритма: LDPC-код с проверочной матрицей $\mathbf{H} = [\mathbf{H}^{(1)}, \dots, \mathbf{H}^{(\gamma)}]^T$, а также значения входных LLR λ_j для $j = 1, \dots, n$.

Инициализация: в каждой символической вершине $\Lambda_j = \lambda_j$ для $j = 1, \dots, n$. В каждой проверочной вершине $R_{ij} = 0$ для всех $j \in N(i)$ и $i \in M(j)$.

Одна итерация алгоритма: каждая итерация состоит из γ подытераций, соответствующих обработке горизонтальных полос \mathbf{H}^t , где $t = 1, \dots, \gamma$. Для каждой i -й проверки в полосе \mathbf{H}^t выполнить:

Шаг 1. Для всех $j \in N(i)$ выполнить

$$Q_{ij} = \Lambda_j - R_{ij}.$$

Шаг 2. Для всех $j \in N(i)$ выполнить

$$R_{ij} = (-1)^{|N(i)|} \prod_{j' \in N(i) \setminus j} \text{sign}(Q_{ij'}) \psi \left(\sum_{j' \in N(i) \setminus j} \psi(|Q_{ij'}|) \right),$$

где $\psi(x) = -\ln(\tanh(x/2))$.

Шаг 3. Для всех $j \in N(i)$ выполнить

$$\Lambda_j = Q_{ij} + R_{ij}.$$

Архитектуры декодеров LDPC-кодов включают в себя модуль для обработки символьных вершин VNP (variable node processor) и модуль для обработки проверочных вершин CNP (check node processor) графа Таннера. В некоторых случаях эти модули проводят вычисления в два этапа и подразделяются на FH-VNP (first-half VNP) и SH-VNP (second-half VNP) и FH-CNP и SH-CNP соответственно.

Архитектура декодера BP (и L-BP) может реализовываться в полностью параллельном режиме, однако это требует большого количества вычислительных элементов, а также приводит к низкому коэффициенту загрузки каждого элемента. Поэтому интерес представляют так называемые частично параллельные архитектуры декодирования. Рассмотрим один из возможных подходов к организации такой архитектуры для матриц вида (3).

Декодер с частичной параллелизацией по проверочным вершинам обрабатывает параллельно q проверочных вершин, т. е. содержит q модулей VNP и n модулей CNP. Обработка матрицы \mathbf{H} ведется последовательно от одной горизонтальной полосы к другой. Общая схема такой архитектуры приведена на рис. 2.

Для эффективного доступа к памяти вычисления нескольких символьных и проверочных вершин объединяются на одних процессорах. Чтобы учесть это, будем использовать обозначение λ_i вместо λ_i , а также $\Lambda_i, R_{ij}, Q_{ij}$ вместо соответствующих величин. Частично параллельная архитектура для L-BP-декодера приведена на рис. 3.

Перед началом работы декодера память, хранящая значения апостериорных LLR Λ_i , инициализируется подвекторами входных LLR λ_i , переставленными в соответствии с матрицами перестановки $C_{\gamma i}$ последней полосы матрицы \mathbf{H} (1). После окончания каждой итерации пересчитанные подвекторы LLR будут находиться в этой па-

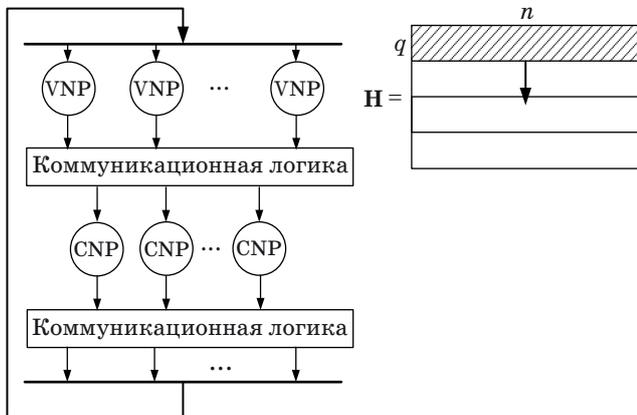


Рис. 2. Декодер с частичной параллелизацией по проверочным вершинам

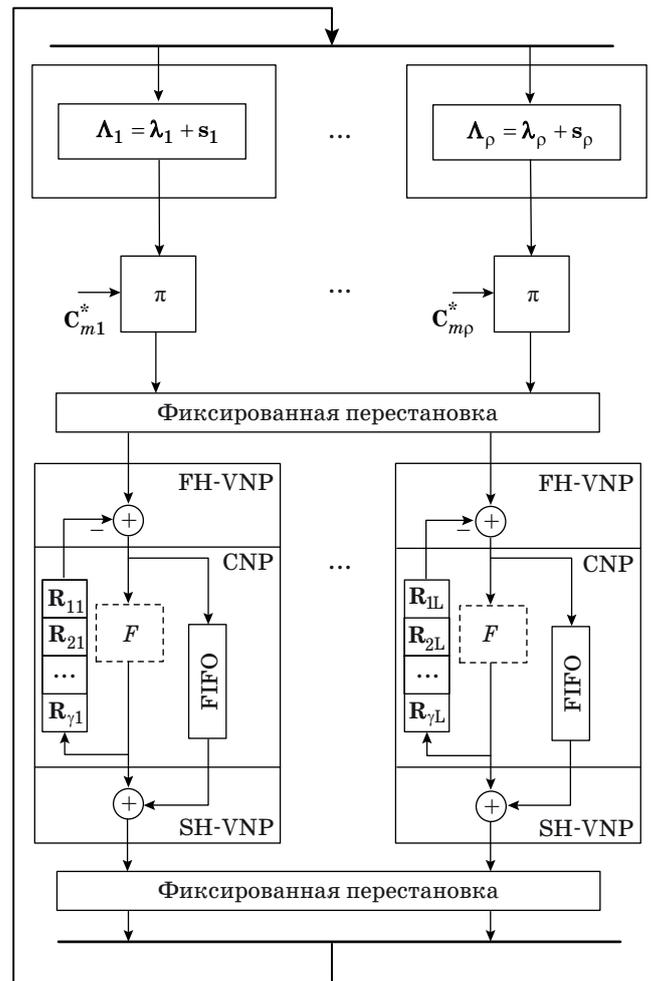


Рис. 3. Частично параллельная архитектура декодера L-BP

мяти в том же порядке, а после обработки каждой полосы (т. е. после выполнения подытерации), — в порядке, соответствующем матрицам перестановок данной полосы.

С учетом того, что после обработки $(m - 1)$ -й полосы вектор Λ_i переставлен в памяти в соответствии с перестановкой $C_{m-1,i}$, в начале обработки m -й полосы вектор Λ_i переставляется в соответствии с матрицей перестановки C_{mi}^* такой, что после ее применения вектор Λ_i окажется переставлен в соответствии с перестановкой C_{mi} . Дальнейшее вычисление символьных вершин Q_{ij} и R_{ij} происходит в FH-VNP- и CNP-процессорах, при этом дополнительно сохраняются старые значения Q_{ij} (это необходимо, чтобы SH-VNP-процессор мог обновить значения Λ_j путем добавления к ним пересчитанных значений R_{ij}).

Архитектура декодера L-BP может быть усовершенствована для кодов (4) с циклической структурой макроблоков. Основная цель модификации — полностью избавиться от программируемых перестановок и использовать только

фиксированные, что приведет к уменьшению сложности и задержки при обработке полос проверочной матрицы.

При наличии циклической структуры макроблока проверочная матрица \mathbf{H} разделена на макроблоки $(\gamma \times \gamma)$, в которых каждая строка блоков является циклическим сдвигом предыдущей. Тогда архитектура декодера L-VP может быть реализована, как представлено на рис. 4.

В отличие от обычного L-VP-декодера, память, хранящая значения апостериорных LLR Λ_i , инициализируется непереставленными подвекторами входных LLR λ_i . Памяти апостериорных LLR разбиты на группы по γ элементов в каждой. Пусть при этом эти группы перенумерованы и $p = 1, \dots, \gamma/\rho$ — номер группы. После обработки одной полосы, в отличие от обычного декодера L-VP, обновленные векторы $\Lambda_{(p-1)\gamma+i}$ попадают

не в память с номером $(p - 1)\gamma + i$, а в память с номером $((p - 1)\gamma + i) \bmod \gamma + 1$, т. е. перед записью в память циклически сдвигаются. Каждый блок памяти внутри группы соединен с фиксированной перестановкой из первой полосы матрицы \mathbf{H} . После обработки первой полосы векторы Λ_i будут размещены в блоках памяти так, что при обработке следующей полосы подвергнутся нужной фиксированной перестановке, так как следующая полоса в макроблоке является циклическим сдвигом предыдущей.

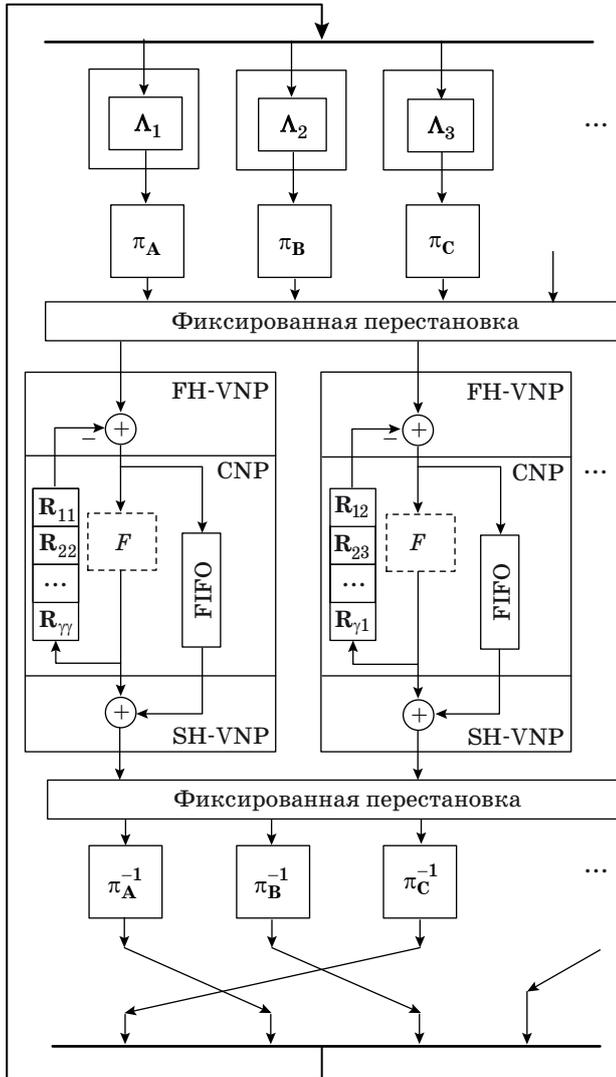
Пусть, например, $\gamma = 3$ и макроблок содержит блоки — матрицы перестановок \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{C} . В начале обработки векторы $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$ находятся в 1-, 2-, 3-м блоках памяти соответственно. При обработке первой полосы векторы $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$ подвергаются перестановкам $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ соответственно. После обработки FH-VNP-, CNP- и SH-VNP-процессорами происходит обратная перестановка, а затем $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$ попадают во 2-, 3- и 1-й блок памяти соответственно. Таким образом, при обработке следующей полосы $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$ подвергнутся перестановкам $\mathbf{C}, \mathbf{A}, \mathbf{B}$ соответственно. После обработки всех полос векторы $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3$ окажутся в исходных блоках памяти.

Результаты моделирования

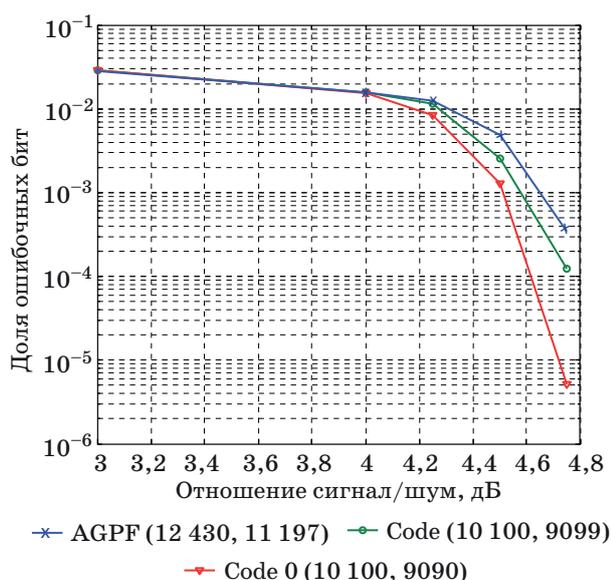
Проведем анализ результатов моделирования рассмотренных конструкций в канале с АБГШ. Так как основное преимущество предложенных модификаций — эффективность реализации в высокоскоростных системах передачи информации, выберем высокоскоростной код, например $R = 0,9$ с длиной порядка 10 000. Такие параметры соответствуют, к примеру, кодовым схемам передачи по оптоволоконным линиям [4, 8]. В качестве кода для сравнения выберем конструкцию, основанную на аддитивной группе конечного поля (additive group of prime field — AGPF) [25].

Для построения кода с циклической структурой макроблоков выберем поле $\text{GF}(101)$, $\gamma = 10$. Так как 101 — простое число, блоки проверочной матрицы представляют собой циклические перестановки, и полученный код является квазициклическим, с длиной 10 100 и количеством информационных символов 9099. Заменив диагонали макроблоков нулевыми блоками, получим квазициклический код с длиной 10 100 и количеством информационных символов 9090. Заметим, что в этом случае проверочная матрица имеет полный ранг, что может быть использовано для более эффективной процедуры кодирования [11, 29].

Результаты моделирования в канале с АБГШ приведены на рис. 5. Был использован декодер распространения доверия с 30 итерациями. Код из работы [25] обозначен как «AGPF», код



■ Рис. 4. Частично параллельная архитектура декодера L-VP для кода с циклической структурой макроблоков



■ Рис. 5. Результаты моделирования в канале с АБГШ

с циклической структурой макроблоков — как «Code», а код с маскированием нулевыми блоками — как «Code 0». Видно, что коды с цикличе-

ской структурой макроблоков превосходят код AGPF при выбранных параметрах по вероятности ошибки на информационный бит, а добавление нулевых блоков дает эффект за счет улучшения цикловой структуры графа Таннера. Вместе с этим предложенные коды позволяют построение более эффективных архитектур декодирования.

Заключение

В статье рассмотрена модификация комбинаторной конструкции кодов с малой плотностью проверок на четность, основанной на кодах Рида — Соломона, которая позволяет получать проверочную матрицу кода, обладающую свойством циклической структуры макроблоков. Для данной конструкции проведено моделирование в канале с АБГШ.

Предложен вариант частично параллельной архитектуры декодера L-ВР, использующей только фиксированные перестановки за счет наличия циклической структуры макроблоков в проверочной матрице кода. Это позволяет упростить декодирование.

Литература

- Gallager R. G. Low-Density Parity-Check Codes // IRE Transactions on Information Theory. Jan. 1962. Vol. 8. N 1. P. 21–28. doi:10.1109/TIT.1962.1057683
- Gallager R. G. Low Density Parity Check Codes. — Cambridge, MA: MIT Press, 1963. — 90 p.
- Krouk E., Semenov S., et al. Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications/Ed. by E. Krouk, S. Semenov. — John Wiley & Sons, 2011. — 680 p. doi:10.1002/9780470976777
- Djordjevic I., Ryan W., and Vasic B. Coding for Optical Channels. — Springer, 2010. — 444 p. doi:10.1007/978-1-4419-5569-2
- IEEE 802.3an-2006. Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications — Amendment: Physical Layer and Management Parameters for 10 Gb/s Operation, Type 10GBASE-T. Oct. 2006. http://www.techstreet.com/standards/ieee-802-3an-2006?product_id=1514965 (дата обращения: 25.01.2017).
- IEEE 802.16e-2005. Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems. Feb. 2006. http://www.techstreet.com/standards/ieee-802-16e-2005?product_id=1270606 (дата обращения: 25.01.2017).
- IEEE 802.11n/d1.0. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Mar. 2006. http://www.techstreet.com/standards/ieee-802-16e-2005?product_id=1270606 (дата обращения: 25.01.2017).
- ITU-T Recommendation G.975.1. Forward Error Correction for High Bit Rate DWDM Submarine Systems. Feb. 2004. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.975.1-200402-I/en> (дата обращения: 25.01.2017).
- Zyablov V. V., Pinsker M. S. Estimation of the Error-Correction Complexity for Gallager Low-Density Codes // Problems of Information Transmission. 1975. Vol. 11. N 1. P. 23–36.
- Tanner R. A Recursive Approach to Low Complexity Codes // IEEE Transactions on Information Theory. Sept. 1981. Vol. 27. N 5. P. 533–547. doi:10.1109/TIT.1981.1056404
- Lin S., Ryan W. Channel Codes: Classical and Modern. — Cambridge University Press, 2009. — 710 p.
- Richardson T. J., Urbanke R. L. The Capacity of Low-Density Parity-Check Codes Under Message-Passing Decoding // IEEE Transactions on Information Theory. Feb. 2001. Vol. 47. N 2. P. 599–618. doi:10.1109/18.910577
- Chung S.-Y., Forney G. D., Richardson T. J., Urbanke R. On the Design of Low-Density Parity-Check Codes Within 0.0045 dB of the Shannon Limit // IEEE Communications Letters. Feb. 2001. Vol. 5. N 2. P. 58–60. doi:10.1109/4234.905935
- Richardson T. J., Shokrollahi M. A., Urbanke R. L. Design of Capacity-Approaching Irregular Low-Density Parity-Check Codes // IEEE Transactions on Information Theory. Feb. 2001. Vol. 47. N 2. P. 619–637. doi:10.1109/18.910578
- Di C., Proietti D., Teletar I. E., Richardson T. J., Urbanke R. L. Finite Length Analysis of Low-Density

- Parity-Check Codes on the Binary Erasure Channels // *IEEE Transactions on Information Theory*. Jun. 2002. Vol. 48. N 6. P. 1570–1579. doi:10.1109/TIT.2002.1003839
16. Richardson T. Error Floors of LDPC Codes // Proc. 41st Allerton Conf. on Communications, Control, and Computing. Allerton House, IL, Oct. 2003. <http://web.stanford.edu/class/ee388/papers/ErrorFloors.pdf> (дата обращения: 25.01.2017).
17. Козлов А. В., Крук Е. А., Овчинников А. А. Подход к построению блочно-перестановочных кодов с малой плотностью проверок на четность // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2013. Т. 56. № 8. С. 9–14.
18. Kschischang F. R., Frey B. J., Loeliger H. A. Factor Graphs and the Sum-Product Algorithm // *IEEE Transactions on Information Theory*. Feb. 2001. Vol. 47. N 2. P. 498–519. doi:10.1109/18.910572
19. Zhang J., Fossorier M. P. C. Shuffled Iterative Decoding // *IEEE Transactions on Communications*. Feb. 2005. Vol. 53. N 2. P. 209–213. doi:10.1109/TCOMM.2004.841982
20. Park I.-C., Kang S.-H. Scheduling Algorithm for Partially Parallel Architecture of LDPC Decoder by Matrix Permutation // 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2005. Vol. 6. P. 5778–5781. doi:10.1109/ISCAS.2005.1465951
21. Yamagishi H., Noda M. High Throughput Hardware Architecture for (1440,1344) Low-Density Parity-Check Code Utilizing Quasi-Cyclic Structure // 2008 5th Intern. Symp. on Turbo Codes and Related Topics. Lausanne, 2008. P. 78–83. doi:10.1109/TURBOCODING.2008.4658676
22. Mansour M. M., Shanbhag N. R. High-Throughput LDPC Decoders // *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. Dec. 2003. Vol. 11. N 6. P. 976–996. doi:10.1109/TVLSI.2003.817545
23. Hocevar D. E. A Reduced Complexity Decoder Architecture Via Layered Decoding of LDPC Codes // *IEEE Workshop on Signal Processing Systems*. 2004. SIPS 2004. Austin, TX. P. 107–112. doi:10.1109/SIPS.2004.1363033
24. Diao Q., Huang Q., Lin S., Abdel-Ghaffar K. A Matrix-Theoretic Approach for Analyzing Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check Codes // *IEEE Transactions on Information Theory*. Jun. 2012. Vol. 58. N 6. P. 4030–4048. doi:10.1109/TIT.2012.2184834
25. Lan L., Zeng L., Tai Y. Y., Chen L., Lin S., Abdel-Ghaffar K. Construction of Quasi-Cyclic LDPC Codes for AWGN and Binary Erasure Channels: A Finite Field Approach // *IEEE Transactions on Information Theory*. Jul. 2007. Vol. 53. N 7. P. 2429–2458. doi:10.1109/TIT.2007.899516
26. Djurdjevic I., Xu J., Abdel-Ghaffar K., Lin S. A Class of Low-Density Parity-Check Codes Constructed Based on Reed–Solomon Codes with Two Information Symbols // *IEEE Communications Letters*. Jul. 2003. Vol. 7. N 7. P. 317–319. doi:10.1109/LCOMM.2003.814716
27. MacWilliams F., Sloane N. *The Theory of Error-Correcting Codes*. — North-Holland publishing company, 1983. — 782 p.
28. Kabatiansky G., Semenov S., Krouk E. *Error Correcting Coding and Security for Data Networks: Analysis of the Superchannel Concept*. — John Wiley & Sons, 2005. — 278 p. doi:10.1002/0470867574
29. Li Z., Chen L., Zeng L., Lin S., Fong W. H. Efficient Encoding of Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check Codes // *IEEE Transactions on Communications*. Jan. 2006. Vol. 54. N 1. P. 71–81. doi:10.1109/TCOMM.2005.861667

UDC 621.391.251

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.58

Low-Density Parity-Check Codes with Cyclic Structure of MacroblocsIvanov D. O.^a, Programmer Engineer, denis.ivo@vu.spb.ruKozlov A. V.^a, Senior Programmer Engineer, akozlov@vu.spb.ruOvchinnikov A. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, mldoc@vu.spb.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Modern infocommunication systems require a very high rate of data transmission with high reliability, i.e. low probability of an error. To fight the distortions in a communication channel, error-correcting codes are traditionally used. Low-density parity-check codes are one of the most powerful and effective modern error-correcting techniques. However, to attain a high rate of the transmission, it is not enough to use codes which only correct errors and have simple encoding/decoding procedures. The very construction of the codes should facilitate a more effective implementation, including the hardware level. **Purpose:** The goal is to construct effective low-density parity-check codes whose structure would allow you to optimize the existing decoder architectures. **Results:** A modification of low-density parity-check code has been proposed, based on Reed-Solomon codes. It has a cyclic structure of macroblocks. It is shown how this structure can be used to optimize the architecture of a partially parallel decoder based on a layered belief propagation algorithm. **Practical relevance:** The proposed code construction and decoder architecture allow you to achieve low error probabilities in high-rate data communication systems (e.g. optical wired lines).

Keywords — Low-Density Parity-Check Codes, Codes with Cyclic Structure of Macroblocs, Layered Belief Propagation Algorithm, Partially Parallel Decoding Architecture.

References

1. Gallager R. G. Low-Density Parity-Check Codes. *IRE Transactions on Information Theory*, Jan. 1962, vol. 8, no. 1, pp. 21–28. doi:10.1109/TIT.1962.1057683
2. Gallager R. G. *Low Density Parity Check Codes*. Cambridge, MA, MIT Press, 1963. 90 p.
3. Krouk E., Semenov S., et al. *Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications*. Ed. by E. Krouk, S. Semenov. John Wiley & Sons, 2011. 680 p. doi:10.1002/9780470976777
4. Djordjevic I., Ryan W., and Vasic B. *Coding for Optical Channels*. Springer, 2010. 444 p. doi:10.1007/978-1-4419-5569-2
5. *IEEE 802.3an-2006. Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications — Amendment: Physical Layer and Management Parameters for 10 Gb/s Operation, Type 10GBASE-T*. Oct. 2006. Available at: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.3-2015.zip> (accessed 25 January 2017).
6. *IEEE 802.16e-2005. Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*. Feb. 2006. Available at: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16e-2005.pdf> (accessed 25 January 2017).
7. *IEEE 802.11n/d1.0. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. Mar. 2006. Available at: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf> (accessed 25 January 2017).
8. *ITU-T Recommendation G.975.1. Forward Error Correction for High Bit Rate DWDM Submarine Systems*. Feb. 2004. Available at: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.975.1-200402-I/en> (accessed 25 January 2017).
9. Zyblov V. V., Pinsker M. S. Estimation of the Error-Correction Complexity for Gallager Low-Density Codes. *Problems of Information Transmission*, 1975, vol. 11, no. 1, pp. 23–36.
10. Tanner R. A Recursive Approach to Low Complexity Codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, Sept. 1981, vol. 27, no. 5, pp. 533–547. doi:10.1109/TIT.1981.1056404
11. Lin S., Ryan W. *Channel Codes: Classical and Modern*. Cambridge University Press, 2009. 710 p.
12. Richardson T. J., Urbanke R. L. The Capacity of Low-Density Parity-Check Codes Under Message-Passing Decoding. *IEEE Transactions on Information Theory*, Feb. 2001, vol. 47, no. 2, pp. 599–618. doi:10.1109/18.910577
13. Chung S.-Y., Forney G. D., Richardson T. J., Urbanke R. On the Design of Low-Density Parity-Check Codes within 0.0045 dB of the Shannon Limit. *IEEE Communications Letters*, Feb. 2001, vol. 5, no. 2, pp. 58–60. doi:10.1109/4234.905935
14. Richardson T. J., Shokrollahi M. A., Urbanke R. L. Design of Capacity-Approaching Irregular Low-Density Parity-Check Codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, Feb. 2001, vol. 47, no. 2, pp. 619–637. doi:10.1109/18.910578
15. Di C., Proietti D., Teletar I. E., Richardson T. J., Urbanke R. L. Finite Length Analysis of Low-Density Parity-Check Codes on the Binary Erasure Channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, Jun. 2002, vol. 48, no. 6, pp. 1570–1579. doi:10.1109/TIT.2002.1003839
16. Richardson T. Error Floors of LDPC Codes. *Proc. 41st Allerton Conf. on Communications, Control, and Computing*, Monticello, IL, Oct. 2003. <http://web.stanford.edu/class/ee388/papers/ErrorFloors.pdf> (accessed 25 January 2017).
17. Kozlov A., Krouk E., Ovchinnikov A. An Approach to Development of Block-Commutative Codes with Low Density of Parity Check. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2013, vol. 8, pp. 9–14 (In Russian).
18. Kschischang F. R., Frey B. J., Loeliger H. A. Factor Graphs and the Sum-Product Algorithm. *IEEE Transactions on Information Theory*, Feb. 2001, vol. 47, no. 2, pp. 498–519. doi:10.1109/18.910572
19. Zhang J., Fossorier M. P. C. Shuffled Iterative Decoding. *IEEE Transactions on Communications*, Feb. 2005, vol. 53, no. 2, pp. 209–213. doi:10.1109/TCOMM.2004.841982
20. Park I.-C., Kang S.-H. Scheduling Algorithm for Partially Parallel Architecture of LDPC Decoder by Matrix Permutation. *2005 IEEE Intern. Symp. on Circuits and Systems*, 2005, vol. 6, pp. 5778–5781. doi:10.1109/ISCAS.2005.1465951
21. Yamagishi H., Noda M. High Throughput Hardware Architecture for (1440,1344) Low-Density Parity-Check Code Utilizing Quasi-Cyclic Structure. *2008 5th Intern. Symp. on Turbo Codes and Related Topics*, Lausanne, 2008, pp. 78–83. doi:10.1109/TURBOCODING.2008.4658676
22. Mansour M. M., Shanbhag N. R. High-throughput LDPC Decoders. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, Dec. 2003, vol. 11, no. 6, pp. 976–996. doi:10.1109/TVLSI.2003.817545
23. Hocevar D. E. A Reduced Complexity Decoder Architecture Via Layered Decoding of LDPC Codes. *IEEE Workshop on Signal Processing Systems*, 2004, SIPS 2004, Austin, TX, pp. 107–112. doi:10.1109/SIPS.2004.1363033
24. Diao Q., Huang Q., Lin S., Abdel-Ghaffar K. A Matrix-Theoretic Approach for Analyzing Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check Codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, Jun. 2012, vol. 58, no. 6, pp. 4030–4048. doi:10.1109/TIT.2012.2184834
25. Lan L., Zeng L., Tai Y. Y., Chen L., Lin S., Abdel-Ghaffar K. Construction of Quasi-Cyclic LDPC Codes for AWGN and Binary Erasure Channels: A Finite Field Approach. *IEEE Transactions on Information Theory*, Jul. 2007, vol. 53, no. 7, pp. 2429–2458. doi:10.1109/TIT.2007.899516
26. Djurdjevic I., Xu J., Abdel-Ghaffar K., Lin S. A Class of Low-Density Parity-Check Codes Constructed Based on Reed-Solomon Codes with Two Information Symbols. *IEEE Communications Letters*, Jul. 2003, vol. 7, no. 7, pp. 317–319. doi:10.1109/LCOMM.2003.814716
27. MacWilliams F., Sloane N. *The Theory of Error-Correcting Codes*. North-Holland publishing company, 1983. 782 p.
28. Kabatiansky G., Semenov S., Krouk E. *Error Correcting Coding and Security for Data Networks: Analysis of the Superchannel Concept*. John Wiley & Sons, 2005. 278 p. doi:10.1002/0470867574
29. Li Z., Chen L., Zeng L., Lin S., Fong W. H. Efficient Encoding of Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check Codes. *IEEE Transactions on Communications*, Jan. 2006, vol. 54, no. 1, pp. 71–81. doi:10.1109/TCOMM.2005.861667

OPTIMIZATION OF ERROR CONCEALMENT BASED ON ANALYSIS OF FADING TYPES

Part 2: Modified and New Models of Video Signal Error Concealment. Practical Simulations and their Results

Ofer Hadar^a, PhD, Associate Professor, hadar@cse.bgu.ac.il

Irina Bronfman^a, Teaching Assistant, irinamo@post.bgu.ac.il

Nathan Blaunstein^{a,b}, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, nathan.blaunstein@hotmail.com

^aBen-Gurion University of the Negev, POB 653, 1, Ben Gurion St., Beer Sheva, 84105, Israel

^bJerusalem College of Technology – Lev Academic Center, 21 Havaad Haleumi, P.O.B. 16031, Jerusalem, 91160, Israel

Purpose: This work is based on the recent research investigations in the combination of two subjects: Fading and Error Concealment. The main aim of the work is to present a more effective method of calculations of fading channel's parameters and to devise methods of achieving of better and more effective performance of Error Concealment, which will lead to higher quality of the video signals after passing through the fading channel. **Methods:** We explore the influence of fading on a communication channel, by studying the Gaussian, Gaussian, and Ricean distributions. Additionally, we explore existing methods of prediction and of Error Concealment and their influence on the video quality after its exit from the fading channel.

Results: It is demonstrated that the Ricean distribution is broader and that it includes the other distributions, Gaussian (ideal channel) and Rayleigh (channel with a strong fading). Therefore, this distribution is used for tests of practical cases occurring in the video channel. On the issue of Error Concealment, a method of Symmetrical CALIC which is an optimization of the CALIC method, was implemented and compared with the original CALIC and with other methods. It has been determined that the proposed optimization yields better results than all the methods used for comparison. In addition, a new method of Error Concealment, named Balanced Percentage Calculation, is proposed. In comparison, its results are two times better on average than the results of Symmetrical CALIC, and are much better than the results of other methods used. Two themes have been combined in such a way that fading influenced the appearance of errors in the video. Those errors have been replaced by the proposed methods of Error Concealment. All practical tests and comparisons were performed using the MatLab.

Practical relevance: The proposed method of calculations of fading channel's parameters allows to perform calculations for all types of channels. This method significantly facilitates work with channels in general and with necessary calculations for channels in particular. The suggested optimization of the existing method of Error Concealment and the new proposed method of Error Concealment allow to receive higher quality video after passing through the fading channel.

Keywords – Ricean Distribution, Ricean Fading, Bit Error Rate, Error Concealment, Level Crossing Rate, Average Fade Duration, CALIC, Symmetrical CALIC, Balanced Percentage Calculation, Weighted Averaging, Intra Prediction using System of Linear Equations.

Modified and New Model of Error Concealment in Channel with Fading

Most existing methods of Error Concealment (EC) use only a part of possible information — one row and one column or two rows and two columns on the same side of the lost block (i. e. a few pixels from two sides are used for recovering one or more of the lost pixels in block, and on the basis of these recovered pixels, the following lost pixels in this block are recovered), a few pixels around the lost pixel located at a certain distance from it (the same pixel row and column is used to recover lost pixels in the same row or the same column, with only changes in distances occurring), etc. [1–10]. We propose using symmetric known information — rows and columns surrounding a lost block. In this case, lost pixels “get” more information and may be recovered more accurately.

The offered method is called Symmetrical CALIC. During the research, another success-

ful method has been found. It is called Balanced Percentage Calculation. An algorithm may be needed in order to optimize it. Both these methods function simultaneously from the four sides of the lost block. Thus, there is simultaneous recover of four pixels, each based on known information or on previously reconstructed pixels.

Symmetrical CALIC. Symmetrical CALIC (SCALIC) method is based on original CALIC method [1], and, as mentioned above, it is performed simultaneously from all four corners (left top down, right top down, right bottom up and left bottom up scanning), as shown in Fig. 1.

In Fig. 1 neighboring pixels that are used in prediction and modeling and the estimated gradients of the image are showed, when P_1, P_5, P_9, P_{13} are the first (in missed block) predicted pixels $I_{P_1}[i, j], I_{P_5}[i, j+3], I_{P_9}[i+3, j+3], I_{P_{13}}[i+3, j]$, let us mark them $I_{P_1}, I_{P_5}, I_{P_9}, I_{P_{13}}$.

It should be noted that for the convenience of calculation each predictable pixel is marked as $I_p[i, j]$,

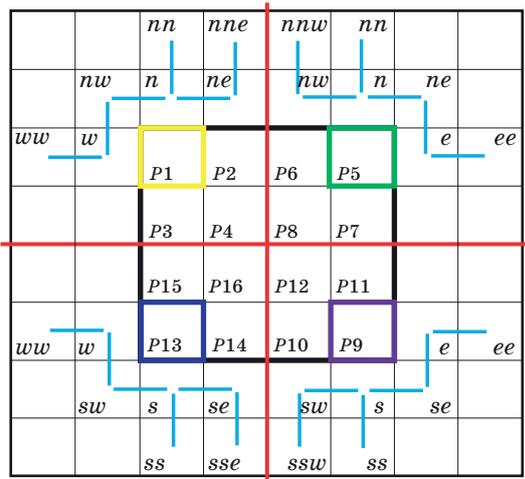


Fig. 1. Symmetrical CALIC scheme

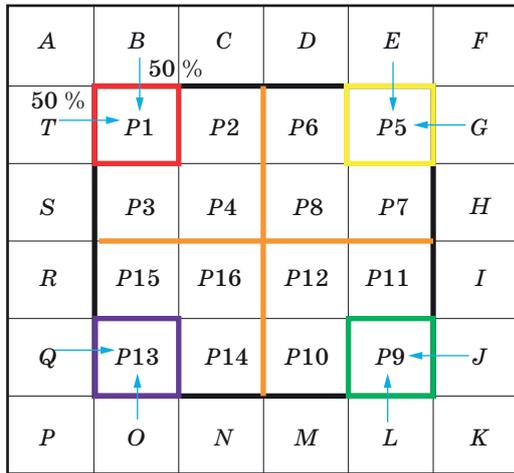


Fig. 2. Balanced Percentage Calculation scheme

when the pixels for its prediction are marked respectively and the real indexes (as above) are placed in i and j . The algorithm for calculating each pixel from missed block is presented in Section “The Simulation Algorithm” and the results of this method are presented in Section “Results of Computation”.

Balanced Percentage Calculation. Additional suggested model of EC is Balanced Percentage Calculation. We propose a model based only on two

known pixels — top or bottom (50 %) and side (50 %) as shown on Fig. 2.

In this method, the prediction starts simultaneously with angular pixels and the scanning takes place in the following order: left top down, right top down, right bottom up and left bottom up, as in suggested above SCALIC. The first pixels (angular) are predicted based only on known pixel around lost block, and other pixels are predicted based on known and earlier predicted pixels.

The Simulation Algorithm

H.264 is a modern video format. Videos in this format are used to test the proposed methods of EC and their analysis. Six fragments from various movies in this format are utilized for testing and analysis.

The system shown in Fig. 3 is built in MatLab to test and analyze the proposed methods of BER determining and EC implementation.

First, channel parameters are entered into the system. The following parameters were taken into account to obtain sufficient sample: $k = [e^{-3}, 5e^{-3}, e^{-2}, 1]$, $f_m = [500, 100, 200]$ Hz,

$$\theta = \left[0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{2} \right] [\text{rad}], \quad a_0 = \left[\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3} \right] [\text{rad}],$$

$K = [0,1$ (close to Rayleigh), 1 (Rice), 10 (close to Gauss)], when the values of bit time and threshold are: $T_b = 1,2e^{-3}s$, $X = 0,001$.

Thereafter, for all possible combinations of these parameters, LCR and BER are calculated using the formulas (22), (33) (see Part 1). For convenience, the formulas are presented below again:

$$N_x(X) = \frac{2X\sqrt{2\zeta}}{\pi^{3/2}K(0)} e^{-(X^2+\rho^2)/K(0)} \times$$

$$\times \int_0^{\pi/2} \cosh\left(\frac{2X\rho\cos\alpha}{K(0)}\right) \times$$

$$\times \left[e^{-\xi\rho\sin\alpha} + \sqrt{\pi}\xi\rho\sin\alpha Q(\xi\rho\sin\alpha) \right] d\alpha,$$

$$BER = \frac{N_x}{R}, \quad R = \frac{1}{T_b}.$$

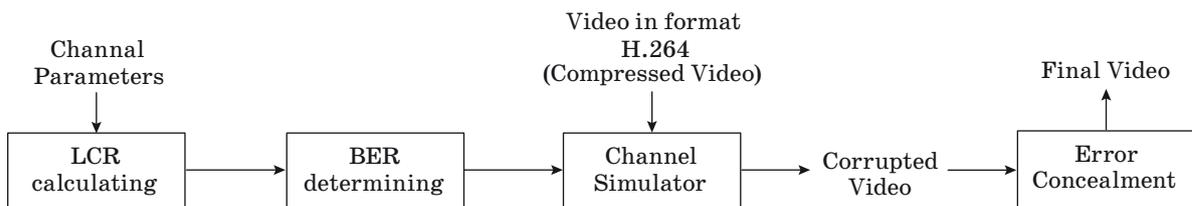


Fig. 3. Simulating system

All the BERs calculated earlier and the original video were inserted into the channel.

Inside the channel a randomly picked BER value for Ricean fading (for $K = 1$) is selected. This BER value represents the number of lost bits in each frame. Then, depending on the number of bits per pixel, the number of lost pixels is calculated for each frame. The number of bits per pixel is 24 in all the films used in the simulation.

In H.264 video format, during the passage of the video through the channel, the blocks that are lost consist mostly of 4×4 pixels. Therefore, by dividing the previously calculated number of lost pixels by 16 pixels per block, the number of lost blocks in each frame is obtained.

Thereafter, the coordinates of lost blocks are determined randomly. The pixels values in these blocks are nullified and a video with lost blocks, i. e. a corrupted video, ensues. Then, various methods of substitution errors (EC) are used. The outcome of EC constitutes the final, repaired, video.

Error Concealment Symmetric CALIC Algorithm. The pixels used to predict the pixel $I_{p_1}[i, j]$ are identical to pixels used to predict the pixel $I_p[i, j]$, in the original model:

$$I_n = I[i - 1, j], I_w = I[i, j - 1], I_{ne} = I[i - 1, j + 1],$$

$$I_{nw} = I[i - 1, j - 1], I_{nn} = I[i - 2, j], I_{ww} = I[i, j - 2],$$

$$I_{nne} = I[i - 2, j + 1].$$

The gradient of intensity function at the current pixel I is estimated by computing the following quantities:

$$d_{h_1} = |I_w - I_{ww}| + |I_n - I_{nw}| + |I_{ne} - I_n|;$$

$$d_{v_1} = |I_w - I_{nw}| + |I_n - I_{nn}| + |I_{ne} - I_{nne}|. \quad (35)$$

And the prediction, i. e. concealment, is produced by the following procedure (identical to procedure in the original model):

if $(d_{v_1} - d_{h_1} > 80)\%$ sharp horizontal edge

$$I_{p_1} = I_w; \quad (36)$$

else if $(d_{v_1} - d_{h_1} < -80)\%$ sharp vertical edge

$$I_{p_1} = I_n;$$

else {

$$I_{p_1} = \frac{I_w + I_n}{2} + \frac{I_{ne} - I_{nw}}{4};$$

if $(d_{v_1} - d_{h_1} > 32)\%$ horizontal edge

$$I_{p_1} = \frac{I_{p_1} + I_w}{2};$$

else if $(d_{v_1} - d_{h_1} > 8)\%$ weak horizontal edge

$$I_{p_1} = \frac{3I_{p_1} + I_w}{4};$$

else if $(d_{v_1} - d_{h_1} < -32)\%$ vertical edge

$$I_{p_1} = \frac{I_{p_1} + I_n}{2};$$

else if $(d_{v_1} - d_{h_1} < -8)\%$ weak vertical edge

$$I_{p_1} = \frac{3I_{p_1} + I_n}{4};$$

}

The pixels used for prediction the pixel $I_{p_5}[i, j]_{i=i, j=j+3}$ are: $I_n = I[i - 1, j]$, $I_e = I[i, j + 1]$, $I_{nw} = I[i - 1, j - 1]$, $I_{ne} = I[i - 1, j + 1]$, $I_{nn} = I[i - 2, j]$, $I_{ee} = I[i, j + 2]$, $I_{nnw} = I[i - 2, j - 1]$.

The gradient of intensity function at the current pixel I is estimated by computing the following quantities:

$$d_{h_5} = |I_e - I_{ee}| + |I_n - I_{ne}| + |I_{nw} - I_n|;$$

$$d_{v_5} = |I_e - I_{ne}| + |I_n - I_{nn}| + |I_{nw} - I_{nnw}|. \quad (37)$$

And the prediction, i. e. concealment, is produced by the following procedure:

if $(d_{v_5} - d_{h_5} > 80)\%$ sharp horizontal edge

$$I_{p_5} = I_e; \quad (38)$$

else if $(d_{v_5} - d_{h_5} < -80)\%$ sharp vertical edge

$$I_{p_5} = I_n;$$

else {

$$I_{p_5} = \frac{I_e + I_n}{2} + \frac{I_{nw} - I_{ne}}{4};$$

if $(d_{v_5} - d_{h_5} > 32)\%$ horizontal edge

$$I_{p_5} = \frac{I_{p_5} + I_e}{2};$$

else if $(d_{v_5} - d_{h_5} > 8)\%$ weak horizontal edge

$$I_{p_5} = \frac{3I_{p_5} + I_e}{4};$$

else if $(d_{v_5} - d_{h_5} < -32)\%$ vertical edge

$$I_{p_5} = \frac{I_{p_5} + I_n}{2};$$

else if $(d_{v_5} - d_{h_5} < -8)\%$ weak vertical edge

$$I_{p_5} = \frac{3I_{p_5} + I_n}{4};$$

}

The pixels used for prediction the pixel $I_{p_9} [i, j]_{i=i+3, j=j+3}$ are: $I_s = I[i + 1, j]$, $I_e = I[i, j + 1]$, $I_{sw} = I[i + 1, j - 1]$, $I_{se} = I[i + 1, j + 1]$, $I_{ss} = I[i + 2, j]$, $I_{ee} = I[i, j + 2]$, $I_{ssw} = I[i + 2, j - 1]$.

The gradient of intensity function at the current pixel I is estimated by computing the following quantities:

$$\begin{aligned} d_{h_9} &= |I_e - I_{ee}| + |I_s - I_{se}| + |I_{sw} - I_s|; \\ d_{v_9} &= |I_e - I_{se}| + |I_s - I_{ss}| + |I_{sw} - I_{ssw}|. \end{aligned} \quad (39)$$

And the prediction, i. e. concealment, is produced by the following procedure:

if $(d_{v_9} - d_{h_9} > 80)\%$ sharp horizontal edge

$$I_{p_9} = I_e; \quad (40)$$

else if $(d_{v_9} - d_{h_9} < -80)\%$ sharp vertical edge

$$I_{p_9} = I_s;$$

else {

$$I_{p_9} = \frac{I_e + I_s}{2} + \frac{I_{sw} - I_{se}}{4};$$

if $(d_{v_9} - d_{h_9} > 32)\%$ horizontal edge

$$I_{p_9} = \frac{I_{p_9} + I_e}{2};$$

else if $(d_{v_9} - d_{h_9} > 8)\%$ weak horizontal edge

$$I_{p_9} = \frac{3 \cdot I_{p_9} + I_e}{4};$$

else if $(d_{v_9} - d_{h_9} < -32)\%$ vertical edge

$$I_{p_9} = \frac{I_{p_9} + I_s}{2};$$

else if $(d_{v_9} - d_{h_9} < -8)\%$ weak vertical edge

$$I_{p_9} = \frac{3I_{p_9} + I_s}{4};$$

}

The pixels used for prediction the pixel $I_{p_{13}} [i, j]_{i=i+3, j=j}$ are: $I_s = I[i + 1, j]$, $I_w = I[i, j - 1]$, $I_{se} = I[i + 1, j + 1]$, $I_{sw} = I[i + 1, j - 1]$, $I_{ss} = I[i + 2, j]$, $I_{ww} = I[i, j - 2]$, $I_{sse} = I[i + 2, j + 1]$.

The gradient of intensity function at the current pixel I is estimated by computing the following quantities:

$$d_{h_{13}} = |I_w - I_{ww}| + |I_s - I_{sw}| + |I_{se} - I_s|;$$

$$d_{v_{13}} = |I_w - I_{sw}| + |I_s - I_{ss}| + |I_{se} - I_{sse}|. \quad (41)$$

And the prediction, that is concealment, is produced by the following procedure:

if $(d_{v_{13}} - d_{h_{13}} > 80)\%$ sharp horizontal edge

$$I_{p_{13}} = I_w; \quad (42)$$

else if $(d_{v_{13}} - d_{h_{13}} < -80)\%$ sharp vertical edge

$$I_{p_{13}} = I_s;$$

else {

$$I_{p_{13}} = \frac{I_w + I_s}{2} + \frac{I_{se} - I_{sw}}{4};$$

if $(d_{v_{13}} - d_{h_{13}} > 32)\%$ horizontal edge

$$I_{p_{13}} = \frac{I_{p_{13}} + I_w}{2};$$

else if $(d_{v_{13}} - d_{h_{13}} > 8)\%$ weak horizontal edge

$$I_{p_{13}} = \frac{3I_{p_{13}} + I_w}{4};$$

else if $(d_{v_{13}} - d_{h_{13}} < -32)\%$ vertical edge

$$I_{p_{13}} = \frac{I_{p_{13}} + I_s}{2};$$

else if $(d_{v_{13}} - d_{h_{13}} < -8)\%$ weak vertical edge

$$I_{p_{13}} = \frac{3I_{p_{13}} + I_s}{4};$$

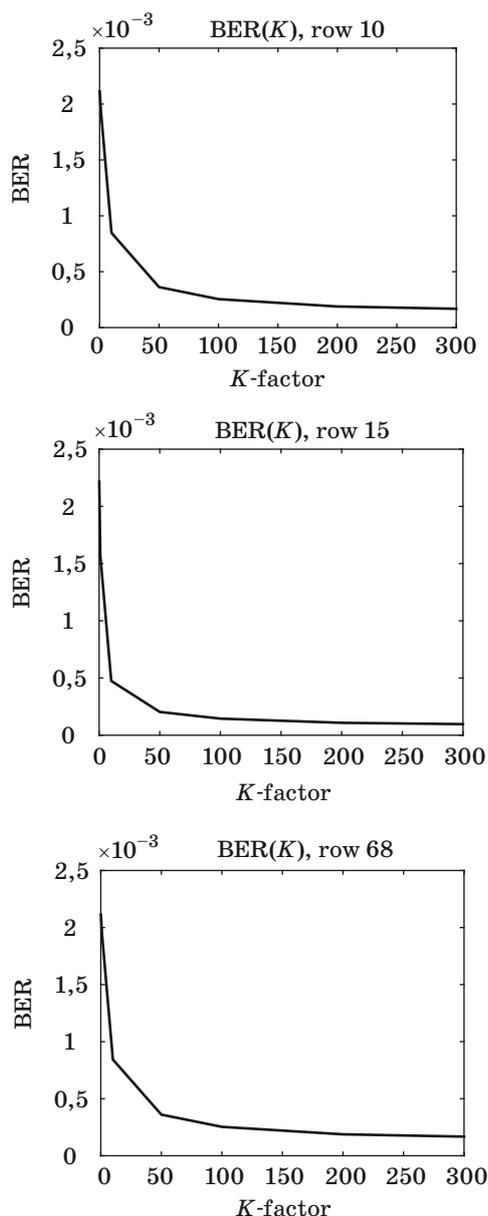
}

After the angular pixels have been predicted (concealed), prediction of the following pixels, P_2 , P_6 , P_{10} , P_{14} , is simultaneously performed, based on the known and earlier predicted pixels. All the pixels in the lost block are predicted in the same way.

Results of Computation

In order to demonstrate the advantages of the proposed method of BER calculating, calculations using the new formula of BER were made. These calculations were performed for channel with Ricean fading with different values of K . The results are presented by graphs in Fig. 4 and 5.

In order to demonstrate the advantages of the proposed EC methods, each original video was compared to its resultant (final) videos that were repaired using different EC methods. The results are shown below in three different ways: Histogram, Mean Square Error (MSE) and Peak Signal to Noise Ratio



■ Fig. 4. BER of different channel parameters

(PSNR). Although six different videos were used in the work, this article only presents the graphs of one video and calculation results of all six videos.

The description of the videos that were used for tests of different EC methods is presented below:

Video 1

Technical characteristics:

Data rate: 631 kbps

Total bit rate: 724 kbps

Frame rate: 23 frames/s

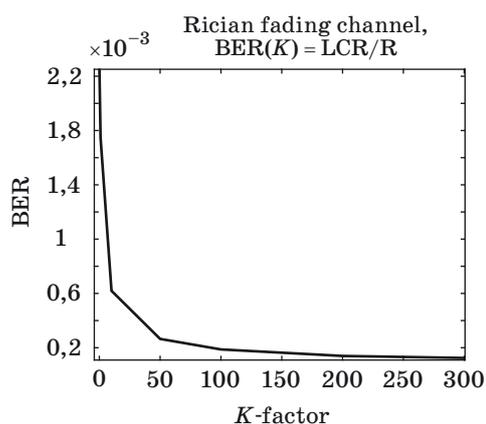
Audio bit rate: 92 kbps

Audio channels: 2 (stereo)

Audio sample rate: 44 kHz

Content & temporary and spatial activity:

The fragment presents a shooting of hamburg-



■ Fig. 5. Average BER of Ricean fading channel

er commercial. A model walking on open catwalk by the sea attracts the attention of tourists. Then she demonstrates a burger and takes a bite of it. The fragment is characterized by medium and slow speed movement, by shifting background, and by the presence of details ranging from large to small.

Video 2

Technical characteristics:

Data rate: 371 kbps

Total bit rate: 467 kbps

Frame rate: 25 frames/s

Audio bit rate: 96 kbps

Audio channels: 2 (stereo)

Audio sample rate: 44 kHz

Content & temporary and spatial activity: This fragment from a children's cartoon. In the cartoon there is a constant replacement of the scenery, rain is represented by distinctly significant drops, characters appear and disappear, there is a large change of colors. The fragment is characterized by a lot of fast and slow speed movement, by constantly shifting background, and by the presence of details ranging from large to small.

Video 3

Technical characteristics:

Data rate: 301 kbps

Total bit rate: 397 kbps

Frame rate: 29 frames/s

Audio bit rate: 96 kbps

Audio channels: 2 (stereo)

Audio sample rate: 44 kHz

Content & temporary and spatial activity: This fragment is a promotional video. There are few characters in the video, changing facial expressions present and the same background is shown from different angles. The fragment is characterized by very little traffic, by mostly unchanging background and by the presence of a range of large and medium-sized details.

Video 4

Technical characteristics:

- Data rate: 548 kbps
- Total bit rate: 644 kbps
- Frame rate: 29 frames/s
- Audio bit rate: 96 kbps
- Audio channels: 2 (stereo)
- Audio sample rate: 44 kHz

Content & temporary and spatial activity:

The fragment is an artistic and documentary footage of costumed historical scene — an arena surrounded by service buildings. The arena hosts tournaments in real time. The fragment is characterized by constantly shifting background, by a lot of medium speed movement and by the presence of objects and details ranging from large to small.

Video 5

Technical characteristics:

- Data rate: 334 kbps
- Total bit rate: 382 kbps
- Frame rate: 18 frames/s
- Audio bit rate: 47 kbps
- Audio channels: 2 (stereo)
- Audio sample rate: 22 kHz

Content & temporary and spatial activity:

This fragment is from the children’s cartoon. The cartoon is characterized by constantly changing scenery and by thrown objects. A child and other characters are in constant moving. The fragment is characterized by a lot of fast and slow speed movement, by constantly shifting background and characters, and by the presence of details ranging from large to small.

Video 6

Technical characteristics:

- Data rate: 597 kbps
- Total bit rate: 653 kbps
- Frame rate: 30 frames/s
- Audio bit rate: 55 kbps
- Audio channels: 1 (mono)
- Audio sample rate: 44 kHz

Content & temporary and spatial activity:

The fragment is a documentary footage of scenes from a life of little kangaroo with a man. The animal moves all the time, follows the man, tries to repeat all his movements. Man and the little kangaroo play lot. The fragment is characterized by abundance of fast speed movement, by constantly shifting background, by shifting light from bright sun to full shade, and by the presence of details ranging from large to small.

BER comparison. A range of values of *K*-factor wider than required for the simulation system, $K = [0,1, 1, 10, 50, 100, 200, 300]$, was taken in order to demonstrate the results of BER calculation using the proposed formula. The result of the calculations with all the parameters of the channel is organized in a table consisting of 120 rows and 7 col-

umns. Each column corresponds to one of the values of the *K*-factor in ascending order. In order to demonstrate the success of the calculations, randomly picked rows were selected from this table and the average values of each column (i. e. the average BER for each value of the *K*-factor) were counted. The BER values in the selected rows and average BER for different *K*-factors are presented in Fig. 4 and 5. The graphs have been built on the basis of the rows and the vector of mean values.

As can be seen in the resulting graphs, the lower *K*-factor leads to the higher BER, and the higher *K*-factor leads to the lower BER. Thus, for smaller values of *K* the BER closes to Rayleigh fading, and for larger values of *K* the BER tends to zero, i. e., closes to Gauss fading.

Error Concealment comparison. The results of the comparison between suggested EC models and existing models, performed by Mean Square Error (MSE) and Peak Signal to Noise Ratio (PSNR), are represented by:

1) the table of average MSE relations (ratios) that were calculated by following formula (Tabl. 1 and 2):

$$\begin{aligned} \text{average MSE relation} = \\ = \frac{\text{average MSE of tested (existed) EC model}}{\text{average MSE of my Symmetric CALIC model}}; \end{aligned} \quad (43)$$

2) histogram based on MSE relations (ratios) that were calculated by following formula:

$$\begin{aligned} \text{MSE relation array} = \\ = \frac{\text{MSE array of tested (existed) EC model}}{\text{MSE array of my Symmetric CALIC model}}; \end{aligned} \quad (44)$$

- 3) graph of MSE of all methods;
- 4) graph of PSNR of all methods.

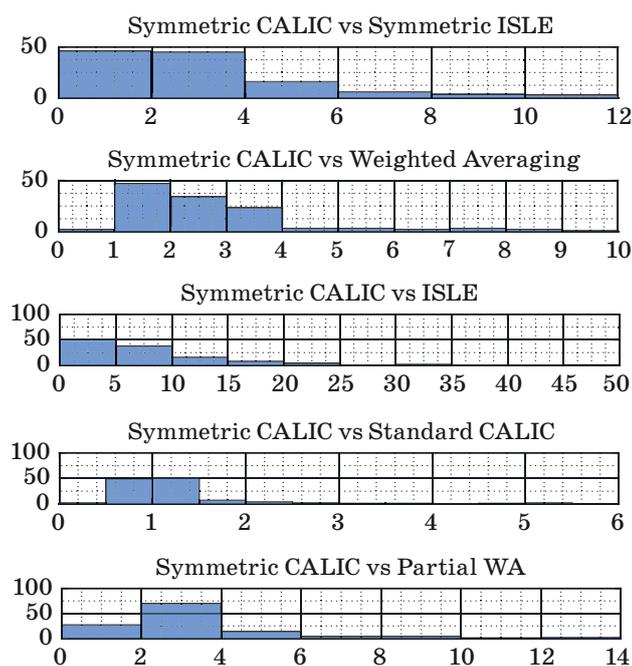
Existing models: Symmetric Intra Prediction using System of Linear Equations (SISLE), Weighted

■ **Table 1.** MSE average Ratios

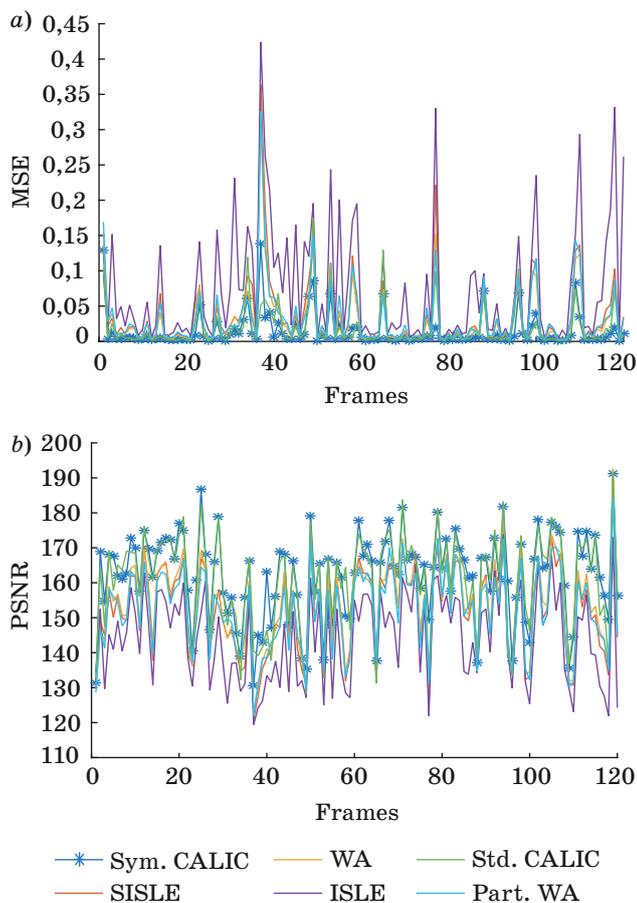
MSEaveRelations					
1x5 double					
1	2	3	4	5	
2.4595	2.1365	5.0872	1.2627	2.2938	

■ **Table 2.** MSE average Ratio: Balanced Calculation 50–50 % method compared to SCALIC method

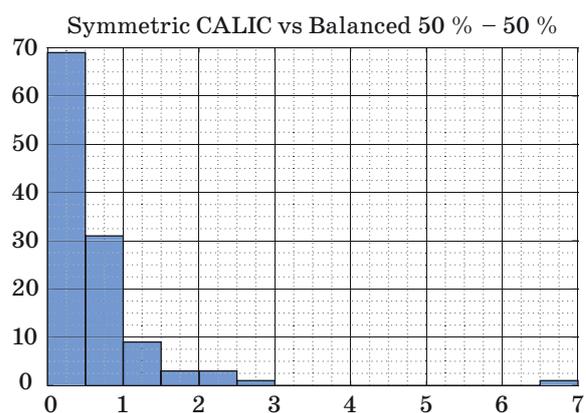
MSEaveRealtionsBalancedvsSymCALIC			
1x1 double			
1	2	3	
0.4073			



■ Fig. 6. Histogram of MSE ratios: SCALIC method compared to existing methods



■ Fig. 7. SCALIC method compared to existing methods: a — MSE comparison; b — PSNR comparison



■ Fig. 8. Histogram of MSE ratios: Balanced Calculation method compared to SCALIC method

Averaging (WA), Intra Prediction using System of Linear Equations (ISLE), Standard CALIC (Std. CALIC), Partial Weighted Averaging (Part. WA).

It should be noted that the work was carried out with the I-frames. The impact of the proposed method on other types of frames is a topic for further study and work.

In the beginning, the results of comparison between SCALIC and other existed methods are presented. Then the results of comparison between other proposed method (Balanced Percentage Calculation) and SCALIC are presented.

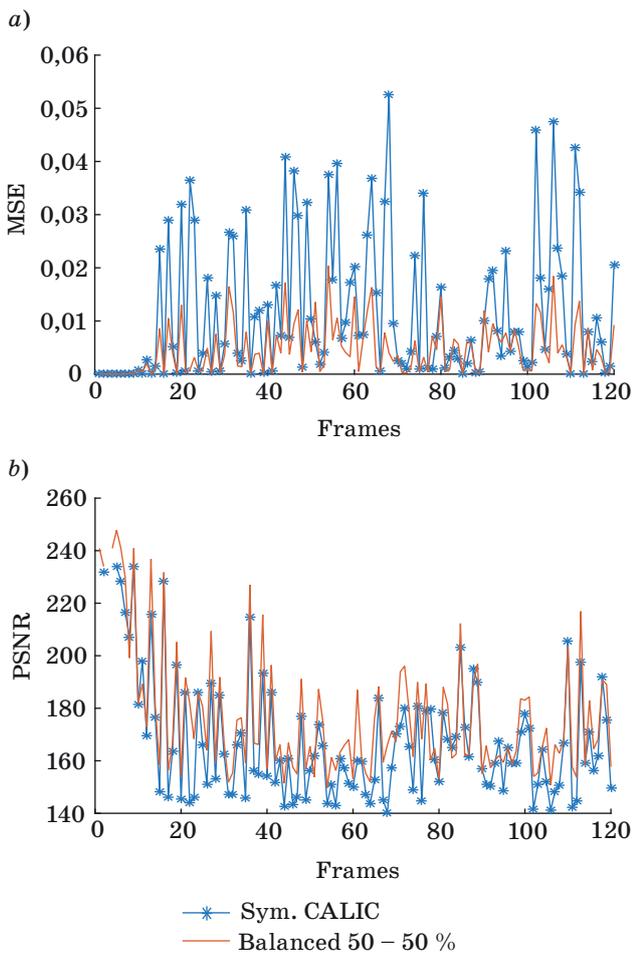
Results of Comparison (for video fragment 5).

The SCALIC method compared to different existing methods is shown in Fig. 6 and 7 in the form of histograms and in graphical form, respectively.

The Balanced Calculation 50–50 % method compared to SCALIC method is presented in Fig. 8 and 9

■ Table 3. SCALIC compared to different existing models

Average MSE per model per video	SCALIC vs				
	SISLE	WA	ISLE	Std. CALIC	Part. WA
Video fragment 1	4,1567	3,2985	12,2934	1,3119	4,2980
Video fragment 2	3,0673	2,6818	6,9647	1,1516	3,0214
Video fragment 3	1,5805	1,5285	2,2497	1,0271	1,6583
Video fragment 4	2,3352	2,1787	3,6461	1,0390	2,2704
Video fragment 5	2,4595	2,1365	5,0872	1,2627	2,2938
Video fragment 6	4,5981	3,5052	10,0879	1,0622	4,2013
Average MSE per model	3,0329	2,5549	6,7215	1,1424	2,9572



■ **Fig. 9.** Balanced Calculation 50-50 % method compared to SCALIC method: *a* — MSE comparison; *b* — PSNR comparison

■ **Table 4.** Balanced Calculation 50-50 % compared to SCALIC

Average MSE per model per video	Balanced 50-50 % vs SCALIC
Video fragment 1	0,4221
Video fragment 2	0,3854
Video fragment 3	0,5720
Video fragment 4	0,3953
Video fragment 5	0,4073
Video fragment 6	0,2621
Average MSE per model	0,4888

in the form of histogram and graphically, respectively.

In order to show the general results, the average values of MSE of all used videos were calculated. The corresponding comparison between all the proposed methods is summarized in Tabl. 3 and 4.

For a better view of the effectiveness of EC methods we will present their ranking in decreasing order from the most effective method to the least effective method (it should be noted that all these methods, including the least effective, are working):

- 1) Balanced Percentage Calculation 50-50 %;
- 2) Symmetrical CALIC;
- 3) Standard CALIC;
- 4) Weighted Averaging;
- 5) Partial Weighted Averaging;
- 6) Symmetric ISLE;
- 7) ISLE.

Summary

BER. The proposed method of BER calculating is versatile and provides the receiving of BER for a channel with any of the three common types of fading. This makes it possible to use all the channel's available resources for one species fading (Ricean), thus increasing the accuracy of the necessary calculations and predictions. That, in turn, improves the accuracy of filling errors.

Based on the results shown in the previous Section, we can see evidence of the validity of the suggested method. Thus, for different values of *K*-factor, a BER for the channel with different types of fading is achieved.

Error Concealment. Based on the results of the simulation in the previous Section, we can conclude that the symmetrical EC, performed from the four corners (four sides and each side is used in two of calculations) of the lost block, is very perspective. This concealment uses twice as much or more of the existing information than asymmetrical (with one corner and two sides and other) processes of EC. The suggested method (SCALIC) achieves on average an improvement in EC ranging from 14 to 670 % compared to various asymmetric methods. This improvement is very significant.

These results are logical and consistent due to the fact that using of all the information surrounding the lost block (two rows and two columns) provides better results than use of only half of the information (in the asymmetrical methods that use is only one row and one column).

However, additional method of EC that is proposed in this work, called Balanced Percentage Calculation, provides results two times better on average than SCALIC. This indicates that this method is more efficient and attention should be paid to the development of algorithm for it.

It should be noted that the proposed methods were compared to asymmetric methods (that use the top row and the left column — CALIC and ISLE) in order to reference this study with previous studies and in order to show that there are undoubted benefits in using symmetric techniques.

Practice Recommendations

BER. In future research it is necessary to develop an algorithm for the transition from $\frac{E_b}{N_0}$ in the classical formulas for BER calculating to the parameters (arguments) of the proposed formula to enable rapid performance of necessary calculations and comparisons.

In addition, it makes sense to study the possibility of constructing an algorithm to determine the optimal value of the K -factor for each of the proposed (existing) communication channel.

Error Concealment. In future research, more attention should be paid to different symmetrical EC methods that might be very successful and show much better results than the existing asymmetrical ways. This confirms not only the SCALIC, proposed in this work, but also ISLE and Symmetrical ISLE methods that were used for comparison: symmetrical prediction gives on average results that are twice or more better than unsymmetrical. The SCALIC itself compared to the Std. CALIC gives a 14 % aver-

age improvement in the results of EC, which is undoubtedly a good result, although more research is needed to improve it.

However, it is also worth paying attention to the fact that the full information, surrounding the lost block, is not always available. In some cases only half of the data (two sides) is available that leads to slightly worse results. This can be seen by comparison between WA and Part. WA, wherein the information from two sides is used: Part. WA shows results that on average are worse only 1,157 times than WA. This was revealed in the process of this research and it is important topic for future research.

Another topic for future research is Balanced Percentage Calculation for replacement of pixels of lost block. As can be seen from the results of the previous Section, this method produces results twice better on average than the SCALIC, thereby demonstrating its high efficiency. Therefore, future research is needed to develop an algorithm to determine the optimal percentage of this calculation.

References

1. Wu X., and Memon N. CALIC — a Context Based Adaptive Lossless Image Codec. *Proc. Int. Conf. on Acoust., Speech, Signal Processing*, Atlanta, GA, May 1996, pp. 1891–1894.
2. Zhao X., Lu H., Chen C. W., and Wu J. Adaptive Hybrid Digital-analog Video Transmission in Wireless Fading Channel. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2016, no. 6, pp. 1215–1223.
3. Shen X., Tang L., and Zhang X. A Video Transmission Scheme Based on Scalable Video Coding over MIMO Wireless Systems. *Intern. Conf. on Wireless Communication and Sensor Network*, 2014, 6 p.
4. Purandare R. G., Kshirsagar S. P., Koli S. M., and Gohokar V. V. Impact of Bit Error on Video Transmission over Wireless Networks and Error Resiliency. *Intern. Conf. on Image Information Processing (ICIIP)*, 2011, 6 p.
5. Bocus M. Z., and Coon J. P. *Rate-Optimization for Scalable Video Transmission over Wireless Networks*. IEEE Press, 2014. 287 p.
6. Hadar O., Huber M., and Huber R. Hybrid Error Concealment with Automatic Error Detection for Transmitted MPEG-2 Video Streams over Wireless Communication Network. *Intern. Conf. on Information Technology: Research and Education*, 2006, 6 p.
7. Hadar O., Huber M., Huber R., and Greenberg S. New Hybrid Error Concealment for Digital Compressed Video. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2005, no. 6, pp. 1821–1833.
8. Mazataud C. *Error Concealment for H.264 Video Transmission*. A Thesis Presented to the Academic Faculty, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, 2009. 94 p.
9. Patel D., and Patel J. Hybrid Spatio-Temporal Error Concealment Technique for Image/Video Transmission. *IEEE Proc.*, 2014, no. 5, pp. 814–823.
10. Lee Y. H., and Wu T. H. Video Error Concealment Using Progressive Block Matching Algorithm with Euclidean Distance. *Eighth Intern. Conf. on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 2012, 6 p.

УДК 621.39

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.67

Оптимизация маскирования ошибок на основе анализа типов затухания**Часть 2: Модифицированные и новые модели маскирования ошибок видеосигналов.****Практическое моделирование и его результаты**Офер Хадар^а, Phd, профессорИрина Бронфман^б, MSc студентНатан Блаунштейн^{а,б}, доктор физ.-мат. наук, профессор^аНегевский университет им. Бен-Гуриона, г. Беэр-Шева, Израиль^бИерусалимский технологический институт, Иерусалим, Израиль

Цель исследования: представить наиболее эффективный метод расчетов параметров канала с затуханием и разработать методы достижения лучшего и более эффективного выполнения замещения ошибок, что повысит качество видео после прохождения через канал с затуханием. **Методы:** исследованы влияние затухания на канал связи при помощи изучения распределений Гаусса, Рейли и Райса, а также существующие методы прогнозирования и замещения ошибок и их влияние на качество видео после выхода из канала с затуханием. **Результаты:** показано, что распределение Райса более широкое и охватывает другие виды распределения — Гаусса (идеальный канал) и Рейли (канал с затуханием), поэтому, именно это распределение было использовано для тестирования практических случаев, возникающих в видеоканале. По теме замещения ошибок проведена оптимизация метода CALIC, названная Симметричный CALIC (Symmetric CALIC). Реализовано сравнение данной оптимизации с оригинальным методом CALIC и с другими методами и определено, что предлагаемая оптимизация показывает лучшие результаты, чем все использованные для сравнения методы. Предложен новый метод замещения ошибок, названный Сбалансированным Процентарным Расчетом (Balanced Percentage Calculation), в сравнении показавший в среднем в два раза лучшие результаты, чем Симметричный CALIC, и намного лучшие результаты, чем остальные использованные для сравнения методы. Две темы объединены таким образом, что затухание повлияло на появление ошибок в видеофайле, которые были исправлены при помощи предложенных методов замещения ошибок. Все практические тесты и сравнения проведены в MatLab. **Практическая значимость:** предложенный способ расчета параметров канала с затуханием позволяет выполнять расчеты для любых видов каналов, что значительно облегчает работу с каналами в общем и с необходимыми для них расчетами в частности. Предложенные оптимизация существующего метода замещения ошибок и новый метод замещения ошибок позволяют получать видео более высокого качества после прохождения через канал с затуханием.

Ключевые слова — распределение Райса, затухание Райса, скорость ошибочных битов, BER, замещение ошибок, коэффициент уровня пересечения, средняя продолжительность затухания, CALIC, симметричный CALIC, сбалансированный процентарный расчет, средняя взвешенность, внутрикадровое прогнозирование с помощью системы линейных уравнений.

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕДЕНИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Л. А. Мартынова^а, доктор техн. наук, старший научный сотрудник
^аАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ

Введение: наиболее перспективным видом поиска в ледовой обстановке является сейсморазведка, заключающаяся в размещении на морском дне геофонов, принимающих отраженные от залежей углеводородов сигналы, излучаемые специальным вибратором. Переход от статической схемы ведения сейсморазведки к динамической с использованием автономных обитаемых подводных аппаратов, несмотря на свою привлекательность, является сложной в реализации задачей с точки зрения обеспечения согласованного поведения излучателя, совершающего круговые движения, и поступательно перемещающейся группы автономных обитаемых подводных аппаратов. Широкомасштабное проведение исследований по определению оптимальных параметров динамической системы ведения сейсморазведки возможно только с использованием математического моделирования, позволяющего создать инструментарий (совокупность методических и технических средств) для исследований эффективности ведения сейсморазведки. **Цель исследования:** на основе математической модели разработать инструментарий для исследования эффективности ведения сейсморазведки с использованием автономных обитаемых подводных аппаратов. **Результаты:** в качестве показателей эффективности приняты: время обследования заданного района, степень координации работы излучателя и группы автономных обитаемых подводных аппаратов, степень широкоазимутальности направлений прихода отраженных сигналов, создаваемых излучателем. Сформулированы требования к математической модели, связанные со степенью детализации воспроизводимых процессов. На базе математической модели разработан инструментарий для проведения исследований, включающий в себя: таблицы значений азимутов прихода отраженных сигналов и расстояний от автономных обитаемых подводных аппаратов до излучателя в каждом такте имитации, гистограммы распределения азимутов отраженных сигналов и дистанций до излучателя, траектории относительного перемещения автономных обитаемых подводных аппаратов вокруг излучателя, розу-диаграмму азимутов, таблицу накопленных значений азимутов и дистанций, графическое представление изменения среднеквадратического отклонения азимутов с течением времени. На конкретном примере продемонстрирована возможность использования разработанного инструментария для оптимизации параметров ведения сейсморазведки. **Практическая значимость:** применение разработанных показателей и инструментария приводит к существенному сокращению времени на проведение исследований по выбору оптимальных алгоритмов поиска, а также способствует наглядности получения значений, вскрытию причинно-следственных связей, а значит — оперативному принятию решения по выбору оптимальных параметров и технических решений.

Ключевые слова — автономный обитаемый подводный аппарат, математическое моделирование, метод согласованного поведения, азимуты, среднеквадратическое отклонение.

Введение

Поиску месторождений углеводородов в настоящее время уделяется повышенное внимание, особенно в Арктических районах [1–10]. Наиболее перспективным видом поиска в ледовой обстановке является сейсморазведка [11–17], заключающаяся в размещении на морском дне геофонов, принимающих отраженные от залежей углеводородов сигналы, излучаемые специальным вибратором (далее — излучателем). Использование геофонов в составе автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА), способных оперативно перемещаться как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях, открывает широкие возможности для дальнейшего совершенствования сейсморазведки с использованием АНПА путем формирования динамической системы, поступательно перемещающейся в пространстве за счет того, что большая часть АНПА задействована для приема сигналов, а меньшая часть осуществляет перемещение в новое место своей дислокации [18]. Однако динами-

ческая схема ведения сейсморазведки, несмотря на свою привлекательность, является сложной в реализации с точки зрения обеспечения согласованного поведения излучателя, совершающего круговые движения, и поступательно перемещающейся группы АНПА.

Сказанное означает, что необходим тщательный подход к выбору параметров согласованного движения излучателя и группы АНПА. Для определения оптимальных параметров сейсморазведки необходимо проведение исследований, основанных на оценке эффективности сейсморазведки.

Исследования путем натурального эксперимента для определения этих параметров экономически не оправданы, так как:

— требуют существенных трудозатрат на оснащение полигона, использования вспомогательной техники и т. д.;

— результаты натурального эксперимента существенно зависят от условий его проведения, и при других условиях ведения сейсморазведки принятые значения параметров могут привести к результатам, далеким от оптимальных.

Поэтому для определения оптимальных параметров динамической системы при проведении сейсморазведки целесообразно использовать математическое моделирование, позволяющее создать инструментарий для исследований эффективности ведения сейсморазведки. Под инструментарием будем понимать совокупность методических и технических средств проведения исследований.

Целью настоящей работы явилась разработка на основе математической модели инструментария для исследований эффективности ведения сейсморазведки, обеспечивающего возможность определения оптимальных параметров ведения сейсморазведки с использованием группы АНПА.

Показатели эффективности ведения сейсморазведки

Определение оптимальных параметров осуществляется на основании оценки эффективности ведения сейсморазведки. В качестве показателей эффективности были выбраны параметры, характеризующие степень достижения поставленной в сейсморазведке цели. Поскольку целью сейсморазведки является обнаружение залежей углеводородов и определение их местоположения, то при разработке инструментария для оценки эффективности ведения сейсморазведки использованы следующие показатели эффективности:

- время ведения обследования заданного района;
- степень координирования работы излучателя и группы АНПА;
- степень широкоазимутальности, выраженная отклонением от равномерного распределения азимутов, полученных в ходе численного эксперимента.

Первый показатель эффективности — это время, затрачиваемое на ведение сейсморазведки. Время обследования определяется скоростью согласованного перемещения излучателя и группы АНПА.

Инструментарий предоставляет возможность для рассмотрения различных схем ведения сейсморазведки, например, таких двух схем согласованного поведения излучателя и группы АНПА:

— *схемы 1*, при которой происходит чередование перемещения группы АНПА и прием отраженного сигнала. Во время перемещения группы АНПА излучатель либо ждет, пока АНПА группы займут новые позиции, либо продолжает движение по круговой траектории, но без обеспечения группой АНПА приема отраженных сигналов. При этом переход к режиму ожидания связан с выполнением дополнительных технологических мероприятий по торможению, остановке, разгону излучателя, что менее выгодно, чем

установившееся движение, поскольку установившееся движения всегда более экономично;

— *схемы 2*, при которой система «излучатель — группа АНПА» постоянно перемещается в соответствии с технологическими возможностями АНПА.

Время, затрачиваемое на выполнение технологических операций, сопровождающих проведение сейсморазведки, расходуется на:

- прикрепление АНПА к донной поверхности (t_1);
- позиционирование АНПА (t_2);
- прослушивание отраженных сигналов, создаваемых излучателем (t_3);
- всплытие АНПА на заданную глубину для перемещения в следующую позицию (t_4);
- перемещение АНПА в заданную точку (t_5).

Время $t_{и}$ движения излучателя по окружности радиуса $R_{и}$ определяется выражением

$$t_{и} = \frac{2\pi R_{и}}{V_{и}},$$

где $V_{и}$ — скорость движения излучателя.

С точки зрения широкоазимутальности целесообразно описать по крайней мере один круг вокруг группы АНПА.

Тогда радиус $R_{и}$ определяется топологией взаимного положения группы АНПА и окружности исходя из того, что окружность должна быть описана вокруг группы АНПА для повышения широкоазимутальности, и длительностью одного оборота АНПА вокруг группы.

За время t_3 будет осмотрена площадь $R_{и}^2$ при движении излучателя со скоростью

$$V_{и} = \frac{2\pi R_{и}}{t_3}.$$

Затем происходит технологический перерыв по перемещению группы АНПА на новое место дислокации. На это затрачивается время

$$T_{тех} = t_1 + t_2 + t_4 + t_5.$$

В это время зондирование дна излучателем не производится; излучатель при этом может как находиться в состоянии покоя, так и продолжать свое движение.

Таким образом, время, затраченное на осмотр района площадью R^2 , определяется соотношением

$$T_{осм} = t_3 + (t_1 + t_2 + t_4 + t_5).$$

При *схеме 2* технологическое время $T_{тех}$, необходимое на приход АНПА в требуемую позицию для приема отраженных сигналов, «содержится» во времени t_3 , затрачиваемом на движение излу-

чателю по круговой траектории, поскольку перемещение части АНПА из группы, технологические работы по размещению их на дне и подготовка к приему отраженного сигнала происходят синхронно с перемещением излучателя. В этом случае времени на обследование района той же площади, что и в схеме 1, потребуется на $T = t_1 + t_2 + t_4 + t_5$ меньше, что позволяет считать схему 2 более эффективной по сравнению со схемой 1.

Второй показатель эффективности — степень координирования работы излучателя и группы АНПА — заключается в максимально возможном согласованном движении группы АНПА и центра окружности, вдоль которой осуществляется движение излучателя. Очевидно, что идеальным является вариант абсолютного совпадения геометрического «центра масс» группы АНПА с положением центра окружности, поэтому показатель эффективности определяется расстоянием между центром группы АНПА и центром окружности, оцениваемым в каждый момент времени ведения сейсморазведки.

Третий показатель эффективности — степень широкоазимутальности. Параметром, характеризующим степень широкоазимутальности, является среднеквадратическое отклонение (СКО) азимутов — отклонение от среднего значения азимутов прихода отраженных от залежей углеводородов сигналов на каждый геофон в каждый момент времени ведения сейсморазведки. Степень широкоазимутальности характеризуется СКО азимутов. При этом необходимо оговориться, что это происходит при полной группе азимутов или по крайней мере при получении не менее, например, 80 % отраженных сигналов. Если вследствие ограничений по дальности приема отраженных сигналов их количество окажется меньше, то погрешность разностно-дальномерного метода для определения местоположения залежей углеводородов может увеличиться.

Инструментарий для оценки эффективности ведения сейсморазведки

В основу разработанного инструментария для оценки эффективности положена математическая модель, в которой осуществляется воспроизведение поведения излучателя; группы АНПА; отдельно взятого АНПА, всецело определяемого поведением группы АНПА, как единого целого (АНПА в «контейнере»).

Степень детализации процессов, воспроизводимых в математической модели, определяется этапностью разработки математической модели. Разработанная в настоящей работе математическая модель воспроизводит процесс сейсморазведки в целом и может быть использована на начальных этапах исследований. На дальнейших

этапах проведения исследований, направленных на уточнение полученных на первом этапе результатов, ее необходимо будет дополнять и масштабировать за счет повышения степени детализации отдельных процессов с учетом сбалансированности всех воспроизводимых процессов, реализованных в математической модели.

В основу разработанного инструментария положены результаты имитации процессов, происходящих при ведении сейсморазведки. В каждом такте имитации воспроизводились процессы движения излучателя по круговой траектории, движение группы АНПА и отдельно взятых АНПА из группы, излучение излучателем зондирующего импульсного сигнала и прием геофонами отраженного от месторождений углеводородов сигнала. При этом оценивались задержки прихода сигнала на геофоны, и по полученным задержкам с использованием разностно-дальномерного метода определялись координаты положения залежей месторождений углеводородов. Месторождение углеводородов моделировалось в виде эллипсоида, размеры которого являлись случайными и разыгрывались равномерно из заданного диапазона. Положение месторождения в заданном районе также было случайным и разыгрывалось равномерно.

Для проведения численных экспериментов по определению оптимальных параметров ведения поиска месторождений углеводородов по предложенной схеме согласованного движения группы АНПА и излучателя разработанная математическая модель была программно реализована в виде программно-аппаратного комплекса.

Разработанный программно-аппаратный комплекс при проведении исследований, направленных на определение условий, обеспечивающих координацию функционирования излучателя и группы АНПА, дает возможность оперативно варьировать значения параметров, оказывающих влияние на координацию (согласованность). Такими параметрами являются:

- радиус окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя;
- скорость и направление перемещения центра этой окружности;
- скорость перемещения группы;
- геометрические размеры группы.

Программно-аппаратный комплекс представляет инструментарий, позволяющий иметь оперативную информацию о степени влияния параметров согласованного ведения сейсморазведки на широкоазимутальность и другие показатели эффективности.

Инструментарий программно-аппаратного комплекса обеспечивает:

- возможность оперативного ввода значений основных параметров поведения излучателя и группы АНПА при ведении сейсморазведки;

— отображение общего плана движения излучателя и группы АНПА в динамике;

— отображение результатов моделирования — конечного (СКО азимутов в цифровом виде) и промежуточных, оказывающих влияние на конечный результат.

Описание инструментария для проведения исследований

Для того чтобы иметь возможность наблюдать динамическое развитие процесса ведения сейсморазведки в реальном времени, в каждом такте имитации определяются текущие параметры — как промежуточные, так и конечные.

Среднеквадратическое отклонение азимутов в оцифрованном виде отображается на экране во время всего процесса имитации ведения сейсморазведки, что позволяет оперативно наблюдать количественный результат эффективности функционирования динамической системы ведения сейсморазведки.

Однако отображения одного только конечного результата — СКО азимутов — недостаточно для вскрытия причинно-следственных связей и факторов, оказывающих влияние на конечный результат, необходимо дополнительно иметь данные, оказывающие влияние на полученный результат. Поскольку СКО азимутов — это результат обобщения азимутов, то наряду со СКО азимутов необходимо иметь представление о распределении азимутов как в цифровом виде, так и в более наглядном — графическом представлении, например, в виде гистограммы. Поэтому наряду со значением СКО азимутов в программно-аппаратном комплексе реализована возможность отображения гистограммы распределения азимутов по направлениям прихода отраженных сигналов.

Отображение гистограммы азимутов позволяет проследить в динамике изменение распределения азимутов по направлениям с тем, чтобы иметь возможность оказать влияние на вид гистограммы путем корректировки задаваемых параметров сейсморазведки.

Вместе с тем отображение гистограммы распределения азимутов по направлениям не учитывает ограничения на дистанции приема отраженных сигналов, формируемых излучателем. Поэтому программно-аппаратный комплекс предоставляет в дополнение к описанному выше инструментарию в виде отображения:

— траекторий движения АНПА группы относительно излучателя;

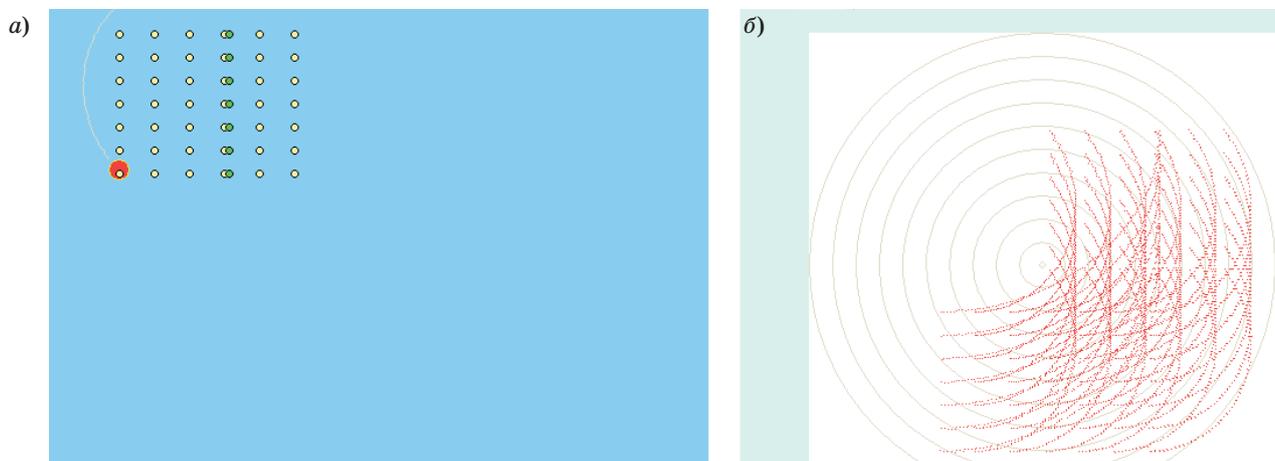
— розы-диаграммы, отражающей плотность заполнения сейсмотрасс цветовым решением по направлениям и по дистанциям.

Вид траекторий движения АНПА из группы относительно излучателя представлен на рис. 1, а, поступательное движение излучателя и группы АНПА показано на рис. 1, б.

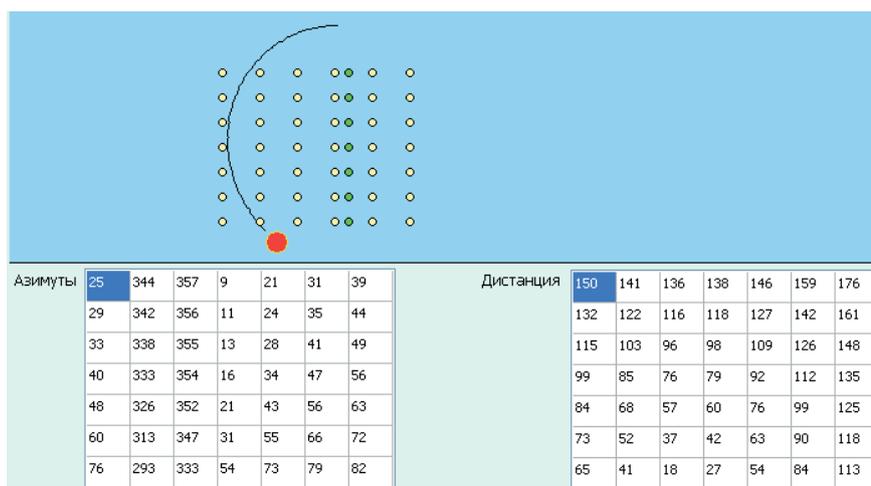
Для того чтобы иметь возможность определить, на основе каких данных сформированы траектории относительного движения и роза-диаграмма, в реальном времени в каждом такте имитации программно-аппаратный комплекс обеспечивает отображение текущих значений азимутов каждого АНПА и дистанций в цифровом виде, как это показано в таблицах на рис. 2.

На основании этих таблиц формируется сводная таблица азимутов и дистанций с результатами суммирования азимутов по направлениям и дистанций по отрезкам, позволяющая, по сути, иметь оцифрованный вид гистограмм (рис. 3).

И, наконец, программно-аппаратный комплекс обеспечивает отображение конечного результата, динамику его изменения с течением времени. Для этого в каждом такте имитации



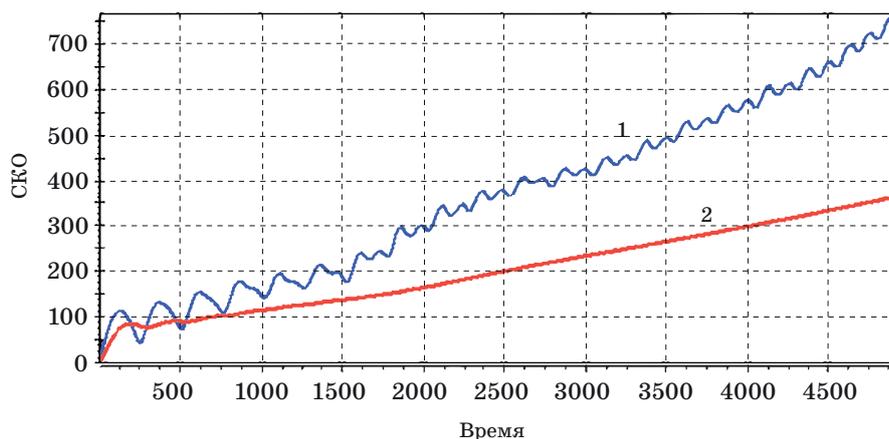
■ **Рис. 1.** Отображение согласованного перемещения излучателя и группы АНПА (а) и траекторий перемещения АНПА относительно излучателя (б)



■ Рис. 2. Отображение таблиц азимутов и дальностей в ходе согласованного перемещения излучателя и группы АНПА

0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400			
10	211	618	991	1151	1151	1105	593															5820	
20	225	721	869	1100	1194	1143	788																6040
30	288	628	1042	1152	1167	1040	864	331															6512
40	241	686	901	1011	998	1014	908	596	83														6438
50	294	680	847	948	1050	912	835	690	301														6557
60	283	660	958	871	1097	1014	874	716	412														6885
70	249	749	781	1168	893	1164	998	778	480														7260
80	251	825	771	999	1092	1228	1214	852	438														7670
90	191	718	816	1109	1178	1156	1398	1139	203														7908
100	210	809	947	1285	1387	1328	1357	1148	226														8697
110	232	837	779	1022	1067	1212	1206	829	435														7619
120	255	720	784	1155	883	1171	948	742	497														7155
130	244	662	939	876	1058	993	881	720	414														6787
140	289	652	825	916	1086	906	871	701	281														6527
150	269	662	930	945	994	1087	940	557	52														6436
160	270	626	1004	1151	1120	1082	857	263															6373
170	233	719	871	1058	1242	1087	734																5944
180	335	668	921	1108	1131	1010	538																5711
190	179	676	1009	1167	1215	1097	525																5868
200	283	746	928	1076	1211	1060	745																6049
210	301	641	939	1062	1095	1049	857	317															6261
220	276	674	831	973	949	1044	866	562	78														6253
230	273	653	843	920	1009	870	866	646	292														6372
240	280	604	888	767	1071	977	807	735	403														6532
250	255	733	777	1125	849	1064	982	701	485														6971
260	251	784	767	894	1088	1088	1224	785	428														7309
270	207	660	783	1019	1137	1112	1334	1101	132														7485
280	239	719	979	1202	1354	1253	1347	1107	182														8382
290	285	795	690	950	1100	1127	1193	762	416														7318
300	297	713	827	1127	839	1109	951	713	478														7054
310	266	625	917	811	1071	998	825	707	370														6590
320	275	633	832	925	1020	894	814	668	276														6337
330	272	688	865	1008	991	980	909	584	60														6357
340	250	654	994	1060	1144	1075	839	275															6291
350	290	783	929	1050	1147	1070	761																6030
360	177	585	921	1131	1093	994	517																5418
9226	25006	31695	37292	39171	38513	33166	19725	7422	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

■ Рис. 3. Таблица накопленных значений азимутов и дистанций дальностей в ходе согласованного перемещения излучателя и группы АНПА



■ **Рис. 4.** Вид изменения СКО азимуты направлений прихода отраженных сигналов в течение согласованного перемещения излучателя и группы АНПА: 1 — накопленный; 2 — осредненный по тактам

строится график СКО накопленных значений азимуты к текущему моменту времени, а также интегрированное СКО азимуты на текущий момент времени (рис. 4).

Предложенный инструментарий, предоставляемый программно-аппаратным комплексом, позволяет проводить всесторонний анализ влияния параметров на конечный результат, оптимизировать параметры сейсморазведки для обеспечения эффективного ее ведения.

Далее приведено описание использования инструментария программно-аппаратного комплекса при проведении исследований, направленных на вскрытие причинно-следственных связей при ведении сейсморазведки.

Пример использования предлагаемого инструментария для проведения исследований

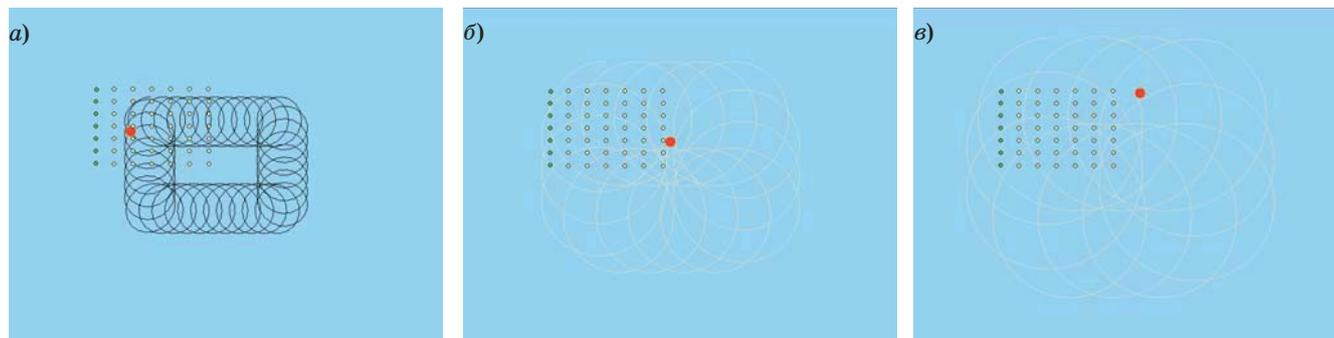
Был проведен эксперимент для различных значений радиуса движения излучателя по окружности (рис. 5, а–в). При этом была задана дальность приема отраженного сигнала, равная 180 м.

По результатам проведения численного эксперимента была получена зависимость значений СКО азимуты от радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя (рис. 6).

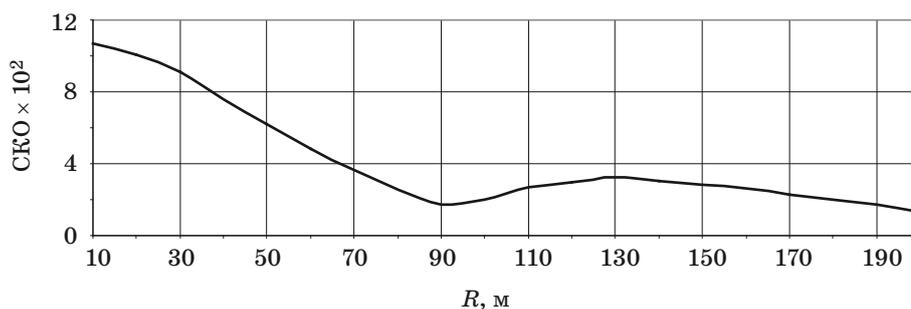
Для примера проанализируем результат, полученный при изменении радиуса обхода группы от 10 до 200 м, и оценим влияние радиуса на СКО азимуты.

Ярко выраженный минимум СКО азимуты виден при $R = 90$ м. Для определения причин изменения монотонности зависимости СКО азимуты от радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, используем предоставляемый программно-аппаратным комплексом инструментарий. Анализ результатов производился в два этапа.

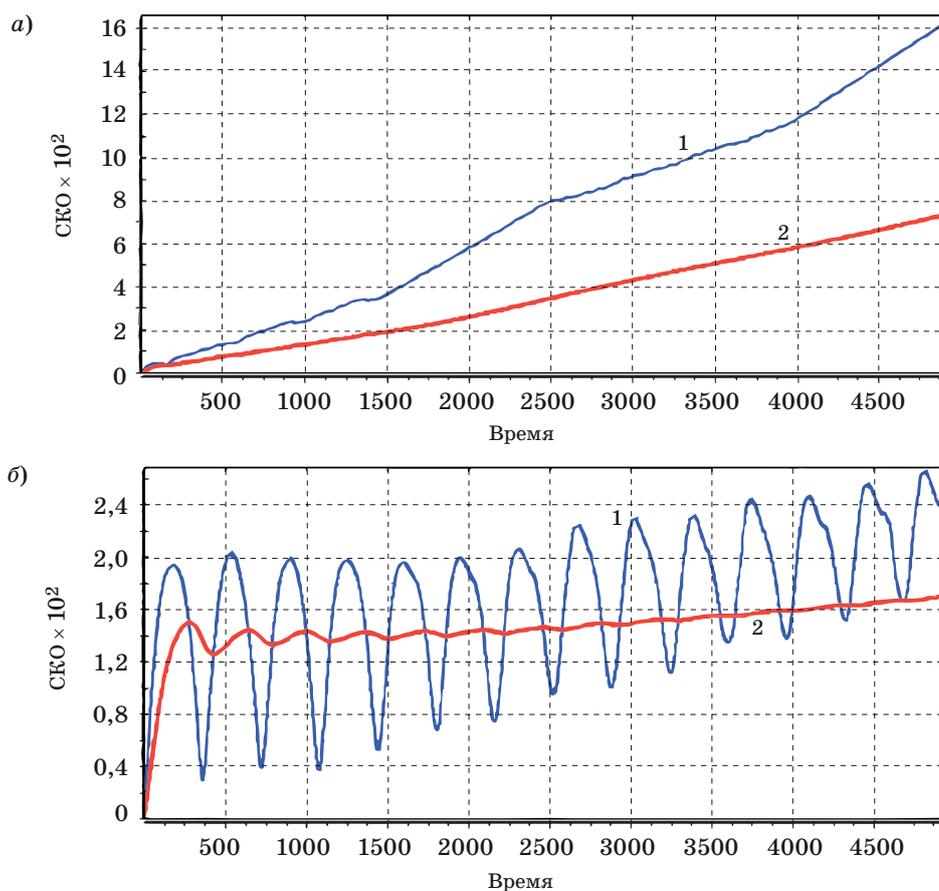
На первом этапе анализируем причину наличия максимума СКО азимуты при $R = 10$ м, а затем последующее снижение СКО азимуты вплоть до значения $R = 100$ м. Зависимости СКО азимуты накопленного сигнала 1 и осредненного по тактам 2 для двух вариантов показаны на рис. 7, а и б.



■ **Рис. 5.** Схема согласованного перемещения излучателя и группы АНПА при различных радиусах окружности, вдоль которой происходит движение излучателя: а — 40 м; б — 100 м; в — 140 м



■ Рис. 6. Влияние радиуса окружности на СКО азимутов



■ Рис. 7. Зависимости СКО азимутов от радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя: а — $R = 10$ м; б — $R = 100$ м

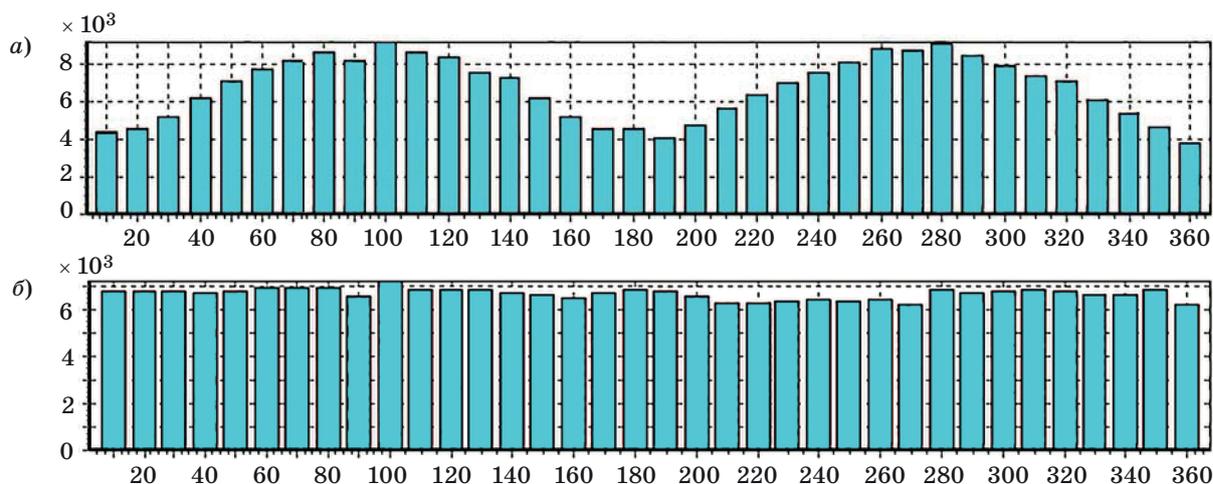
Для выявления степени равномерности азимутов направлений, с которых приходит отраженный сигнал, проанализируем гистограммы, представленные на рис. 8.

При $R = 10$ м (рис. 8, а) значения азимутов в каждом такте, по сути, одни и те же, поскольку излучатель вращается по круговой траектории внутри группы.

Сравнивая гистограммы, видим, что при $R = 10$ м в гистограмме азимутов с течением времени формируются ярко выраженные максимумы в области 100 и 270° , а при $R = 100$ м (соответствует точке

минимума на графике рис. 6) имеем распределение, близкое к равномерному (рис. 8, б).

Минимум в гистограмме азимутов возникает из-за периодичности зависимости, которая хорошо видна на графике: за счет колебаний происходит компенсация однобоких направлений прихода отраженного сигнала. В свою очередь, периодичность возникает из-за постепенного описания излучателем окружности вокруг группы АНПА. Для понимания того, откуда берется периодичность, смотрим на цифровые значения в таблице (см. рис. 3).



■ **Рис. 8.** Гистограммы распределения азимутов направлений, с которых приходит отраженный сигнал: *а* — $R = 10$ м; *б* — $R = 100$ м

Физически все описанное выше означает следующее: при движении излучателя внутри группы с малым радиусом вне зависимости от его положения все геофоны будут наблюдаться под одними и теми же «внутренними» углами. Чтобы скомпенсировать внутренние углы, необходимо хотя бы часть азимутов иметь при нахождении излучателя за пределами группы.

На втором этапе проведения исследований анализируем причину начала подъема значений СКО азимутов после точки $R = 100$ м (см. рис. 6).

Анализ таблиц цифровых значений показал, что с ростом радиуса окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, возникает тот же эффект, что и при малом радиусе: с увеличением радиуса вне зависимости от положения излучателя на окружности все направления прихода отраженного сигнала на АНПА группы являются «внешними». Этим объясняется увеличение СКО азимутов с увеличением радиуса. Увеличение СКО азимутов продолжается до отметки $R = 130$ м, однако затем снова начинается спад. Для анализа причин этого явления рассмо-

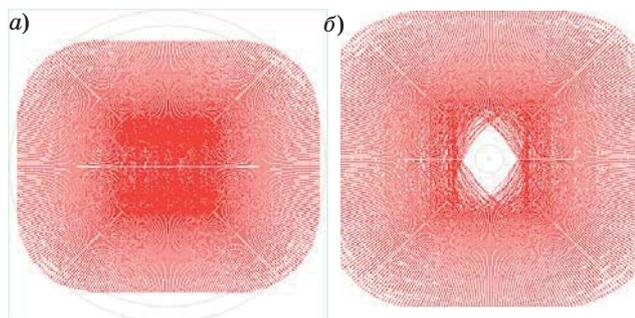
трим траектории (рис. 9, *а* и *б*) и розу-диаграмму (рис. 10, *а* и *б*) при $R = 100$ м и $R = 180$ м.

Наблюдается влияние ограничения по дальности приема отраженного сигнала: на рис. 9, *б* трассы явно вышли за пределы заданных дальностей. Об этом же свидетельствует роза-диаграмма азимутов (см. рис. 10): при увеличении радиуса окружности часть дистанций вышла за пределы заданной предельно допустимой дальности.

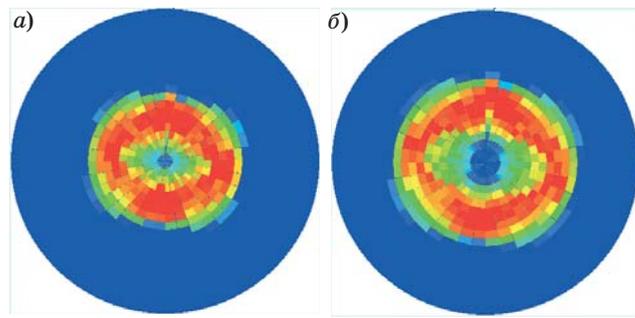
Для того чтобы определить часть азимутов, которые были исключены из расчета СКО азимутов, рассмотрим гистограммы распределения дистанций (рис. 11, *а* и *б*). Видно, что большая часть дистанций вышла за допустимые пределы.

Этим объясняется спад СКО азимутов на графике (см. рис. 6): из статистического накопления для определения СКО азимутов были исключены часть азимутов вследствие выхода дистанций прихода отраженных сигналов за допустимые пределы.

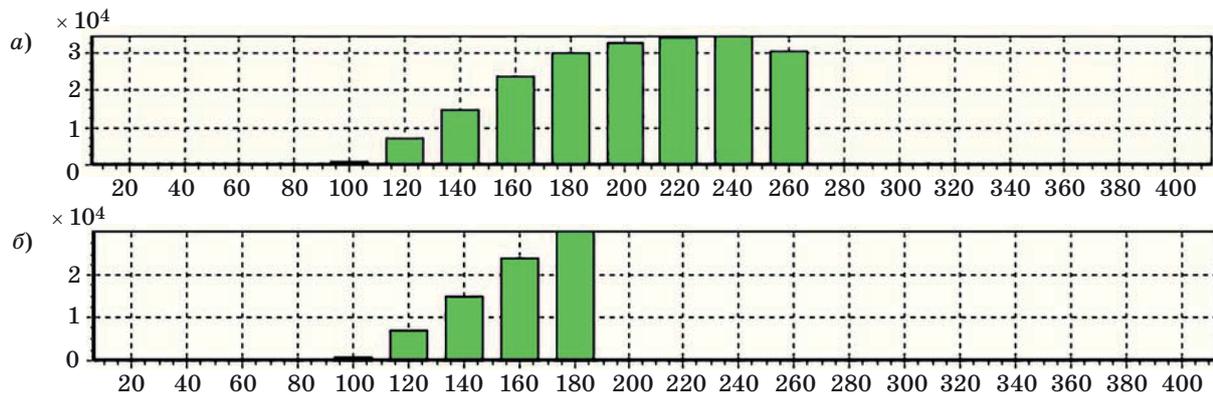
Однако снижение СКО азимутов на больших радиусах вследствие исключения части азимутов из статистической обработки нельзя считать в данном случае положительным результатом, по-



■ **Рис. 9.** Траектория перемещения АНПА относительно излучателя: *а* — $R = 100$ м; *б* — $R = 180$ м



■ **Рис. 10.** Роза-диаграмма плотности сейсмотрасс по азимутам и дистанциям: *а* — $R = 100$ м; *б* — $R = 180$ м



■ **Рис. 11.** Гистограмма распределения дистанций без ограничений (а) и с ограничениями (б) по дальности

скольку при исключении части азимутов уменьшается общее число АНПА, участвующих при использовании разностно-дальномерного метода расчета местоположений залежей углеводородов, в связи с чем возникают погрешности определения местоположения залежей углеводородов, только теперь уже на уровне самого метода.

Заключение

Определены показатели эффективности ведения сейсморазведки с использованием группы АНПА.

Разработан инструментарий для определения параметров согласованного поведения излучателя и группы АНПА с приемниками-геофонами.

Положенная в основу разработанного инструментария математическая модель с элементами имитации может рассматриваться как базовая при формировании общей схемы ведения сейсморазведки и в дальнейшем может быть расширена за счет повышения степени детализации отдельных воспроизводимых в ней процессов.

Программная реализация математической модели предоставляет инструментарий, который позволяет проводить широкомасштабные исследования влияния параметров ведения сейсморазведки на результат согласованного функционирования излучателя и группы АНПА, вскрывать причинно-следственные связи и намечать пути повышения эффективности ведения сейсморазведки, определять параметры оптимальной схемы функционирования излучателя и группы АНПА для обеспечения эффективного ведения сейсморазведки залежей углеводородов.

Анализ результатов в реальном масштабе времени позволяет оперативно внести коррективы в схему ведения сейсморазведки, выявить причины снижения результатов, создать основу для проведения дальнейших, более глубоких исследований в рамках выбранной схемы ведения сейсморазведки залежей углеводородов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00666).

Литература

1. Фасхутдинов Р. В. Подводные камни морской сейсморазведки // *www.Korabel.ru*. 2016. Вып. 2. С. 98–106.
2. Лаверов Н. П., Дмитриевский А. Н., Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа России // *Арктика: экология и экономика*. 2011. № 1. С. 25–37.
3. Лаверов Н. П., Лобковский Л. И., Тулупов А. В., Воронов М. А., Ганжа О. Ю. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // *Арктика: экология и экономика*. 2011. № 4. С. 4–13.
4. Зверев С. М. ГСЗ на океанах за 30 лет экспедиций: методика и волновые поля // *Физика Земли*. 1999. № 7–8. С. 143–163. <http://www.arctica-ac.ru/docs/4/4-13.pdf> (дата обращения: 03.02.2017).
5. Тюхалов В. И. Исследование и разработка автоматизированной системы управления и контроля параметров группового пневматического источника для морской нефтегазовой сейсморазведки. <http://earthpapers.net/issledovanie-i-razrabotka-avtomatizirovannoy-sistemy-upravleniya-i-kontrolya-parametrov-grupпового-pnevmaticheskogo-istoc> (дата обращения: 03.02.2017).
6. Лисицын Е. Д., Кяспер В. Э., Петров А. А., Тулупов А. В. Новые возможности морских электромагнитных исследований при поисках углеводородов в транзитной зоне, на мелководье и на больших глубинах. <http://rudocs.exdat.com/docs/index-16267.html?page=4> (дата обращения: 03.02.2017).
7. Delaney J. R. NEPTUNE: An Interactive Submarine Observatory at the Scale of a Tectonic Plate. Long-Term Observations in the Oceans// *OHP/ION Joint Symp. Japan*, 2001. P. 309.

8. Maultzsch S., Nawab R., Yuh S., et al. An Integrated Multiazimuth VSP Study for Fracture Characterization in the Vicinity of a Well // *Geophys Prosp.* 2009. Vol. 57. P. 263–274.
9. Wild P. Practical Application of Seismic Anisotropy // *First Break.* May 2011. Vol. 29. P. 117–124.
10. Leureira K. C. Compressional and Shear-Wave Velocities and Attenuation in Deep-sea Sediment During Laboratory Compaction // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2004. Vol. 116. N 4. P. 2023–2030.
11. Пат. 2381530 РФ. Морская автономная донная станция для выполнения геофизических и геологических работ / А. И. Машошин, С. В. Жуменков, В. Б. Зиннатов, С. Ю. Ермаков, А. С. Смирнов (РФ). — № 2008124873/28; заявл. 10.06.2008; опубл. 10.02.2010, Бюл. № 4. — 8 с.
12. Пат. 2438149 РФ. Автономная донная станция для сейсмических наблюдений / И. А. Ильин, П. Г. Бродский, В. С. Аносов, Д. Г. Левченко, Е. Р. Павлюкова, В. П. Леньков, В. В. Чернявец, А. А. Зайцев, А. Л. Гвоздецкий (РФ). — № 2010103093/28; заявл. 29.01.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. — 14 с.
13. Пат. 2435180 РФ. Подводная геофизическая станция / С. Я. Сукокин, С. В. Белов, А. В. Кошурников, П. Ю. Пушкарев, Н. П. Рыбаков, С. Ю. Чернявец, В. В. Червинчук (РФ). — № 2010113601/28, заявл. 07.04.2010; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33. — 13 с.
14. Максимов С. В. О применении автономных необитаемых подводных аппаратов в технологии тотальной донной сейсморазведки / Технические проблемы освоения Мирового океана: тр. 4-й Всерос. науч.-техн. конф. Секция 2. Владивосток, 2011. С. 220–224.
15. Пат. № 2515170 РФ. Подвижная подводная автономная сейсмогидроакустическая станция разведки углеводородов на акватории арктического шельфа / П. Д. Груздев, В. П. Дмитриченко, Р. А. Жостков, В. Н. Кочедыков, М. З. Нисневич, О. В. Руденко, А. Л. Собисевич, Л. Е. Собисевич, В. А. Солдатенков, П. Д. Сухопаров (РФ). — № 2012136491/28; заявл. 24.08.2012; опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6. — 6 с.
16. Кебкэл К. Г., Машошин А. И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // *Гирроскопия и навигация.* 2016. Т. 24. № 3. С. 115–130.
17. Буя М., Флорес П. Э., Хилл Д., Палмер Э., Росс Р., Уокер Р., Хаубирс М., Томпсон М., Лаура С., Менликли Д., Молдовану Н., Снайдер Э. Морская сейсморазведка по спиральной траектории Coil Shooting // *Нефтегазовое обозрение.* 2008. Т. 21. № 4. С. 22–39.
18. Мартынова Л. А. Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // *Информационно-управляющие системы.* 2017. № 1. С. 83–92. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83

UDC 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.77

Tools for Studying the Efficiency of Seismic Exploration with Standalone Unmanned SubmersiblesMartynova L. A.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, martynowa999@bk.ru^aState Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Seismic survey is the most promising type of underice exploration. Seabed geophones accept the signals radiated by a special vibrator and then reflected from hydrocarbon deposits. The transition from a static seismic exploration scheme to a dynamic one with the use of standalone unmanned submersibles is tempting but difficult to implement, as it is hard to ensure the concordant action of a radiator moving in circles and a group of submersibles moving progressively. A large-scale research to determine the optimal parameters for a dynamic seismic survey system is possible only with the use of mathematical modeling allowing you to create tools (a set of methodical and technical means) for the researches of seismic exploration efficiency. **Purpose:** The goal is to offer a mathematical model for developing the tools of studying the efficiency of seismic exploration with the use of standalone unmanned submersibles. **Results:** For the role of performance indicators, we have accepted the specified area inspection time, the degree of coordination between the radiator and the group of submersibles, and the width of the azimuth formed by the directions of the received signals emitted by the radiator. We have formulated the requirements to the mathematical model associated with the degree of specification of the modelled processes. On the base of the mathematical model, the research tools have been developed which include the tables of azimuth values for the reflected signals and distances from the submersibles to the radiator on each step of the simulation, the distribution histograms for the azimuths of the reflected signals and distances to the radiator, the relative movement trajectories for the submersibles, an azimuthal rose diagram, a table of cumulative values for azimuths and distances, and a graphical representation of the mean squared deviation of the azimuths in time. A special example demonstrates the way of using the developed tools to optimize the parameters of seismic exploration. **Practical relevance:** The developed indicators and tools can essentially reduce the time necessary for choosing the optimal search algorithms. It also helps you to visualize obtaining the values, to reveal the cause and effect and, hence, to provide a quick decision-making in choosing the optimal parameters and technical solutions.

Keywords — Standalone Unmanned Submersible, Concordant Action Method, Azimuths, Mean Squared Deviation.

References

1. Fashkutdinov R. V. Reefs of Naval Seismic Exploration. *www.Korabel.ru*, 2016, iss. 2, pp. 98–106 (In Russian).
2. Laverov N. P., Dmitriyevsky A. N., Bogoyavlensky V. I. Fundamental Aspects of Development of Oil and Gas Resources of the Arctic Shelf of Russia. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2011, no. 1, pp. 25–37 (In Russian).
3. Laverov N. P., Lobkovsky L. L., Tulupov A. V., Ravens M. A., Ganzha O. Y. The Prospects of Ground Seismic Exploration in the Russian Federation. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2011, no. 4, pp. 4–13 (In Russian).
4. Zverev S. M. GSZ in Oceans in 30 Years of Expeditions: Technique and Wave Fields. *Physics of Earth*, 1999, no. 7–8, pp. 143–163. Available at: <http://www.arctica-ac.ru/docs/4/4-13.pdf> (accessed 03 February 2017) (In Russian).
5. Tyukhalov V. I. *Issledovanie i razrabotka avtomatizirovanoi sistemy upravleniya i kontrolya parametrov gruppovogo pnevmaticheskogo istochnika dlia morskoi neftegazovoi seismorazvedki* [Research and Development of an Automated Control System and Control of Parameters Group Pneumatic Source for Naval Oil and Gas Seismic Exploration]. Available at: <http://earthpapers.net/issledovanie-i-razrabotka-avtomatizirovannoy-sistemy-upravleniya-i-kontrolya-parametrov-gruppovogo-pnevmaticheskogo-istoc> (accessed 03 February 2017) (In Russian).
6. Lisitsyn E. D., Kyasper V. E., Petrov A. A., Tulupov A. V. *Novye vozmozhnosti morskikh elektromagnitnykh issledovaniy pri poiskakh uglevodorodov v tranzitnoi zone, na melkovođe i na bol'shikh glubinakh* [New Opportunities of Sea Electromagnetic Researches by Searches of Hydrocarbons in a Transit Zone, in Shallow Water and at Big Depths]. Available at: <http://rudocs.exdat.com/docs/index-16267.html?page=4> (accessed 03 February 2017) (In Russian).
7. Delaney J. R. NEPTUNE: an Interactive Submarine Observatory at the Scale of a Tectonic Plate. *OHP/ION Joint Symp.*, Japan, 2001, p. 309.
8. Maultzsch S., Nawab R., Yuh S. An Integrated Multiazimuth VSP Study for Fracture Characterization in the Vicinity of a Well. *Geophys Prosp*, 2009, vol. 57, pp. 263–274.
9. Wild P. Practical Application of Seismic Anisotropy. *First Break*, May 2011, vol. 29, pp. 117–124.
10. Leurera K. C. Compressional and Shear-wave Velocities and Attenuation in Deep-sea Sediment During Laboratory Compaction. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 2004, vol. 116, no. 4, pp. 2023–2030.
11. Mashoshin A. I., Zhumenkov S. V., Zinnatov V. B., Ermakov S. Y., Smirnov A. S. *Morskaia avtonomnaia donnaia stantsiia dlia vypolneniya geofizicheskikh i geologorazvednykh rabot* [The Sea Autonomous Ground Station for Accomplishment of Geophysical and Exploration Works]. Patent RU, no. 2381530, 2008 (In Russian).
12. Il'in I. A., Brodskij P. G., Anosov V. S., Levchenko D. G., Pavljukova E. R., Len'kov V. P., Chernjavets V. V., Zajtsev A. A., Gvozdet'skij A. L. *Avtonomnaia donnaia stantsiia dlia seismicheskikh nabludenii* [Independent Bottom Station for Seismic Observations]. Patent RU, no. 2438149, 2010.
13. Sukonkin S. J., Rybakov N. P., Belov S. V., Chervinchuk S. J., Koshurnikov A. V., Pushkarev P. J., Chernjavets V. V. *Podvodnaia geofizicheskaia stantsiia* [Underwater Geophysical Station]. Patent RU, no. 2435180, 2010.
14. Maximov S. V. About use of Autonomous Uninhabited Submersibles in Technology of Total Ground Seismic Exploration. *Trudy 4-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Tekhnicheskie problemy osvoeniia Mirovogo okeana"* [Proc. 4th All-Russian Scientific and Technical Conference "Engineering Problems of Development of the World Ocean"], Section 2, Vladivostok, 2011, pp. 220–224 (In Russian).
15. Gruzdev P. D., Dmitrichenko V. P., Zhostkov R. A., Kochedykov V. N., Nisnevich M. Z., Rudenko O. V., Sobisevich A. L., Sobisevich L. E., Soldatenkov V. A., Sukhoparov P. D. *Podvizhnaia podvodnaia avtonomnaia seismogidroakusticheskaja stantsiia razvedki uglevodorodov na akvatorii arkticheskogo shel'fa* [Mobile Self-contained Underwater Seismic-hydroacoustic Station for Exploration of Hydrocarbons on Water Area of Arctic Shelf]. Patent RU, no. 2515170, 2012.
16. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. Acoustic Positioning Methods of Autonomous Underwater Vehicles. *Giroskopiia i navigatsiia*, 2016, vol. 24, no. 3, pp. 115–130 (In Russian).
17. Buoy M. S., Flores P. E., Hill D., Palmer E., Ross R., Walker R., Haubirs M., Thompson M., Laura S., Menlikli D., Moldovan N., Snider E. Naval Seismic Exploration on a Spiral Trajectory of Coil Shooting. *Neftegazovoe obozrenie*, 2008, vol. 21, no. 4, pp. 22–39 (In Russian).
18. Martynova L. A. Concerted Action of a Radiator and Autonomous Uninhabited Submersibles for Effective Seismic Exploration. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 83–92 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83

ДВУХЭТАПНЫЙ АЛГОРИТМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И РЕЖЕКЦИИ МНОГОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ В НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГЛОНАСС

А. С. Кошкар^а, канд. техн. наук

В. А. Добриков^а, канд. техн. наук, доцент

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: анализ разработок в области повышения помехоустойчивости навигационных приемников подвижных объектов и информационно-телематических систем показал, что в них не в полной мере используются возможности цифровой обработки сигналов. Особенно это проявляется при работе навигационных приемников в условиях помех. Соответственно, существует необходимость в разработке и применении новых алгоритмов обработки навигационных сигналов, использующих возможности цифровой обработки сигналов на различных этапах их преобразования в навигационной аппаратуре потребителя, в том числе на предкорреляционном. **Результаты:** показана возможность и предложен двухэтапный алгоритм детектирования и режекции многочастотных помех в навигационной аппаратуре потребителей ГЛОНАСС на основе использования цифровой предкорреляционной обработки сигналов. На первом этапе проводится контроль помеховой обстановки, построение частотной панорамы помех и автономное определение параметров гармоник многочастотных помех. На втором этапе осуществляется режекция протектированных составляющих многочастотных помех во временной области на основе использования банка коэффициентов цифрового фильтра. **Практическая значимость:** результаты исследований и сформулированные ограничения по уровню и ширине спектра режектируемых помех могут быть использованы при разработке и обосновании требований к перспективным образцам помехоустойчивых навигационных приемников. Приведенные результаты анализа искажений автокорреляционных функций навигационных сигналов системы ГЛОНАСС с частотным и кодовым разделением при режекции многочастотных помех определяют границы суммарной области режекции спектра помехи при использовании предложенного алгоритма.

Ключевые слова — навигационная аппаратура потребителей, помехоустойчивость, многочастотные помехи, обнаружение помех, режекция помех.

Введение

Опыт эксплуатации глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС, а также развертываемых ГНСС Beidou и Galileo показывает их высокую эффективность в качестве средств координатно-временного обеспечения потребителей [1] и дает мощный импульс к расширению диапазона их практических применений. В ближайшей перспективе ГНСС в комплексе с разрабатываемыми и вводимыми системами функциональных дополнений [2] призваны играть доминирующую роль в решении любых задач, относящихся к построению систем управления подвижными объектами, информационно-телематических систем, систем глобальной навигации и синхронизации.

Навигационная аппаратура потребителей (НАП) непосредственно обеспечивает выполнение потребителями навигационных определений по формируемому ГНСС радионавигационному полю. Высокий уровень интеграции НАП в системы управления объектов навигации задает особые требования к точности местоопределения по сигналам ГНСС и помехоустойчивости НАП. В то же время подверженность НАП воздействию преднамеренных и непреднамеренных помех делает ее уязвимой при использовании в качестве

основного средства навигации. Некоторые виды помех могут сделать НАП полностью неработоспособной, другие не позволяют решать навигационную задачу с заданной точностью, что в ряде случаев равносильно невыполнению НАП своего целевого предназначения. В настоящей статье рассмотрен двухэтапный алгоритм определения параметров и режекции многочастотных (полигармонических) помех и рассмотрены возникающие при его реализации искажения автокорреляционной функции сигналов ГНСС ГЛОНАСС.

Анализ возможностей компенсации влияния помех на работу НАП

Помехи радиоэлектронным средствам принято разделять на непреднамеренные и преднамеренные [4]. Идентифицированные к настоящему времени искусственные непреднамеренные помехи в диапазонах частот спутниковой радионавигации создаются радиопомехами, гармониками телевизионных сигналов, сигналами запроса систем ближней навигации, гармониками УКВ-радиостанций, спутниковыми системами связи и радиолокационными станциями систем управления воздушным движением [5]. Эффективность борьбы с такими непреднамеренными помехами определяется мерами организационного харак-

тера и достигается сертификацией, регламентацией и контролем радиодиапазонов систем спутниковой навигации, а также допущениями и техническими решениями при разработке и проектировании НАП.

Наибольшую опасность для НАП представляют преднамеренные помехи, ограничивая или делая невозможными навигационные определения потребителя. Компенсация влияния преднамеренных помех возможна на различных этапах обработки навигационных сигналов и с использованием различных методов, но с различной эффективностью. При этом одними из наименее благоприятных для навигационных приемников ГЛОНАСС являются многочастотные (полигармонические) помехи с количеством гармоник от 20 до 30. Такие помехи, особенно с учетом возможности согласования спектральных составляющих, являются достаточно простыми для формирования и малоэнергозатратными при создании полей помех в локальных областях. Более сложным вариантом использования преднамеренных многочастотных помех является подмена навигационного поля (spoofing), используемого, в частности, в ГНСС ГЛОНАСС, путем имитации навигационных сигналов ГНСС с частотным разделением сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) [6]. Таким образом, прием широкополосных навигационных сигналов на фоне многочастотных помех имеет широкое практическое применение.

Исходя из особенностей построения НАП как приемного устройства корреляционного типа, выделим два направления повышения его помехоустойчивости — использование предкорреляционных и посткорреляционных методов. К первой группе методов относятся временная и спектральная селекция, а также алгоритмы первичной обработки сигналов. Ко второй группе ме-

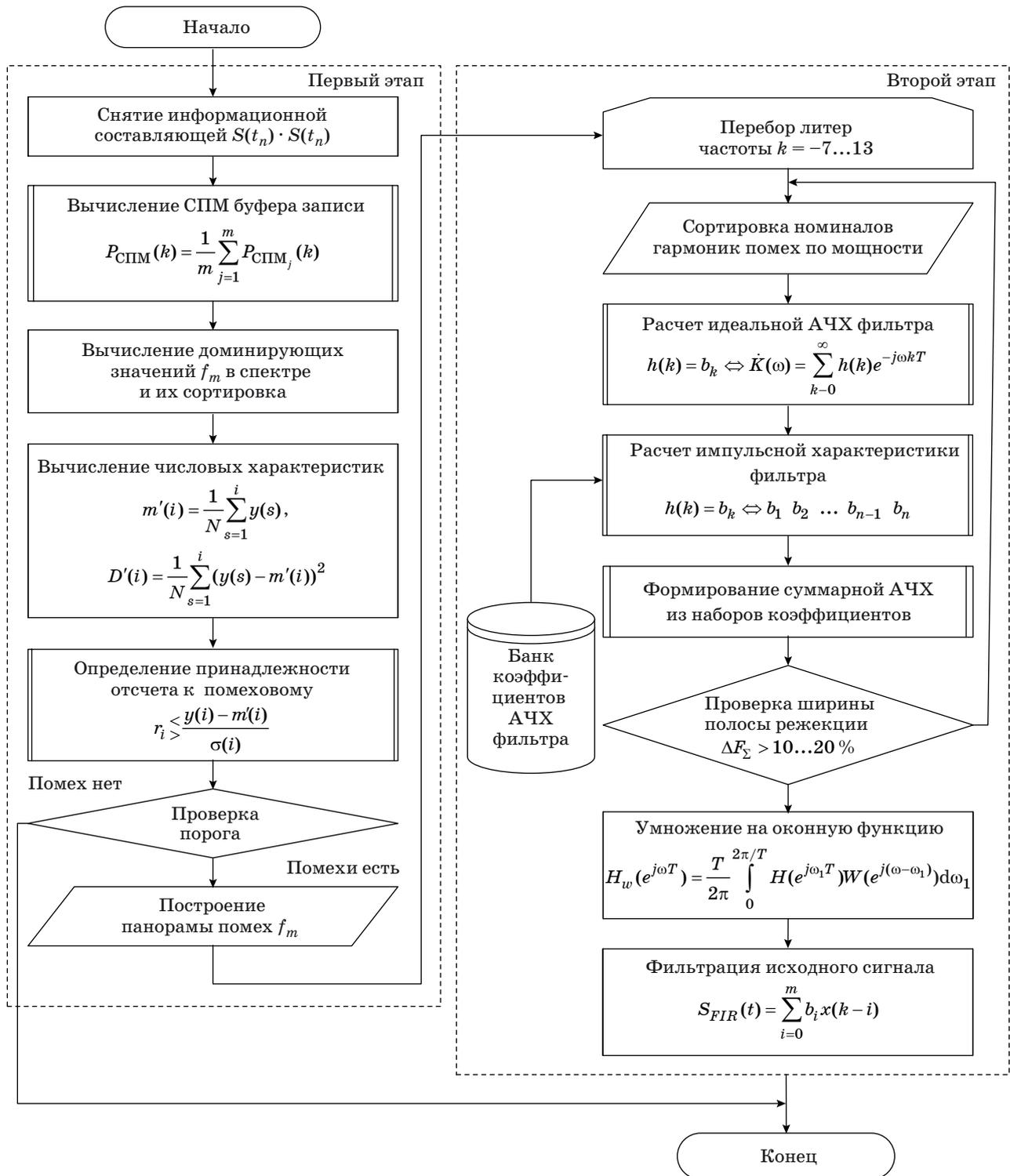
тодов относятся алгоритмы вторичной обработки сигналов. Общая характеристика обеих групп методов приведена в таблице.

Без учета использования адаптивных антенных решеток [7] наиболее эффективными методами повышения помехоустойчивости НАП являются методы спектральной и временной фильтрации. Использование при спектральной фильтрации нескольких операций ортогональных преобразований требует значительных вычислительных ресурсов. Другими проблемами при реализации методов спектральной фильтрации являются сложности расчета порога обнаружения помех, определения положения и числа удаляемых спектральных линий в спектре сигнала. Исходя из этого для реализации алгоритма режекции многочастотных помех будем использовать временную фильтрацию. Преимуществом такого метода является его техническая реализуемость и возможность адаптации в режиме реального времени к детектируемой помеховой обстановке. При этом использование в качестве устройств временной фильтрации фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтров) целесообразно как в техническом плане реализации, так и по потенциальным возможностям подавления многочастотных помех. Блоки, выполняющие такую операцию, могут иметь как программную, так и аппаратную реализацию.

Схема разработанного двухэтапного алгоритма детектирования и режекции во временной области многочастотных помех представлена на рис. 1. Работу синтезируемого алгоритма временной фильтрации (режекции) многочастотных помех целесообразно построить из двух последовательно выполняемых этапов: первый этап — определение параметров отдельных частотных составляющих помех (детектирование помех);

■ Методы повышения помехоустойчивости НАП ГНСС

Способ реализации	Достижимый уровень ослабления помехи, дБ	Возможный уровень реализации
Предкорреляционные методы		
Управление диаграммой направленности адаптивных антенных решеток	30–60	Аналого-цифровой
Спектральная фильтрация	20–30	Цифровой (программный)
Временная фильтрация	20–30	То же
Алгоритмы первичной обработки	10–15	– // –
Посткорреляционные методы		
Автономный контроль целостности	Внутренний	10–15
	Внешний	10–15
		Программный
		Аналого-цифровой, программный



■ **Рис. 1.** Схема двухэтапного алгоритма детектирования и режекции во временной области многочастотных (полигармонических) помех: СПМ — спектральная плотность мощности; АЧХ — амплитудно-частотная характеристика

второй этап — расчет параметров цифрового фильтра (режекция помех).

При работе алгоритма осуществляются непрерывный оперативный контроль помеховой об-

становки путем циклического исполнения первого этапа и, при необходимости, подключение в работу второго этапа для режекции протектированных гармоник помех.

Детектирование многочастотных помех на основе построения частотной панорамы

Рассмотрим порядок действий для реализации этапа детектирования помех в частотной области на основе использования алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). При работе с входным сигналом для перехода в спектральную область необходимо выполнить следующие действия.

Шаг 1. Выбор интервалов анализа и накопления при детектировании. Определяется количеством периодов накопления принимаемого сигнала и зависит от сложности помеховой обстановки. По результатам моделирования установлено, что накопление необходимо до 100 периодов навигационного сигнала при когерентном приеме и свыше 100 периодов — при некогерентном приеме.

Шаг 2. Гетеродинирование принятых отсчетов навигационного сигнала на нулевую частоту. Представление сигнала в комплексном виде.

Шаг 3. Накопление отсчетов синфазных и квадратурных составляющих входного навигационного сигнала на заданном интервале анализа и представление их к виду, который требуется для реализации БПФ.

Шаг 4. Вычисление спектральной плотности средней мощности на i -м периоде входного массива с использованием БПФ. В результате получаем спектральную плотность средней мощности периода входного массива в виде n комплексных чисел $S_i = X_i + jY_i$ при $i = 1, \dots, n$.

Шаг 5. Вычисление модуля спектральной плотности $|S_i^N| = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}$.

Шаг 6. Накопление модуля спектральной плотности на заданном числе N периодов входного сигнала $|S_i^N| = \sum_{k=1}^N |S_{ik}|$, где $i = 1, \dots, n$.

Шаг 7. Нормировка накопленного модуля спектральной плотности $|S_i^N|$ к числу периодов накопления N .

Шаг 8. Аппроксимация спектра, в простейшем случае вычисление среднего по спектру. Сред-

нее необходимо для вычисления превышения уровней помех над средним уровнем по спектру. По величине этого превышения можно судить о наличии помех и их относительном уровне.

Шаг 9. Вычисление доминирующих значений в спектре и их сортировка по убыванию. Расчет значений частот, соответствующих найденным доминирующим значениям в спектре (гармоникам помех):

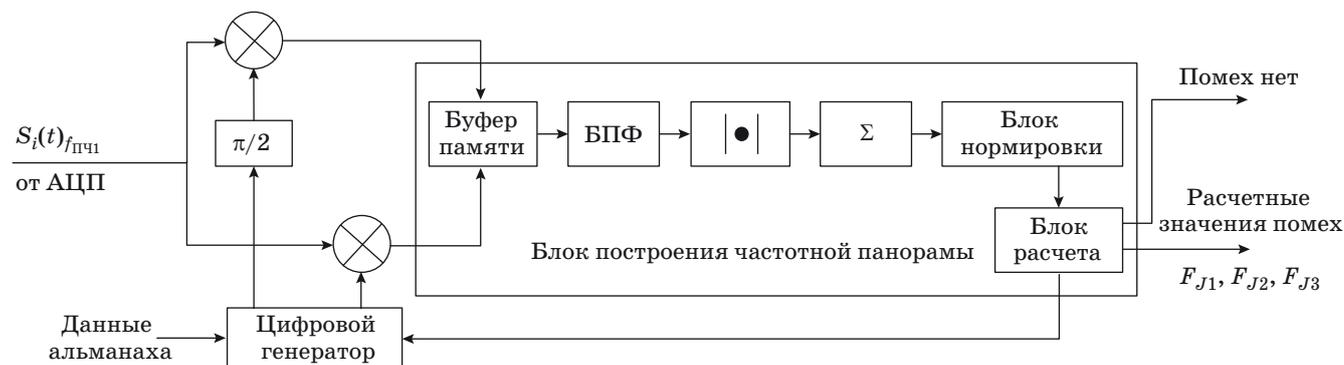
$$l_i = \frac{\Delta F}{n} i,$$

где ΔF — ширина полосы анализируемых частот; n — порядок преобразования Фурье; i — смещение гармоники относительно центральной частоты в спектре.

Функциональная схема блока, реализующего этап детектирования помех в частотной области, представлена на рис. 2. Последовательная работа элементов блока позволяет сформировать исходные данные (номинальное значение частот и относительные мощности отдельных гармоник) для обеспечения работы блока режекции помех на основе КИХ-фильтра с АЧХ, зависящей от параметров протектированных помех.

Моделирование работы алгоритма

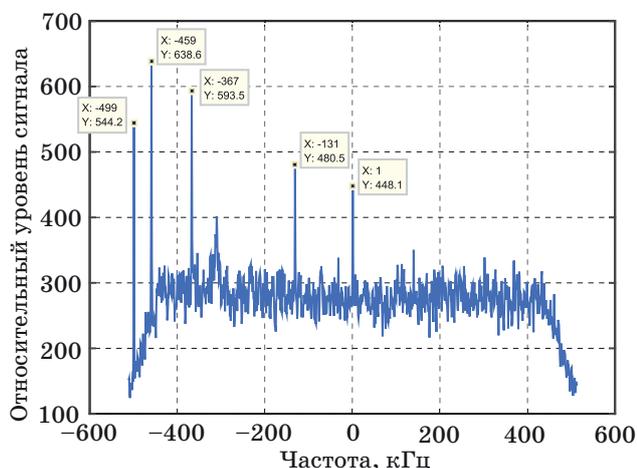
Для верификации полученных результатов было проведено имитационное моделирование работы предлагаемого двухэтапного алгоритма детектирования и режекции многочастотных помех во временной области. Для моделирования использовался программный навигационный приемник [8]. В интересах проведения исследования в нем были реализованы блоки детектирования и режекции помех, а также банк записей реальных навигационных сигналов. Для моделирования работы алгоритма использовался банк записей реальных сигналов, сделанных на промежуточной частоте радиочастотного тракта НАП. Работа блока моделировалась как для стандартных (СТ) навигационных сигналов ГНСС ГЛОНАСС



■ Рис. 2. Функциональная схема блока детектирования помех во временной области на основе частотной панорамы

с частотным разделением в диапазоне L1, так и для перспективных сигналов ГНСС ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L3.

Результаты расчета панорамы помех для эфирного сигнала одного НКА системы ГЛОНАСС представлены на рис. 3, на котором отчетливо наблюдаются отдельные гармоники, которых не должно быть в спектре полезного широкополосного сигнала ГНСС. Причиной появления указанных гармоник в спектре является наличие многочастотной (из пяти отдельных составляющих) помехи на входе приемника. Результаты моделирования первого этапа работы алгоритма подтверждают возможность определения параметров гармоник составляющих помехи, таких как значение частоты и относительный уровень мощности.



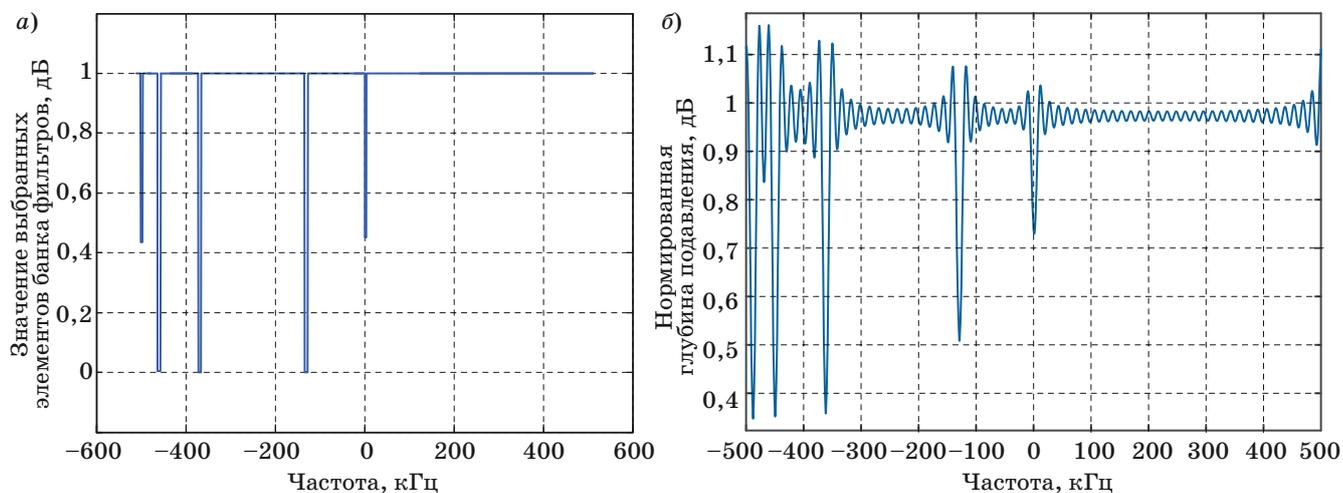
■ **Рис. 3.** Результаты определения параметров многочастотной помехи на этапе детектирования помех в виде частотной панорамы для реального СТ-сигнала одного литеры системы ГЛОНАСС

Результаты моделирования работы второго этапа алгоритма в виде поэтапного формирования требуемой АЧХ (по результатам работы детектора помех) при использовании банка коэффициентов фильтров показаны на рис. 4, а и б, на которых приведены идеальная АЧХ на основе пяти выбранных наборов коэффициентов детектирования помех и реальная АЧХ фильтра. Результаты моделирования второго этапа работы алгоритма показывают, что использование пяти различных наборов коэффициентов фильтров позволяет после перемножения во временной области получить фильтр с требуемой АЧХ для режекции многочастотной помехи.

Результаты использования синтезированного фильтра для случая воздействия полигармонической помехи показаны на рис. 5.

Из сравнения рис. 3 и 5, на которых показана СПМ до и после работы блоков детектирования и режекции, следует, что разработанный алгоритм позволяет проводить режекцию многочастотных (полигармонических) помех с использованием нерекурсивного КИХ-фильтра, синтезированного из наборов априорно рассчитанных коэффициентов по целеуказаниям, выдаваемым детектором помех.

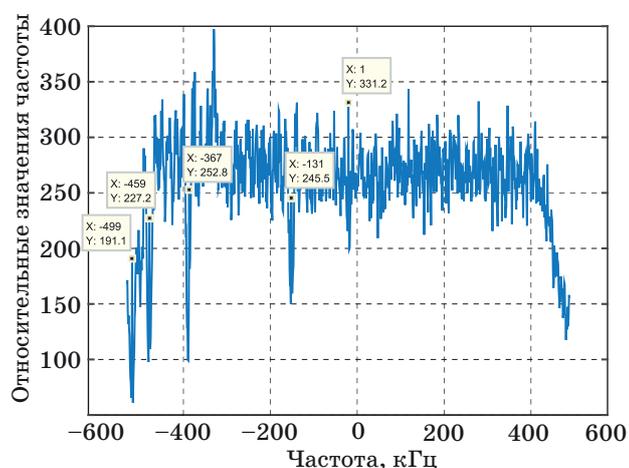
Вопросы влияния режекции помех на помехоустойчивость приема сложных сигналов рассматривались в работах [9–12]. В работе [10] предложен подход к оценке искажений корреляционной функции сложного сигнала с использованием весовых векторов, совпадающих с номерами элементарных фильтров. Применяя подход, аналогичный указанному, оценим степень влияния режекции многочастотных (полигармонических) помех на искажения формы корреляционной функции сигналов системы ГЛОНАСС. Для оценки степени искажений воспользуемся исходными параметрами сигналов ГНСС ГЛОНАСС



■ **Рис. 4.** Поэтапное формирование требуемой АЧХ фильтра: а — идеальная АЧХ на основе выбранных наборов коэффициентов детектирования помех; б — реальная АЧХ фильтра

с частотным разделением [3], являющихся на данный момент основными в структуре радиointерфейса. Результаты моделирования с использованием программного приемника при режекции различных участков спектра навигационных сигналов показаны на рис. 6, а и б, где по оси абсцисс отложена относительная задержка, по оси ординат — относительное значение пика автокорреляционной функции (АКФ).

Искажения АКФ при режекции в области высокой корреляции более существенны, чем при режекции по краям спектра. При увеличении ширины суммарной области режекции наблюдается существенное снижение высоты основного

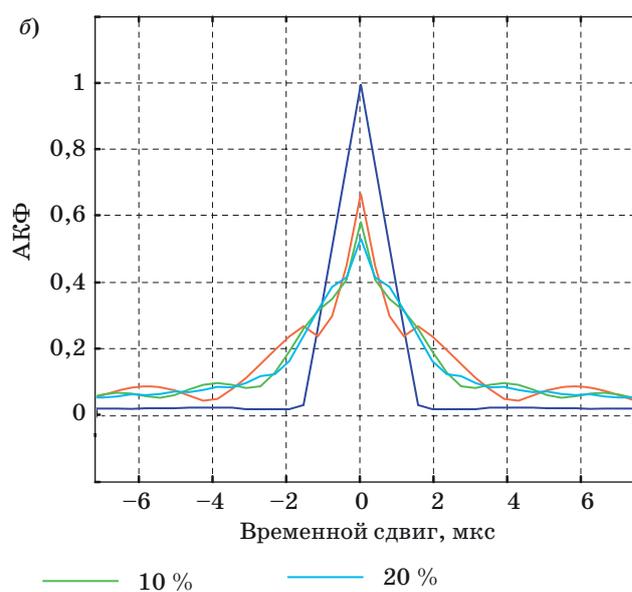
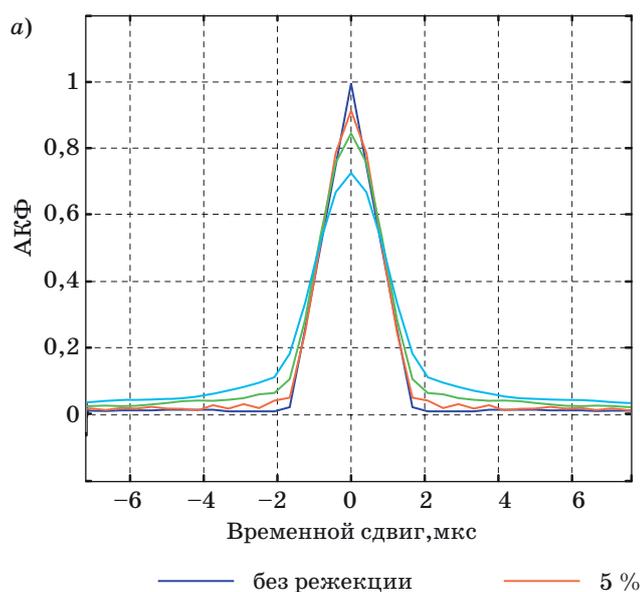


■ Рис. 5. Оценка СПМ для реального СТ-сигнала одного литеры ГЛОНАСС после работы двухэтапного алгоритма детектирования и режекции помех

пика и его расширение. Очевидно, что снижение основного пика АКФ при режекции части спектра не позволяет обнаружить навигационный сигнал с заданными характеристиками ложной тревоги и правильного обнаружения. Полученные результаты согласуются с известными результатами работ [10–12]. Из представленных графиков видно, что АКФ новых сигналов ГНСС ГЛОНАСС с кодовым разделением при малой ширине режекции (до 10 %) более устойчива как в уменьшении основного пика, так и в увеличении боковых лепестков. Это позволяет говорить о потенциально лучшей помехоустойчивости к непреднамеренным помехам. В результате моделирования работы алгоритма детектирования и режекции многочастотных помех были определены ограничения на общую ширину режекции полигармонических помех. Она составила от 10 до 20 % от общей ширины спектра навигационного сигнала в зависимости от типа сигнально-кодовой конструкции.

Заключение

Использование блоков автономного детектирования и режекции помех позволяет реализовать помехоустойчивую НАП, которая необходима для решения широкого круга задач спутниковой навигации. В работе показано, что при использовании таких блоков в НАП возможно подавление нескольких десятков составляющих многочастотных помех (до 20–30) на глубину около 30 дБ с учетом ограничений по общей ширине режекции спектра навигационного сигнала. Однако при превышении этих ограничений происходит



■ Рис. 6. Искажения модуля АКФ сигналов системы ГЛОНАСС при режекции части спектра: а — в области высокой корреляции; б — по краям спектра

изменение временных параметров АКФ. Высота ее основного пика уменьшается, а его ширина увеличивается. Уменьшение высоты основного пика снижает потенциально достижимую помехоустойчивость используемой сигнально-кодовой конструкции, при этом новые сигналы с кодовым

разделением ГНСС ГЛОНАСС менее подвержены искажениям такого типа. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и формировании требований к перспективным образцам помехоустойчивой НАП различного назначения.

Литература

1. Текущее состояние и тенденции развития навигационных услуг и прикладных навигационных технологий на автомобильном транспорте: информационный бюллетень. — М.: ИАЦ КВНО, 2013. — 68 с.
2. Текущее состояние и тенденции развития навигационных услуг и прикладных навигационных технологий за рубежом. Реализация мероприятий по обеспечению совместимости и взаимодополняемости ГНСС: информационный бюллетень. — М.: ИАЦ КВНО, 2013. — 90 с.
3. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 с открытым доступом и частотным разделением (редакция 5.10). — М.: Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, 2008. — 74 с.
4. Куприянов А. И., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. — М.: Вузовская книга, 2011. — 800 с.
5. Butsch F. GPS and GLONASS Radio Interference in Germany // Proc. of the 10th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1997). Kansas City, MO, 1997. P. 1427–1437.
6. Humphreys T. E., Ledvina B. M., Psiaki M. L., O'Hanlon B. W., Kintner Jr P. M. Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofer // Proc. of the ION GNSS Intern. Technical Meeting of the Satellite Division. Savannah, GA, 2008. Vol. 55. P. 2314–2325.
7. Филиппов А. А., Бажин Д. А., Хлобыстов А. А. Повышение эффективности управления беспилотного летательного аппарата в условиях помех // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6. С. 45–50.
8. Авдеев В. А., Кошкарров А. С., Коннов Е. В. Обнаружение помех в частотных диапазонах космических навигационных систем // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 10. С. 2–21.
9. Немыкин А. А. Построение приемного тракта в условиях совместного действия импульсных и узкополосных помех // Цифровая обработка сигналов. 2011. № 1. С. 13–15.
10. Мальцев Г. Н., Харченко А. В., Гарагуля А. С. Границы повышения помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации при цифровой обработке сигналов с компенсацией помех // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4. С. 111–116.
11. Борисов В. И., Зинчук В. М. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией псевдослучайной последовательностью / под ред. В. И. Борисова. — М.: Радио и связь, 2003. — 640 с.
12. Тузов Г. И., Поставный В. Н., Мудров О. И. Исследование влияния режекции спектров сложных частотно-манипулированных сигналов на их корреляционные свойства // Радиотехника. 1988. № 10. С. 30–33.

UDC 621.396

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.88

Two-Step Algorithm for Detection and Rejection of Multi-Frequency Interference in Navigation Receivers

Koshkarov A. S.^a, PhD, Tech., Associate Professor, koshkarof@rambler.ru

Dobrikov V. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, dwa33@mail.ru

^aA. F. Mozhaysky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The research in increasing the noise immunity of navigation receivers in vehicles and telematics systems does not fully use the modern possibilities of digital signal processing. This is particularly evident when navigation receivers operate in a noisy environment. Therefore, there is a need for the development and implementation of new algorithms for processing the navigation signals using digital signal processing capabilities at various stages of signal conversion in the user's navigational equipment, including the pre-correlation stage. **Results:** A two-step algorithm is proposed for the detection and rejection of multi-frequency interference in GLONASS navigational equipment through the use of pre-correlation digital signal processing. The first stage includes the noise condition control, the construction of a frequency panorama for the interference, and autonomous determination of the parameters of multi-frequency interference harmonics. At the second stage, the detected components of the multi-frequency interference in the time domain are rejected through the use of a bank of digital filter coefficients. **Practical relevance:** The obtained results and the

limitations formulated for the level and width of the rejected interference spectrum can be used for developing and substantiating the requirements for advanced models of noise-resistant navigation receivers. The results of analyzing the distortions of autocorrelation functions of GLONASS navigation system with FDMA or CDMA and rejected multi-frequency interference determine the total band of the interference rejection when using the proposed algorithm.

Keywords — GNSS Receiver, Noise Immunity, Multi-Frequency Interference, Radio Rejection.

References

1. *Tekushchee sostoianie i tendentsii razvitiia navigatsionnykh uslug i prikladnykh navigatsionnykh tekhnologii na avtomobil'nom transporte* [Current Status and Development Trends of Navigation Services and Applications of Navigation Technologies in Road Transport]. Moscow, Informatisionno-analiticheskii tsentr koordinatno-vremennogo i navigatsionnogo obespecheniia Publ., 2013. 68 p. (In Russian).
2. *Tekushchee sostoianie i tendentsii razvitiia navigatsionnykh uslug i prikladnykh navigatsionnykh tekhnologii za rubezhom. Realizatsiia meropriiatiu po obespecheniiu sovremestnosti i vzaimodopolniaemosti GNSS* [Current Status and Current Status and Trends in the Development of Navigation Services and Applications of Navigation Technology Abroad. Implementing Measures to Ensure the Compatibility and Interoperability of GNSS]. Moscow, Informatisionno-analiticheskii tsentr koordinatno-vremennogo i navigatsionnogo obespecheniia Publ., 2013. 90 p. (In Russian).
3. *Global'naiia navigatsionnaia sputnikovaia sistema GLONASS. Interfeisnyi kontrol'nyi dokument. Navigatsionnyi radiosignal v diapazonakh L1, L2 s otkrytym dostupom i chastotnym razdeleniem (redaktsiia 5.10)* [Global Navigation Satellite System. Interface Control Document. Navigation Radiosignal in Bands L1, L2 (Edition 5.1)]. Moscow, Rossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut kosmicheskogo priborostroeniia Publ., 2008. 74 p. (In Russian).
4. Kupriyanov A. I., Shustov L. N. *Radioelektronnaia bor'ba. Osnovy teorii* [Electronic Warfare. Basic Theory]. Moscow, Vuzovskaia kniga Publ., 2011. 800 p. (In Russian).
5. Butsch F. GPS and GLONASS Radio Interference in Germany. *Proc. of the 10th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1997)*, Kansas City, MO, 1997, pp. 1427–1437.
6. Humphreys T. E., Ledvina B. M., Psiaki M. L., O'Hanlon B. W., Kintner Jr P. M. Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofer. *Proc. of the ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division*. Savannah, GA, 2008, vol. 55, pp. 2314–2325.
7. Filippov A. A., Bazhin D. A., Khlobystov A. N. Improving Drone Aircraft Control Efficiency under Interference. *Informatisionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 6, pp. 45–50 (In Russian).
8. Avdeev V. A., Koshkarov A. S., Konnov E. V. Detecting of GNSS Bandwidth Interferences. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2015, no. 10, pp. 2–21 (In Russian).
9. Nemykin A. A. Construction of the Receive Path in a Joint Action of Impulsive and Narrow-Band Interference. *Tsifrovaia obrabotka signalov*, 2011, no. 1, pp. 13–15 (In Russian).
10. Maltsev G. N., Harchenko A. V., Garagulya A. S. Limits of Radio Data Transmission Noise Immunity Improvement in Digital Signal Processing with Noise Compensation. *Informatisionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 4, pp. 111–116 (In Russian).
11. Borisov V. I., Zinchuk V. M., et al. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov modulyatsiyey nesushchey pseudosluchaynoy posledovatel'nost'yu* [Radiocommunication System Immunity of Spread Spectrum Modulated Carrier Signals Pseudorandom Sequence]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 2003. 640 p. (In Russian).
12. Tuzov G. I., Postavnyj V. N., Mudrov O. I. Investigation of the Effect of Complex Spectra Rejection FSK Signals on their Correlation Properties. *Radiotekhnika*, 1988, no. 10, pp. 30–33 (In Russian).

УДК 004; 621.398; 681.5; 681.324:681.3.001.57

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.96

ОРГАНИЗАЦИЯ УДАЛЕННОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ СО СВОИМИ ВИРТУАЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

А. В. Гордеев^а, доктор техн. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Введение: для изучения целого ряда дисциплин по информатике и вычислительной технике, в которых студенты должны иметь права администратора на свой компьютер, целесообразно использовать технологии виртуализации. **Цель:** создание системы обеспечения студентов удаленным доступом к своему множеству виртуальных машин и вычислительных сетей. **Результаты:** на основе десктопной программы Oracle VirtualBox, которая используется в качестве серверной и работает на кластере, собранном для этих целей, создана система удаленного доступа, которая обладает такими качествами, как простота, доступность, устойчивость к нагрузкам, масштабируемость, гибкость, надежность и безопасность. Она может быть сопряжена с системой дистанционного обучения Moodle, на базе которой на кафедре вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения разрабатываются учебные курсы по дисциплинам, в которых предполагается работа с программой Oracle VM VirtualBox. **Практическая значимость:** система позволяет организовать работу с виртуальными машинами с любого устройства, имеющего веб-браузер и обеспечивающего пользователя графическим интерфейсом.

Ключевые слова — виртуальные машины, удаленный доступ, VirtualBox, кластер.

Введение

Для обучения студентов по направлению «Информатика и вычислительная техника» возникла задача организовать на базе открытых технологий и облачных сервисов удаленную работу студентов со своими виртуальными машинами. При этом необходимо было обеспечить студентам права администратора на свои виртуальные компьютеры и сети, но изолировать вычислительные сети и машины одного студента от аналогичных объектов другого студента. Решение должно быть масштабируемым и открытым.

В статье [1] было достаточно подробно рассмотрено, для чего и как следует применять технологии виртуализации в учебном процессе. И была описана концепция создания системы, которая в настоящее время уже разработана и используется при изучении студентами открытых операционных систем GNU/Linux и администрирования вычислительных сетей на базе этих систем. Однако там была описана система с технологией виртуализации на уровне операционных систем, что не всегда приемлемо. Жизнь вносит свои коррективы, и, помимо вышеупомянутых, студенты изучают и другие операционные системы. Среди возможных средств работы с виртуальными машинами упоминалась такая популярная программа, как Oracle VM VirtualBox. Она прежде всего используется на рабочих станциях, тогда как основными серверными средствами, используемыми при построении облачных средств виртуализации, являются VMware vSphere, Citrix Xen и некоторые другие [2]. Если необходимо работать с относительно не-

большим количеством виртуальных машин, то часто используют такой популярный продукт, как Microsoft Hyper-V. Однако для учебного заведения, особенно для технического вуза, в котором готовят специалистов по информатике и вычислительной технике, желательно использовать иные продукты, в первую очередь открытые. Далеко не все придерживаются таких взглядов, и имеется немало публикаций, в которых речь идет о применении технологий виртуализации и виртуальных машин при подготовке IT-специалистов, но акцент на открытые продукты и технологии не ставится [3, 4]. Главное обстоятельство, на которое хочется обратить внимание, — это то, что названные здесь и в упомянутых публикациях средства хоть и обладают великолепными возможностями, но представляют собой своеобразный «черный ящик». Поскольку это проприетарные продукты, то внутреннее устройство этих средств виртуализации, предназначенных для создания больших облачных систем, закрыто. Есть только инструкции по их использованию. К тому же большинство из них достаточно дорогие, и хотя они обладают богатыми возможностями, но их использование рассчитано на соответствующие мощные и высоконадежные аппаратные ресурсы. Вложенные средства предполагают свою окупаемость, т. е. их использование должно приносить какой-то доход. О доходе в учебном процессе говорить не приходится, можно говорить в основном о затратах и эффекте использования в учебных целях. Очевидно, что желательно затраты уменьшать, а качество обучения при этом все равно должно увеличиваться.

Программа Oracle VirtualBox

У программы VirtualBox, которую в настоящее время курирует и помогает развивать компания Oracle [5, 6], есть много достоинств. Главные — это удобный интуитивно понятный интерфейс, рассчитанный на неподготовленного пользователя; большой набор виртуализируемых устройств, очень полезный в учебном процессе; простой и удобный экспорт и импорт образов виртуальных машин; простой и удобный механизм создания «снимков» (snapshot) состояния виртуальной машины, что существенно помогает при проведении экспериментов; кроссплатформенность. Oracle VM VirtualBox работает на большом количестве 32- и 64-битных операционных систем. Эту программу студенты часто устанавливают на свои персональные компьютеры и ноутбуки. В случае, когда студенты сталкиваются с какими-нибудь проблемами, которые они сами не могут разрешить, они имеют возможность импортировать свои машины на переносные устройства внешней памяти (обычно в этой роли выступают либо USB-диски, либо USB флеш-накопители) и принести их в университет, где уже могут их решить вместе с преподавателем. Наиболее актуально это при выполнении студентами курсовых работ, в рамках которых они должны создать свою вычислительную сеть корпоративного уровня из виртуальных машин и должным образом ее настроить.

Далеко не все знают, что программа Oracle VM VirtualBox имеет большие возможности при использовании интерфейса командной строки, что позволяет ее использовать в серверном варианте. Для связи с такими машинами разрабатывается коннектор NuregBox, однако в настоящее время это всего лишь бета-версия, и использовать ее пока невозможно. Кроме этого имеется PHP-вариант phpVirtualBox, который позволяет подключаться к удаленным виртуальным машинам через веб-интерфейс. Однако phpVirtualBox годится лишь для случая удаленного доступа к своим виртуальным машинам только одного пользователя, поскольку разграничения в доступе к файлам и процессам виртуальных машин в этом варианте нет; очевидно, что для использования в учебном заведении этот способ доступа к удаленным виртуальным машинам не годится, так как параллельно работающих студентов может быть много.

Важным обстоятельством, послужившим выбором программы Oracle VM VirtualBox в качестве основы для построения системы, стал профессиональный интерес: попытаться организовать ее работу не на обычном сервере, а на кластере. Дело в том, что эта программа не предполагает такого использования, а кластерные вычисления имеют много преимуществ. Поэтому была создана и опро-

бована относительно несложная реализация, которая позволяет получить очень важные качества: простоту, доступность, устойчивость к нагрузкам, масштабируемость, гибкость, надежность и безопасность. Настоящая статья кратко описывает это решение.

Интерфейс к виртуальным машинам

Для доступа к своим удаленным виртуальным машинам пользователя нужно обеспечить соответствующим интерфейсом. Этот интерфейс должен быть простым для понимания, привычным с точки зрения обычного десктопного использования программы Oracle VirtualBox, обеспечивать ему возможность увидеть результат вносимых изменений в реальном времени, показывать состояние виртуальных машин, создавать, удалять машины, осуществлять настройки виртуальной сетевой инфраструктуры, предоставлять доступ только к своим виртуальным машинам.

На сайте Oracle имеется уже упомянутое выше решение, называемое phpVirtualBox. Эта программа обладает практически всеми основными возможностями, такими как создание виртуальных машин, работа с так называемыми снапшотами (от англ. snapshot — снимок), удаление виртуальных машин, создание виртуальных сетей и их конфигурирование. Однако phpVirtualBox имеет некоторые ограничения:

- 1) не позволяет назначать права на виртуальные машины (предоставление доступа разработчиками по списку только к своим машинам);
- 2) не позволяет управлять несколькими физическими серверами из одной панели управления;
- 3) не отображает статистику по нагрузке сервера;
- 4) создается сторонними разработчиками, не имеющими отношения к Oracle VirtualBox, из-за чего вызывает опасения по прекращению ее развития.

Поэтому была поставлена задача сделать собственное решение. Для реализации интерфейса был выбран язык PHP, который является популярным универсальным языком сценариев и ориентирован на использование в веб-разработке. Связь с системным окружением (backend) реализована с помощью скриптов на bash — скриптовом языке командного процессора системы, выступающей в роли сервера. Помимо термина backend существует еще термин (и понятие) frontend — т. е. та часть клиентского приложения, через которую пользователь взаимодействует с серверной частью программы.

Для системы GNU/Linux, на которой должны запускаться виртуальные машины, наиболее распространенным решением передать окно программы, запущенной на другом компьютере, является

возможность подключения к удаленному рабочему столу посредством системы управления удаленными подключениями VNC. Другое решение является модификацией протокола RDP — протокол VRDP (VirtualBox Remote Display Protocol). Это собственная разработка компании Oracle и ею поддерживаемая, что очень важно. Чтобы запустить машину посредством данного протокола, необходимо дополнительно установить соответствующее расширение. В поставляемом с VirtualBox пакете существует предустановленный генератор интерфейса — VirtualBox Remote Desktop Extension (VRDE), и им можно воспользоваться.

Не все знают, но сама программа VirtualBox имеет достаточно мощный интерфейс командной строки. И с помощью специальной утилиты `vboxmanage` в консоли можно задать параметры для VRDE, главным образом определяя, на каком IP и по какому порту будет работать данный интерфейс. Соответственно, на одном порте может быть запущен только один интерфейс, поэтому при создании виртуальных машин данный параметр можно изменять, просто инкрементируя номер порта, избегая таким образом возможности попыток запустить виртуальные машины на одном и том же порту, что могло бы привести к коллизиям.

Кроме работы интерфейса необходимо реализовать сетевую структуру. Для распределения запросов и достижения максимальной скорости загрузки страниц используется связка веб-серверов Nginx и Apache. Рассмотрим их подробнее. Nginx — это HTTP-сервер и обратный прокси-сервер, почтовый прокси-сервер, а также TCP/UDP прокси-сервер общего назначения. Обслуживает множество высоконагруженных сайтов. Основным преимуществом данного веб-сервера является работа со статическим контентом, использование различных решений кэширования, отказоустойчивость, сжатие и поддержка SSL. Он отлично подходит для кластерного использования и задействован нами в связке для отдачи статического контента; для отдачи динамического контента использован веб-сервер Apache, основными преимуществами которого являются надежность и гибкость конфигурации, причем он тоже имеет открытый исходный код. Практически все параметры могут быть изменены через конфигурационные файлы. Для работы со статическим контентом данный веб-сервер не подходит потому, что ему необходимо создавать отдельный процесс для загрузки статики, что существенно влияет на скорость загрузки страниц.

Реализация кластерной технологии для VirtualBox

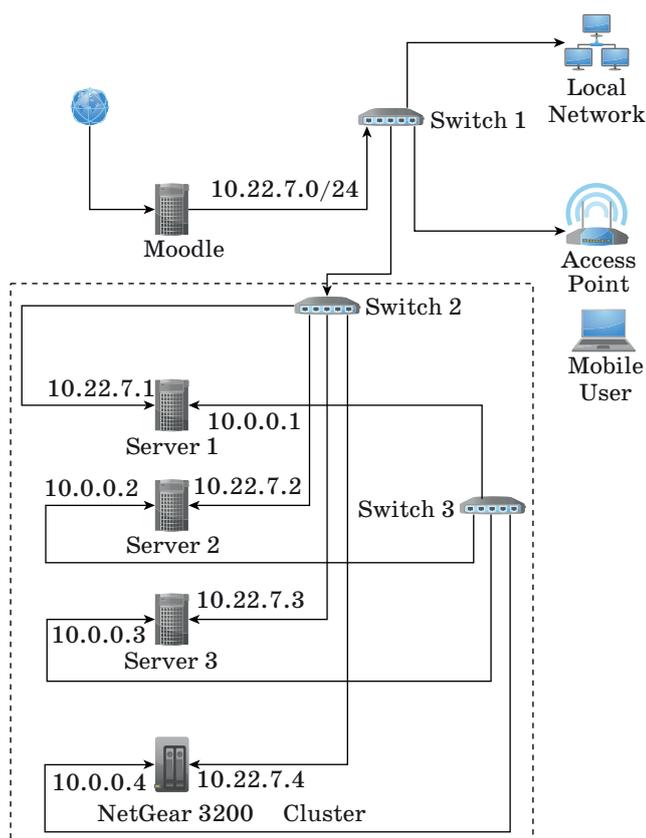
Работа программы VirtualBox в кластерной системе компанией Oracle не реализована и готовых решений от других компаний и разработчи-

ков нет, поэтому существует возможность организовать данную систему самостоятельно. Главным аргументом за использование кластерных технологий при построении рассматриваемой системы для удаленной работы с виртуальными машинами и сетями из таких виртуальных машин является не столько надежность, сколько производительность, желание предоставить пользователям приемлемое время реакции на действия со своими виртуальными машинами. Если собрать в кластер несколько серверов с Oracle VirtualBox, то для пользователей, которые создают и запускают по одной виртуальной машине, желательнее равномерно загружать узлы такого кластера. И здесь разумным может быть простейшее решение: использовать алгоритм Round Robin для выбора узла кластера при появлении очередного запроса со стороны множества пользователей на создание виртуальной машины. В дальнейшем пользователь должен будет подключаться либо к тому узлу, где работает его виртуальная машина, либо, возможно, даже к другому узлу, если его машина сейчас остановлена. Для этого виртуальные машины после остановки должны храниться на общем сетевом устройстве (Storage Area Network). Кстати, размещение снимков виртуальных машин не на локальных устройствах внешней памяти узла, а на сетевых устройствах позволяет существенно повысить отказоустойчивость системы.

Если же пользователь создает несколько виртуальных машин и связывает их посредством виртуальных сетей, то более разумным будет разместить вторую и последующие машины на том же узле кластера, где была запущена первая машина этого пользователя. Это объясняется упрощением организации обмена данными по виртуальным сетям и существенно большими скоростями таких обменов (они будут осуществляться внутри одного компьютера, т. е. через оперативную память). Алгоритм Round Robin в этом варианте не подходит, так как в итоге приводит к неравномерной загрузке узлов кластера. Целесообразно для назначения узла оценивать его свободные ресурсы, причем закрепление выделенного узла за пользователем должно быть только до тех пор, пока на этом узле работает хотя бы одна из его виртуальных машин. Если пользователь завершил работу со своими машинами и все они перешли в выключенное состояние, то в случае размещения файлов этих машин на общем сетевом ресурсе следующий сеанс работы с машинами может быть организован и на другом узле.

Схема построенного кластера приведена на рисунке.

На этой схеме узлы кластера имеют IP-адреса из внутренних сетей 10.22.7.0/24 и 10.0.0.0/24. По первой сети кластер связан с сервером, на ко-



■ Схема созданной кластерной системы для удаленной работы с виртуальными машинами

тором установлена система дистанционного обучения Moodle и который, помимо всего прочего, выступает в роли прокси-сервера. На этом сервере расположено несколько учебных курсов, в рамках которых студенты могут выполнять лабораторные работы с виртуальными машинами. Этот сервер имеет выход в Интернет через вторую сетевую карту. И именно с него уходят запросы студентов на создание и запуск виртуальных машин, которые работают уже на узлах кластера. Доступ к кластеру возможен и из локальной сети (с компьютеров дисплейного класса). Узлы кластера с именами Server 1, Server 2, Server 3, сетевое хранилище NetGear Ready NAS 3200, источники бесперебойного питания и коммутаторы Switch 2 и Switch 3 расположены в серверном шкафу. Коммутатор Switch 3 работает в кластерной сети 10.0.0.0/24. Коммутаторы Switch 2 и Switch 3 работают на скорости 1 Гбит/с, а коммутатор Switch 1 имеет только два порта, которые работают на такой скорости; к этим портам подключен сервер с системой Moodle и коммутатор Switch 2. Клиентские компьютеры дисплейного класса подключены к сети 10.22.7.0/24 на скорости 100 Мбит/с. На всех компьютерах дисплейного класса установлена операционная система GNU/Linux, и на этих системах имеется програм-

ма Oracle VirtualBox и браузер Mozilla Firefox, с помощью которого можно выйти на веб-сервер с учебными курсами, которые функционируют в Moodle.

Адрес 10.22.7.4/24 присвоен сетевому хранилищу NetGear 3200, на котором создан RAID-6X массив из семи жестких дисков и установлен протокол iSCSI. Это хранилище имеет связи с узлами кластера по вспомогательной сети 10.0.0.0/24. Одновременно оно подключено к сети 10.22.7.0/24, но уже как NAS; на нем хранятся доступные по сети файлы, прежде всего — общие.

Заключение

Описанная система уже апробирована на занятиях по дисциплинам «Корпоративные сети со службой каталога» и «Администрирование информационных систем». Она доказала свою работоспособность, и в настоящее время на ней проводятся дальнейшие исследования в целях разработки более эффективного алгоритма распределения нагрузки на узлы кластера. Анализ загрузки и скорости работы с машинами показывает, что имеет смысл все виртуальные машины студента (пользователя) размещать на одном и том же узле, а перемещать их на другой узел кластера разумно только при условии, что один из узлов кластера совсем не загружен, в то время как на других работает большое количество виртуальных машин.

Литература

1. Балберин В. В., Гордеев А. В. Концепция организации технологий виртуализации для использования в учебном процессе // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1. С. 80–84.
2. Виртуализация // Википедия. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D1%80%D1%82%D1%83%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F#.D0.92.D0.B8.D0.B4.D1.8B_.D0.B2.D0.B8.D1.80.D1.82.D1.83.D0.B0.D0.BB.D0.B8.D0.B7.D0.B0.D1.86.D0.B8.D0.B8 (дата обращения: 05.07.2016).
3. Зацаринная Ю. Н., Староверова Н. А. Виртуализация и виртуальные машины в подготовке современных IT-специалистов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 9. С. 247–250.
4. Козлов А. Виртуализация компьютера. <http://antonkozlov.ru/kompyuternye-programmy/virtualnaya-mashina-i-virtualizaciya.html> (дата обращения: 03.02.2017).
5. Oracle VM VirtualBox. <http://www.oracle.com/technetwork/ru/servers-storage/virtualbox/overview/index.html> (дата обращения: 01.02.2017).
6. Oracle VirtualBox. <https://www.virtualbox.org/wiki/Documentation> (дата обращения: 03.02.2017).

UDC 004; 621.398; 681.5; 681.324; 681.3.001.57

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.96

Organization of Remote Work of Students with their Virtual Machines

Gordeyev A. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, avg@aanet.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: When studying a range of computer science disciplines, students often must have administrative privileges on their computers, and it is often advisable to use virtualization technology. **Purpose:** Students should be provided by remote access to multiple virtual machines and networks. **Results:** On the base of desktop Oracle VirtualBox software used as a server and operated on a cluster specially created for this purpose, a remote access system has been created which is characterized by simplicity, availability, resistance to stress, scalability, flexibility, reliability and security. It can be interfaced with Moodle distance learning system which is the base for developing curriculums assuming the usage of Oracle VM VirtualBox. Such curriculums are being developed in the department of computer systems and networks of the State University of Aerospace Instrumentation. **Practical relevance:** The system allows you to work with virtual machines from any device which has a web browser and provides the user with a graphical interface.

Keywords — Virtual Machines, Remote Access, VirtualBox, Cluster.

References

1. Balberin V. V., Gordeev A. V. Organization Concepts of Virtualization Technologies for the Academic Process. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 1, pp. 80–84 (In Russian).
2. *Virtualization*. Available at: <http://en.wikipedia.org/wiki/Virtualization> (accessed 5 July 2016).
3. Zatsarinaia Y. N., Staroverova N. A. Virtualization and Virtual Machines in the Training of Today's IT Professionals. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 9, pp. 247–250 (In Russian).
4. Kozlov A. *Virtualizatsiia komp'iutera* [Computer Virtualization]. Available at: <http://antonkozlov.ru/kompyuternye-programmy/virtualnaya-mashina-i-virtualizatsiya.html> (accessed 3 February 2017).
5. *Oracle VM VirtualBox*. Available at: <http://www.oracle.com/technetwork/ru/servers-storage/virtualbox/overview/index.html> (accessed 1 February 2017).
6. *Oracle VirtualBox*. Available at: <https://www.virtualbox.org/wiki/Documentation> (accessed 3 February 2017).

УДК 681.772.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.101

МАЛОГАБАРИТНАЯ ВАНДАЛОЗАЩИЩЕННАЯ ВИДЕОКАМЕРА НА ОСНОВЕ МНОГОМАТРИЧНОЙ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОХРАНЫ ПОМЕЩЕНИЙ

Ю. В. Кривошекова^а, магистрантП. А. Белойван^а, аспирантИ. Г. Бронштейн^а, директор научно-технического центра «Оптико-информационные технологии и системы»А. М. Бурбаев^а, доцент^аСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, РФ

Введение: предъявляемые к современным средствам видеонаблюдения особые требования: увеличенное поле обзора в совокупности с высоким разрешением и одновременно малые габариты и низкое энергопотребление (в целях затруднения их обнаружения), — реализуются далеко не во всех видеосистемах. **Цель:** разработка малогабаритной вандалозащищенной видеокамеры с пониженным выделением тепла для наблюдения за протяженными объектами. **Результаты:** предложено конструктивное решение видеокамеры, суть которого состоит в замене ПЗС-матрицы большого формата тремя малогабаритными матрицами с компактным расположением их внутри объема камеры, имеющей малые габариты, таким образом, чтобы на матрицах отображалась только полезная информация. Важная роль в этом решении отводится оптической системе. Рассчитаны параметры оптической системы и приводится оптическая схема объектива pinhole. Пучок световых лучей за объективом, создающим цельное изображение охраняемого объекта, посредством плоских зеркал разводится по трем ПЗС-матрицам. С помощью программного обеспечения фрагменты изображения объекта, сформированные отдельными матрицами, «сшиваются» в единое, адекватное наблюдаемому объекту, изображение, которое в таком виде транслируется на мониторе. **Практическая значимость:** схемные и конструктивные решения с использованием одного объектива pinhole и приемника из трех ПЗС-матриц малого формата, составленных вдоль интересующего направления, позволяют получить малогабаритную, труднообнаруживаемую видеокамеру для наблюдения за протяженным охраняемым объектом.

Ключевые слова — малогабаритная система видеонаблюдения, вандалозащищенная видеокамера, наблюдение протяженного объекта, объектив pinhole, ПЗС-матрица.

Введение

Телевизионные средства наблюдения получили широкое распространение в системах безопасности. Отдельную нишу рынка видеокамер занимают малогабаритные системы, оснащенные объективами pinhole. Одной из актуальных задач, стоящих перед разработчиками камер видеонаблюдения, является увеличение поля обзора в целях наблюдения протяженных объектов. В работе [1] собраны и квалифицированы основные принципы формирования панорамной картины, один из которых, предусматривающий использование систем с составным угловым полем с последующим «сшиванием» нескольких кадров (многоканальные системы), мог бы быть рекомендован для решения поставленной задачи, если бы не неприемлемые для данной ситуации габариты. Кроме того, часто требуется иметь изображение высокого разрешения, т. е. высокой степени детализации объекта наблюдения. Для получения изображения в высоком разрешении необходимо использовать матрицу с большим количеством пикселей, что приводит к увеличению не только габаритных размеров устройства, но и энергопотребления и, следовательно, к большому выделению тепла, что увеличивает вероятность обнаружения видеокамеры с помощью тепловизора.

По этой причине в малогабаритных камерах применяют матрицы оптического формата меньше, чем 1/2 дюйма.

Формулирование и решение основных задач проектирования

Как известно, при одном и том же формате матрицы фокусное расстояние объектива определяет угол зрения видеокамеры. Объективы с малым фокусным расстоянием обеспечивают просмотр пространства большой площади, однако получаемые изображения имеют мелкий масштаб. Более того, широкоугольные объективы вносят существенные искажения в изображение. Длиннофокусные объективы создают более четкое изображение (крупный масштаб), но обладают малой глубиной резкости изображаемого пространства, которая обратно пропорциональна квадрату фокусного расстояния и относительно отверстию объектива [2]. Для решения конкретной задачи — наблюдение 7,5-метрового объекта на расстоянии 11 м — полный угол поля зрения составляет

$$2\omega = 2\arctg \frac{7,5}{2 \cdot 11} \approx 37^\circ.$$

В случае расчета обычных камер видеонаблюдения два параметра — угол обзора и фокусное расстояние — оказываются взаимосвязанными. В рассматриваемом случае одним из основных критериев правильности определения фокусного расстояния объектива является степень детализации изображения, зависящая от задач, стоящих перед системой. При этом для расчета применяют простую формулу [3, 4]

$$f' = Rk,$$

где f' — фокусное расстояние, мм; R — дистанция до объекта, м; k — коэффициент для различных задач наблюдения.

Таким образом, для гарантированной идентификации незнакомого человека на расстоянии наблюдения 11 м потребуется объектив с фокусным расстоянием

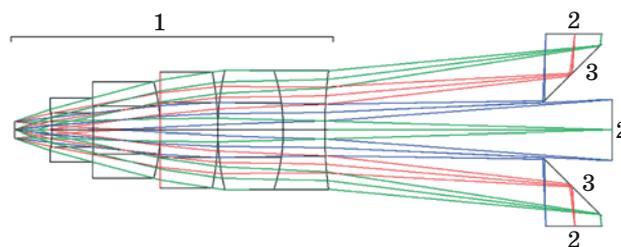
$$f' = 11 \cdot (2 \div 2,5) = 22 \div 27,5 \text{ мм.}$$

Задача проектирования приемника излучения для данной видеосистемы оказалась более сложной. Простой расчет показывает, что при полученных значениях угла обзора, фокусного расстояния объектива и соотношении сторон матрицы 4:3 потребовалась бы ПЗС-матрица с размерами от 16×12 до 20×15 мм, что, конечно же, неприемлемо для малогабаритной видеосистемы наблюдения. Для устранения этой проблемы с учетом разработки видеокамеры для наблюдения протяженных объектов предлагается вместо одной большой матрицы использовать несколько малых, т. е. составной приемник, с расположением составляющих сенсоров в разных плоскостях для уменьшения габаритов приемной системы [5].

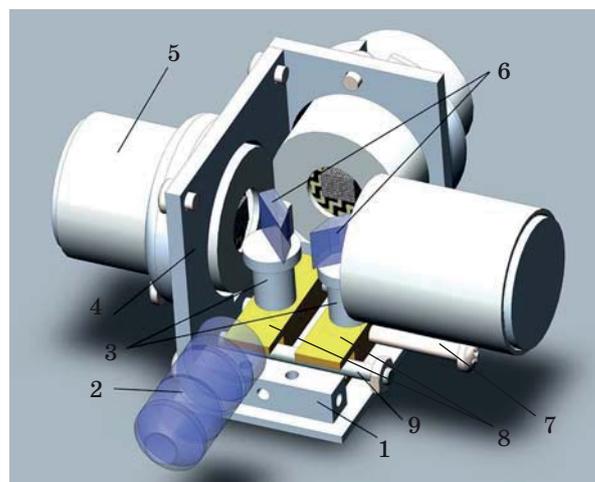
Приведенный выше интервал значений ширины большой матрицы позволяет с учетом ограничений в выборе формата составляющих ПЗС-матриц и предполагаемой их компоновки определить формат матриц как $1/2,5''$. В этом случае совокупный размер приемника по ширине составит $l = 5,7 \times 3 = 17,1$ мм при высоте $h = 4,3$ мм.

Для видеокамеры был выбран объектив pinhole с фокусным расстоянием 27 мм, разработанный в Университете ИТМО. Одним из его преимуществ является большой задний отрезок, позволяющий беспрепятственно расположить зеркала для разделения пучков лучей.

Пучки световых лучей за объективом 1 разводятся вблизи плоскости изображения по трем ПЗС-матрицам 2 следующим образом: осевой пучок направляется на центральную матрицу, расположенную на оси объектива, а крайние пучки с помощью зеркал 3 отклоняются в горизонтальной плоскости таким образом, чтобы главные лучи отраженных пучков были перпендикулярны боковым матрицам (рис. 1).



■ Рис. 1. Ход лучей в оптической системе: 1 — объектив; 2 — ПЗС-матрица; 3 — зеркало



■ Рис. 2. Конструкция видеокамеры: 1 — стальной брусок; 2 — объектив; 3 — цилиндрические стойки; 4 — боковая стенка; 5 — видеокамера; 6 — зеркала; 7 — винт; 8 — каретки; 9 — цилиндрические направляющие

При обработке данных изображения с трех матриц «сшиваются» в единую картину посредством программного обеспечения с учетом инверсии изображений на боковых матрицах.

Конструкция разработанной камеры представлена на рис. 2. Базовым, определяющим компоновку, и несущим элементом конструкции видеосистемы является сборный каркас. В качестве ребер жесткости в нем применены четыре стальных шлифованных единой длины бруска 1 квадратного сечения со строго перпендикулярными торцами. Роль боковых стенок в этом каркасе выполняют фланцы 4 с прямоугольными основаниями и отверстиями для закрепления видеокамер 5 и установки объектива 2. Все три камеры, имеющие корпус цилиндрической формы, базируются в переходных цилиндрических втулках с возможностью их продольного перемещения для отдельной фокусировки. Сами переходные втулки крепятся во фланцах по плотной посадке $\varnothing 19 \text{ H7/js6}$, позволяющей в процессе юстировки устранить взаимный разворот изображений на

трех участках единого кадра. Во фланце, предназначенном для установки объектива, выполнена резьба для общей фокусировки.

В нижней части каркаса смонтированы две цилиндрические направляющие 9, по которым могут перемещаться две каретки 8 с установленными на них зеркалами 6. Зеркала закреплены на каретках с помощью цилиндрических стоек 3, к которым зеркала приклеены торцевыми поверхностями таким образом, чтобы их отражающие плоскости совпадали с осями поворота стоек. Сопряжение стоек с каретками образуют цилиндрические опоры (направляющие вращательного движения), в которых цапфы выполнены за одно целое со стойками. Внутренние края зеркал имеют скосы для исключения «мертвых зон» между соседними участками кадра. В стойках выполнены отверстия под шпильку, с помощью которой в процессе юстировки производят разворот зеркал по углу отклонения пучков лучей. С помощью винтов 7 каретки с зеркалами можно перемещать по направляющим поперек оси светового пучка.

Габаритные размеры конструкции составили 70×60×50 мм. Кроме малых габаритов устройство обладает еще рядом достоинств. Обеспечена

требуемая степень детализации изображения, при этом в кадре будет располагаться только полезная информация. В процессе работы в зависимости от потребностей пользователя и текущей ситуации появляется возможность воспроизведения как единой картины, так и посекторной путем выключения отдельных приемников, что сократит электропотребление и выделение тепла. Установка видеосистемы за защитным экраном с небольшим входным отверстием обеспечит ее вандалозащищенность.

Заключение

В ходе анализа и решения проблем, связанных с разработкой системы видеонаблюдения за протяженным объектом, была предложена конструкция малогабаритной вандалозащищенной видеокамеры на основе единого объектива типа pinhole и многоматричной приемной системы. Оптическая система камеры обеспечивает требуемую степень детализации объекта наблюдения при увеличенном в заданном направлении поле обзора, малые габариты и низкое тепловыделение.

Литература

1. Архипова Л. Н., Багдасаров А. А., Багдасарова О. В., Шевченко Д. Н. Панорамные системы кругового обзора // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 6. С. 20–31. doi:10.1364/JOT.83.000342
2. Бебчук Л. Г., Богачев Ю. В., Заказнов Н. П. Прикладная оптика. — СПб.: Лань, 2009. — 320 с.
3. Разрешение камер видеонаблюдения — аналоговых и IP. http://video-praktik.ru/kamery_razreshenie.html (дата обращения: 20.03.2017).

4. Фокусное расстояние объективов. <http://kb-sb.ru/pub/11/24/> (дата обращения: 20.03.2017).
5. Кривошечкова Ю. В., Бурбаев А. М. Разработка малогабаритной вандалозащищенной видеокамеры // Альманах научных работ молодых ученых XLV научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО. 2016. Т. 3. С. 11–13.

UDC 681.772.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.101

Compact Vandal-Proof Video Camera on the Basis of Multimatrix Receiving System for Security of Premises

Krivoshchekova Y. V.^a, Graduate Student, pugowitsa93@gmail.com

Beloivan P. A.^a, Post-Graduate Student, beloivan92@gmail.com

Bronshtein I. G.^a, Director of the Scientific and Technical Center «Optical Information Technologies and Systems», kb@jupiter.spb.ru

Burbaev A. M.^a, Associate Professor, aburbaev@mail.ru

^aSaint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii St., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: To solve a number of problems, special requirements are made on video surveillance systems: an increased field of view combined with high resolution and, at the same time, small dimensions and low power consumption (in order to impede their detection). **Purpose:** To design a compact vandal-proof video camera with a reduced heat emission for observing extended objects. **Results:** A constructive solution is proposed for a video camera. The idea is to replace a large-format CCD matrix by three small-size matrices compactly arranged inside a small camera in such a way that they display only useful information. An important role in this solution is given to the optical system. Its parameters have been calculated, and an optical layout is given for the pinhole lens. A light beam behind the lens creating a complete image of the guarded object is split into three for the three CCD-matrices using flat mirrors. Special

software merges the fragments of the object image formed by separate matrices so that the resulting single image fits the observed object. In this form, the image is broadcast on the monitor. **Practical relevance:** Schematic and design solutions based on a single pinhole lens and a receiver consisting of three small CCDs composed along the direction of interest can provide a small and difficult-to-detect video camera for observing an extended guarded object.

Keywords — Compact Video Surveillance System, Vandal-Proof Video Camera, Observing an Extended Object, Pinhole Lens, CCD.

References

1. Arkhipova L. N., Bagdasarov A. A., Bagdasarova O. V., Shevchenko D. N. Circular-scan Panoramic Systems. *Opticheskii zhurnal*, 2016, no. 6, pp. 20–31 (In Russian). doi:10.1364/JOT.83.000342
2. Bebchuk L. G., Bogachev Iu. V., Zakaznov N. P. *Prikladnaia optika* [Applied Optics]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2009. 320 p. (In Russian)
3. *Razreshenie kamer videonabliudeniia — analogovykh i IP* [Resolution of CCTV Cameras — Analog and IP]. Available at: http://video-praktik.ru/kamery_razreshenie.html (accessed 20 March 2017).
4. *Fokusnoe rasstoianie ob'ektivov* [Focal Length of Lenses]. Available at: <http://kb-sb.ru/pub/11/24/> (accessed 20 March 2017).
5. Krivoshchekova Y. V., Burbaev A. M. Development of a Compact Vandal-proof Video Camera. *Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh XLV nauchnoi i uchebno-metodicheskoi konferentsii Universiteta ITMO* [Almanac of Scientific Works of Young Scientists of the XLV Scientific and Educational-Methodical Conference of the ITMO University], 2016, vol. 3, pp. 11–13 (In Russian).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, снижая рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста: входите на страницу <http://www.researcherid.com>, слева под надписью «New to ResearcherID?» нажимаете на синюю кнопку «Join Now It's Free» и заполняете короткую анкету. По указанному электронному адресу получаете сообщение с предложением по ссылке заполнить полную регистрационную форму на ORCID. Получаете ID.

СЕРГЕЕВ МИХАИЛ БОРИСОВИЧ К 60-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ



Сергеев Михаил Борисович родился 24 апреля 1957 года в г. Богородицке Тульской области в семье рабочих.

В 1974 году окончил среднюю школу № 13 в г. Кохтла-Ярве Эстонской ССР. В этом же году поступил на факультет автоматики и вычислительной техники Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина), который успешно окончил в 1980 году по специальности «Электронные вычислительные машины».

После окончания ЛЭТИ по распределению был направлен на ПО «Кировский завод», где работал в течение шести лет в КБ-4 на должностях инженера, старшего инженера, начальника вычислительной машины.

В апреле 1986 года Михаил Борисович перешел на работу в Ленинградский институт авиационного приборостроения (ЛИАП) на кафедру вычислительных систем и сетей, привнеся в круг научных исследований кафедры направление, связанное с исследованиями в области теории разрядных вычислений и проектирования специализированных процессоров для систем обработки информации. В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В 1989 и 1990 гг. М. Б. Сергеев работал экспертом Ленинградского инженерного центра Государственного комитета Совета министров СССР по науке и технике (ГКНТ СССР).

В 1991 году проходил научную стажировку в Институте проблем моделирования в энергетике АН УССР, где продолжил исследования в области методов разрядных вычислений.

Развив и существенно дополнив основные разделы теории разрядных вычислений, в 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой сте-

пени доктора технических наук по специальности 05.13.05 — «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

С 2002 года М. Б. Сергеев заведует кафедрой вычислительных систем и сетей ЛИАП как избранный по конкурсу; ведя активную преподавательскую деятельность, читает такие курсы лекций, как проектирование микропроцессорных систем, интерфейсы периферийных устройств, проектирование центральных и периферийных устройств ЭВМ, состояние и перспективы микропроцессорных систем, специализированное аппаратное обеспечение финансовых систем, экспертиза в таможенном деле.

В 2006 году М. Б. Сергееву присвоено ученое звание профессора.

В 2014 году назначен на должность директора Института вычислительных систем и программирования Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП — бывший ЛИАП), который возглавляет по настоящее время.

При активном участии М. Б. Сергеева институт развивает международное сотрудничество с учебными заведениями Франции, Италии, Израиля, Канады, Австралии и других стран. Тесные научные связи установлены с кафедрами и профессорами Ben-Gurion University of Negev, Academic Center RUPPIN, Jerusalem College of Technology, University of Wollongong и др., с которыми по результатам научных исследований опубликованы десятки совместных научных статей как в российских, так и в зарубежных изданиях, а также две монографии:

Блаунштейн Н. Ш., Сергеев М. Б., Шепета А. П. Прикладные аспекты электродинамики. — СПб.: Аграф+, 2016. — 272 с.

Christodoulou Ch., Blaunstein N., Sergeev M. Introduction to Radio Engineering. — CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. — 272 p.

Приказами Министра образования РФ М. Б. Сергеев награжден дипломами за руководство работой студентов, награжденных медалью «За лучшую научную студенческую работу» (2002 и 2004 гг.).

За заслуги в области образования М. Б. Сергеев награжден нагрудным знаком «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации» (2004).

За выдающиеся личные заслуги в развитии высшего образования, экономического и научного потенциала в Санкт-Петербурге решением Законодательного собрания Санкт-Петербурга М. Б. Сергееву объявлена благодарность (2016).

Серьезную часть творческой биографии М. Б. Сергеева занимает научная исследовательская работа. В сферу его научных интересов входят такие направления, как системы превентивной безопасности, разрядные методы вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления, оптико-информационные системы, проектирование специализированных систем обработки информации.

Одним из новых научных направлений кафедры вычислительных систем и сетей, возглавляемой Михаилом Борисовичем, развиваемых совместно с творческим коллективом специалистов университета, является теория глобально распределенных информационно-управляющих систем и сетей на основе необслуживаемых дистанционно управляемых модулей. Под руководством М. Б. Сергеева созданы уникальные распределенные системы удаленного мониторинга распределенных объектов, в том числе многоканальные видеосистемы, использующие различные коммуникации, распределенные системы управления, обработки и накопления разнородных данных. Сформировавшийся на кафедре под его управлением научный коллектив основал и успешно развивает теорию квазиортогональных базисов, создавая новую научную школу.

Сегодня научный багаж М. Б. Сергеева составляют более 200 опубликованных научных статей, 9 научных книг и учебников, более 20 авторских свидетельств на изобретения и патентов, десятки зарегистрированных программных продуктов.

Под его руководством подготовлены два кандидата и один доктор технических наук.

М. Б. Сергеев является членом докторских диссертационных советов при Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (с 2002 г.), при Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения (с 2015 г.), а также объединенного диссертационного совета на базе Санкт-Петербургского го-

сударственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ГУАП и ВГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова (с 2017 г.).

В 2002 году в издательстве «Политехника» профессор Сергеев М. Б. организовал научный журнал «Информационно-управляющие системы», ныне входящий в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, и является его бессменным главным редактором. Под руководством Михаила Борисовича журнал стал по-настоящему международным как по составу редколлегии, так и по составу авторов, занимая ведущие позиции в России по представленным тематическим разделам: кибернетике, автоматике и вычислительной технике.

Достижения М. Б. Сергеева в области космических исследований, заслуги в создании технических средств и развитии научного сотрудничества с предприятиями Российского агентства по системам управления и ракетно-космической отрасли отмечены наградами Федерации космонавтики РФ: медалью «Академик М. В. Келдыш» (2006), орденом «С. П. Королев» (2010), медалью «Первый космонавт Земли Ю. А. Гагарин» (2012).

С 2001 года и по настоящее время М. Б. Сергеев является руководителем опытно-конструкторских работ по разработке и созданию технических средств, выполняемых в интересах федеральных служб РФ. Более 35 ОКР завершили созданием опытных образцов специальной техники, прошедших военную приемку и выпускающихся серийно.

За значительный вклад в оснащение подразделений ФСБ России цифровой специальной техникой имеет Благодарность руководителя УФСБ России по Санкт-Петербургу и Ленинградской области (2003); Благодарность руководителя УФСБ России по Челябинской области (2005); Благодарность руководителя УОТМ ФСБ России (2006); Благодарность руководителя ОПУ ФСБ России (2007).

В 2012 году аккредитован и включен в Федеральный реестр экспертов научно-технической сферы Минобрнауки РФ.

Опорой и поддержкой во всех жизненных ситуациях для Михаила Борисовича были его коллеги, друзья и семья: жена Наталья, сын Александр и горячо любимые внуки. Сын Сергеев Александр Михайлович пошел по стопам отца — окончив ГУАП, успешно работает в сфере высшего образования.

Редакция журнала «Информационно-управляющие системы», сотрудники кафедры вычислительных систем и сетей ГУАП, коллеги и друзья поздравляют Михаила Борисовича с юбилеем, желают ему долгих лет творческой жизни, успехов и процветания.

**АБРАМОВ
Тигран
Арутюнович**



Старший преподаватель кафедры информационных технологий и компьютерных систем Института информационных технологий и управления в технических системах Севастопольского государственного университета. В 1983 году окончил Севастопольский приборостроительный институт по специальности «Электронные вычислительные машины». Является автором 30 научных публикаций. Область научных интересов — имитационное моделирование сложных систем, методы статистической обработки экспериментальных данных, методы обеспечения компьютерной безопасности. Эл. адрес: TAAbramov@sevsu.ru

**БЛАУНШТЕЙН
Натан
Шаевич**



Гражданин Израиля. Профессор Иерусалимского технологического института, профессор-эмиритус кафедры систем связи инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль. В 1972 году окончил Томский государственный университет по специальности «Радиофизика и электроника, включая квантовую». В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором около 200 научных публикаций, в том числе 12 монографий, пяти патентов и трех изобретений. Область научных интересов — радиофизика, системы проводной и беспроводной связи, радары, оптика и лидары. Эл. адрес: nathan.blaunstein@hotmail.com

**БРОНШТЕЙН
Игорь
Григорьевич**



Генеральный директор ЗАО «КБ Юпитер», директор Центра оптико-информационных технологий и систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники за 2005 год. В 1973 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики по специальности «Специальные оптические приборы». Является автором 58 научных публикаций. Область научных интересов — оптико-информационные системы. Эл. адрес: kb@jupiter.spb.ru

**БЕЛОЙВАН
Павел
Александрович**



Аспирант кафедры компьютерной фотоники и видеоинформатики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 2015 году окончил Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики по специальности «Проектирование и метрология оптико-электронных приборов специального назначения». Является автором 19 научных публикаций. Область научных интересов — оптико-информационные системы. Эл. адрес: beloiwan92@gmail.com

**БРОНФМАН
Ирина**



Гражданка Израиля. Ассистент инженерного колледжа Шамун, Ашдоде, помощник преподавателя кафедры систем связи Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль. В 2011 году окончила бакалавриат инженерного колледжа Шамун, Ашдоде, Израиль, по специальности «Электротехника и электроника со специализацией в системах связи», в 2017 году — магистратуру инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль, по специальности «Системы связи». Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — беспроводная связь, маскирование ошибок при анализе и обработке изображений и видео, спутниковая связь. Эл. адрес: irinamo@post.bgu.ac.il

**БРЮХОВЕЦКИЙ
Алексей
Алексеевич**



Доцент, заведующий кафедрой информационных технологий и компьютерных систем Института информационных технологий и управления в технических системах Севастопольского государственного университета. В 1974 году окончил Севастопольский приборостроительный институт по специальности «Электронные вычислительные машины». В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 60 научных публикаций. Область научных интересов — информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений, интеллектуальные методы защиты информации, методы обеспечения компьютерной безопасности. Эл. адрес: bryukhovetskiy@sevsu.ru

БУРБАЕВ
Амир
Маруанович



Доцент кафедры компьютерной фотоники и видеоинформатики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 1961 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики по специальности «Оптические приборы и спектроскопия». Является автором 44 научных публикаций и четырех авторских свидетельств на изобретения. Область научных интересов — технология сборки и юстировки оптических приборов, обработка технологичности конструкций оптических приборов. Эл. адрес: aburbaev@mail.ru

ГОРДЕЕВ
Александр
Владимирович



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1975 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электронные вычислительные машины». В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 90 научных публикаций. Область научных интересов — моделирование параллельных вычислительных систем, распределенные вычисления, вычислительные сети. Эл. адрес: avg@aanet.ru

ДОБРИКОВ
Владимир
Анатольевич



Доцент кафедры космической радиолокации и радионавигации Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 1985 году окончил Ленинградский военный инженерный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Инженер-математик». В 1992 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 70 научных публикаций и шести патентов на изобретения. Область научных интересов — обработка сигналов в радиотехнических информационных системах, глобальные навигационные спутниковые системы, системы функциональных дополнений, калмановская фильтрация. Эл. адрес: dwa33@mail.ru

ЕЛИЗАРОВ
Максим
Андреевич



Аспирант кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного экономического университета. В 2013 году окончил Санкт-Петербургский государственный инженерно-экономический университет по специальности «Прикладная информатика в экономике». Область научных интересов — системы управления, беспроводные сети, интернет вещей. Эл. адрес: elizarovmaks@gmail.com

ЗАКУТАЕВ
Александр
Александрович



Начальник лаборатории, старший научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2010 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем». Является автором 13 научных публикаций и одного патента на изобретение. Область научных интересов — оптико-информационные системы, обработка изображений. Эл. адрес: zakutaev.a@mail.ru

ИВАНОВ
Денис
Олегович



Инженер-программист Института компьютерной безопасности, вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Комплексная защита объектов информатизации». Является автором девяти научных публикаций. Область научных интересов — цифровая связь, помехоустойчивое кодирование, цифровая обработка сигналов. Эл. адрес: denis.ivo@vu.spb.ru

КАРИН
Сергей
Александрович



Докторант кафедры оптико-электронных средств Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2001 году окончил Военный инженерно-космический университет им. А. Ф. Можайского. В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата военных наук. Является автором 49 научных публикаций, семи авторских свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Область научных интересов — методы объектно-ориентированного анализа и проектирования для систем контроля и управления, геоинформационные системы и системы дистанционного зондирования Земли, технологии моделирования и представления знаний UML и XML и др. Эл. адрес: Sergey.Karin@gmail.com

КОЗЛОВ
Александр
Владимирович



Ведущий инженер-программист Института компьютерной безопасности, вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2005 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Сети ЭВМ и телекоммуникации». Является автором двенадцати научных публикаций. Область научных интересов — цифровая связь, помехоустойчивое кодирование, цифровая обработка сигналов. Эл. адрес: akozlov@vu.spb.ru

КОШКАРОВ
Александр
Сергеевич



Доцент кафедры космической радиолокации и радионавигации Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2003 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы». В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 20 научных публикаций. Область научных интересов — обработка сигналов в навигационных и оптико-электронных информационных системах, глобальные навигационные спутниковые системы, помехоустойчивость радиотехнических систем. Эл. адрес: koshkarof@rambler.ru

КЛЮЧАРЕВ
Александр
Анатольевич



Доцент кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1971 году окончил Севастопольский приборостроительный институт по специальности «Общая радиотехника». В 1982 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций и 10 изобретений. Область научных интересов — обработка экспериментальных данных, системы автоматизации натурального эксперимента, информационно-измерительные системы. Эл. адрес: ak@aanet.ru

КОЛБАНЕВ
Михаил
Олегович



Профессор кафедры прикладных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного университета сервиса и экономики. Мастер связи. В 1977 году окончил Ленинградский электротехнический институт связи им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по специальности «Автоматическая электросвязь». В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов — моделирование информационных систем. Эл. адрес: mokolbanev@mail.ru

КРИВОЩЕКОВА
Юлия
Владимировна



Магистрант кафедры компьютерной фотоники и видеоинформатики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 2015 году окончила бакалавриат Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по специальности «Физика когерентно-оптических и оптоэлектронных систем». Область научных интересов — оптико-информационные системы. Эл. адрес: pugowitsa93@gmail.com

ЛИФЕРЕНКО

**Виктор
Данилович**



Профессор Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 1961 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Радиофизика».

В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 100 научных публикаций и 40 патентов на изобретения.

Область научных интересов — опτικο-информационные системы.

Эл. адрес: display1@mail.ru

МАЛЬЦЕВ

**Георгий
Николаевич**



Профессор кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Академии космонавтики им. К. Э. Циолковского.

В 1980 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиотехнические системы комплексов».

В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 300 научных публикаций и 27 патентов на изобретения.

Область научных интересов — обработка сигналов в радиотехнических и опτικο-электронных информационных системах и др.

Эл. адрес: georgy_maltsev@mail.ru

МАРТЫНОВА

**Любовь
Александровна**



Ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра «Системы освещения обстановки» АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»», Санкт-Петербург.

В 1985 году окончила Ленинградский кораблестроительный институт по специальности «Прикладная математика».

В 2013 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 80 научных публикаций.

Область научных интересов — системный анализ, математическое моделирование, оценка эффективности, обработка разнородной информации.

Эл. адрес: martynowa999@bk.ru

МАТЪЯШ

**Валерий
Анатольевич**



Начальник учебного управления, доцент кафедры компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1995 году окончил Санкт-Петербургскую государственную академию аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций.

Область научных интересов — интеллектуальный анализ данных, обработка данных дистанционного зондирования Земли, системы наземно-космического мониторинга.

Эл. адрес: vam@aanet.ru

МОИСЕЕВ

**Дмитрий
Владимирович**



Доцент кафедры информационных технологий и компьютерных систем Севастопольского государственного университета.

В 2009 году окончил Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности по специальности «Специализированные компьютерные системы».

В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 70 научных публикаций и восьми патентов на изобретения.

Область научных интересов — вероятностная форма представления данных, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления, информационно-измерительные системы, интеллектуальные системы мониторинга.

Эл. адрес: DVMoiseev@sevsu.ru

ОВЧИННИКОВ

**Андрей
Анатольевич**



Доцент кафедры безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2000 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информационные системы в экономике».

В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 25 научных публикаций и пяти патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория помехоустойчивого кодирования, криптография.

Эл. адрес: mldoc@ieee.org

ОХТИЛЕВ
Михаил
Юрьевич



Профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий и программной инженерии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1982 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Автоматизированная обработка и анализ информации».

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 190 научных публикаций, в том числе трех монографий.

Область научных интересов — теория программирования, теория алгоритмов, системы реального времени, математическая логика и др.

Эл. адрес: oxt@mail.ru

РОГАЧЕВ
Виктор
Алексеевич



Доцент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

В 1977 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Радиотехника».

В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций и одного изобретения.

Область научных интересов — инфракрасные, оптико-информационные системы, системы компьютерного зрения, операционные системы для встраиваемых систем, кроссплатформенное программное обеспечение.

Эл. адрес: rogachevv50@gmail.com

СКАТКОВ
Александр
Владимирович



Профессор кафедры информационных технологий и компьютерных систем Севастопольского государственного университета, эксперт РАН, заслуженный работник образования Автономной Республики Крым.

В 1969 году окончил Севастопольский приборостроительный институт по специальности «Математические и счетно-решающие приборы и устройства».

В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 300 научных публикаций.

Область научных интересов — системный анализ, исследование операций, прикладная математика, моделирование, численные методы, распределенные вычислительные системы, автоматизированные системы управления.

Эл. адрес: kvt.sevntu@gmail.com

ТАТАРНИКОВА
Татьяна
Михайловна



Профессор кафедры безопасности информационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1993 году окончила Восточно-Сибирский технологический институт по специальности «Электронно-вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

В 2007 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — инфокоммуникации, взаимодействие неоднородных сетей.

Эл. адрес: tm-tatarn@yandex.ru

ХАДАР
Офер



Гражданин Израиля.

Доцент, заведующий кафедрой инженерных систем связи инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль.

В 1992 году окончил Негевский университет им. Бен-Гуриона по специальности «Электротехника и компьютерная техника».

В 1997 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора наук (PhD).

Является автором более 50 научных публикаций.

Область научных интересов — сжатие изображений, кодирование видео, пакетные видео, передача видео по IP-сетям, обработка изображений.

Эл. адрес: hadar@cse.bgu.ac.il

ХИМЕНКО
Виталий
Иванович



Профессор, директор департамента развития НИО ЦИТ «Петрокомета», Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.

В 1969 году окончил Куйбышевский политехнический институт по специальности «Приборные устройства».

В 1992 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 150 научных публикаций.

Область научных интересов — статистическая радиофизика, обработка информации в системах живой и неживой природы.

Эл. адрес: vih.13@yandex.ru

ШПАКОВ
Владимир
Михайлович



Старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1962 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1970 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 67 научных публикаций и восьми авторских свидетельств на изобретения.

Область научных интересов — компьютерное моделирование и автоматическое управление дискретно-непрерывными процессами.

Эл. адрес: vlad@iias.spb.su

ЯКИМОВ
Виктор
Леонидович



Заместитель начальника кафедры приемных устройств и радиоавтоматики Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 2000 году окончил Военный инженерно-космический институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы космических аппаратов».

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором более 40 научных публикаций. Область научных интересов — моделирование сложных систем, методы обработки телеметрической информации, техническая диагностика, методы обработки изображений.

Эл. адрес: yakim78@yandex.ru

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

ISSN 1684-8853



9 771684 885009