

ISSN 1684-8853

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

1(86)/2017

1(86)/2017

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

Founder

«Information and Control Systems», Ltd.

PublisherSaint-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. Umnitsina**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

THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS

Balotin N. A., Sergeev M. B. *Ryser's Conjecture Expansion
for Bicirculant Strictures and Hadamard Matrix Resolvability
by Double-Border Bicycle Ornament*

2

INFORMATION PROCESSING AND CONTROL

Bogachev I. V., Levenets A. V., Chye En Un. *Statistical Analysis
of Telemetry Data for Compression*

11

SYSTEM AND PROCESS MODELING

Tatarnikova T. M. *Analytical-Statistical Model of Mesh Network
Survivability Evaluation*

17

Kharchenko A. V., Ushakov I. A. *Model of Ground-Space Command
Information Network with Data Path Formation under External
Interference on Radio Channels*

23

HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES

Kopkin E. V., Borod'ko D. N., Pastukhova K. E. *Algorithm
for Constructing a Quasi-Optimal Flexible Program for Analysis
of Technical State of an Object*

31

Molev A. A. *XML-based Method for Automatic Formation of Telecommu-
nication Modules of Structural Elements in Automated System*

40

INFORMATION CODING AND TRANSMISSION

Sulavko A. E., Eremenko A. V., Tolkacheva E. V., Borisov R. V. *Complexation of Independent Biometric Features in People Recognition
with Quadratic Forms, Perceptrons and Functional Hee-module*

50

Mitrofanov S. A. *Overview of Broadcast Transmission usage Scenarios
in LTE Networks*

63

INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM

Hadar Ofer, Bronfman Irina, Blaunstein Nathan. *Optimization of
Error Concealment based on analysis of Fading Types. Part 1. Statistical
Description of the Wireless Video Channel, Models of BER Determination
and Error Concealment of Video Signals*

72

Martynova L. A. *Concerted Action of a Radiator and Autonomous
Uninhabited Submersibles for Effective Seismic Exploration*

83

SYSTEM ANALYSIS

Zhilnikova N. A., Shishkin A. I., Epifanov A. B., Epifanova M. A. *Algorithm of Control over Technogenic Impact Distribution for Territorial
Natural-Technical Complex based on Geoinformation Systems*

93

CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS

Khafizov R. G., Khafizov D. G., Tanaeva E. G. *Algorithm of Parameter
Estimation and Vessel Tracking on Eye Fundus Images*

102

CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS

Chertovskoy V. D. *Mathematical Description and Computer Realization
of Adaptive Automatized Company Control System Model*

106

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

115

Submitted for publication 09.01.17. Passed for printing 20.02.17. 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.

1(86)/2017

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-
УПРАВЛЯЮЩИЕ
СИСТЕМЫ

Учредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»

Издатель
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

Главный редактор
М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора
Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Ответственный 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, РФ

В. Н. Козлов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
К. Кристодолу,
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. Г. 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, РФ

А. 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
Компьютерная верстка: Ю. В. Умницына

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-02, e-mail: ius.spb@gmail.com, сайт: http://i-us.ru

Журнал 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 научные результаты диссертации
на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

© Коллектив авторов, 2017

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Расширение гипотезы Райзера
на двучисленные структуры и разрешимость матриц Адамара
орнаментом в виде бицикла с двойной каймой 2

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Богачев И. В., Левенец А. В., Чье Е. У. Статистический анализ
телеметрических данных с точки зрения задачи сжатия 11

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Татарникова Т. М. Аналитико-статистическая модель
оценки живучести сетей с топологией mesh 17

Харченко А. В., Ушаков И. А. Модель наземно-космической
командно-информационной сети с формированием маршрута
передачи данных в условиях внешних помеховых воздействий
на радиоканал 23

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Копкин Е. В., Бородько Д. Н., Пастухова К. Е. Алгоритм построения
квазиоптимальной гибкой программы анализа технического
состояния объекта 31

Молев А. А. Метод автоматического формирования
телекоммуникационных модулей структурных элементов
автоматизированных систем на основе XML-описания 40

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Сулаво А. Е., Еременко А. В., Толкачева Е. В., Борисов Р. В.
Комплексирование независимых биометрических признаков
при распознавании субъектов на основе сетей квадратичных форм,
перспектров и меры Хи-модуль 50

Митрофанов С. А. Обзор сценариев использования
широковещательной передачи в сетях LTE 63

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Hadar Ofer, Bronfman Irina, Blaunstein Nathan. Optimization of Error
Concealment based on analysis of Fading Types. Part 1. Statistical
Description of the Wireless Video Channel, Models of BER Determination
and Error Concealment of Video Signals 72

Мартынова Л. А. Метод согласованного поведения излучателя
и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного
ведения сейсморазведки 83

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Жильникова Н. А., Шишкин А. И., Епифанов А. В., Епифанова М. А.
Алгоритм управления перераспределением техногенной нагрузки
для территориальных природно-технических комплексов на основе
геоинформационных систем 93

УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Хафизов Р. Г., Хафизов Д. Г., Танаева Е. Г. Алгоритм оценки
параметров и прослеживания сосудов на изображениях глазного дна 102

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Чертовской В. Д. Математическое описание и компьютерная
реализация модели адаптивной автоматизированной
системы управления производством 106

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

115

Сдано в набор 09.01.17. Подписано в печать 20.02.17. Формат 60×84^{1/8}.
Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 14,0. Уч.-изд. л. 19,5. Тираж 1000 экз (1-й завод 150 экз). Заказ 28.
Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.
Отпечатано с готовых диалитивов 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.

РАСШИРЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ РАЙЗЕРА НА ДВУЦИКЛИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ И РАЗРЕШИМОСТЬ МАТРИЦ АДАМАРА ОРНАМЕНТОМ В ВИДЕ БИЦИКЛА С ДВОЙНОЙ КАЙМОЙ

Н. А. Балонин^а, доктор техн. наук, профессор

М. Б. Сергеев^а, доктор техн. наук, профессор

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

Цель: расширить границу предельных порядков гипотезы Райзера с циклических на бициклические квазиортогональные матрицы с двумя значениями элементов (уровней), исследовать разрешимость бициклических структур с одной и двумя каймами на известные типы ортогональных по столбцам (строкам) матриц. **Результаты:** показано, что ортогональные вещественные бициклы Эйлера с уровнями $a = 1, -b$, где $b = \frac{t}{t + \sqrt{2t}}$, существуют для всех значений $n = 4t - 2$ и с добавлением каймы переходят через промежуточную стадию вещественных матриц Мерсенна в целочисленные матрицы Адамара, определяя тем самым структуру матриц минимальной сложности, разрешимую для всех возможных для них порядков. Иными словами, гипотеза Адамара (хорошо известная своей недоказуемостью некомбинаторными методами) доказана при исследовании закономерностей «матричных переходов» от вещественных (не ограниченных запретом иметь иррациональные элементы) типов матриц к целочисленным матрицам Адамара с элементами $1, -1$. Представлено родство матриц максимума детерминанта порядков $n = 4t - 2$ ортогональным бициклом с тем существенным отличием от матриц Эйлера, что их бициклическая структура так же, как бициклическая структура матриц Адамара, разрешима на отведенных им порядках не всегда. Произведены оценки границ симметрии различных семейств бициклических матриц максимального детерминанта, включая матрицы Адамара. **Практическая значимость:** алгоритмы нахождения бициклических матриц использованы при построении поискового программного комплекса. Субоптимальные по детерминанту матрицы составляют основу фильтров Эйлера и Мерсенна, применяемых для сжатия и маскирования изображений.

Ключевые слова — ортогональные матрицы, циклические матрицы, бициклические матрицы, гипотеза Райзера, гипотеза Адамара, матрицы Адамара, матрицы Мерсенна, матрицы Эйлера.

Введение

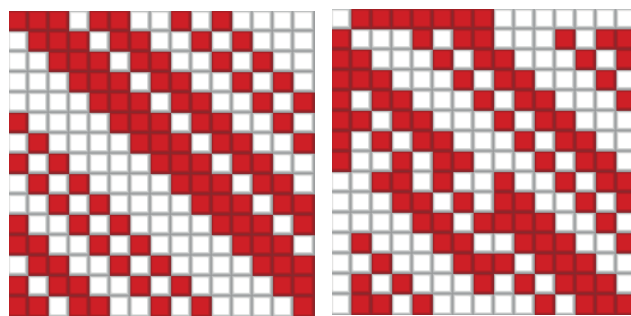
В теории финитных динамических систем [1], теории ортогональных матриц [2] часто рассматриваются теплицевы или ганкелевы формы, способствующие упрощению анализа. Их разновидность — циклические и бициклические матрицы с малым количеством значений их элементов (уровней) — объединяет в себе черты орнаментов (узоров) портретов матриц и собственно самих матриц.

Семейство орнаментов квадратных матриц с двумя значениями элементов описывается тремя инвариантами $\{n, k, \lambda\}$, где n — порядок матрицы, характеризующий величину узора; k — количество одинаковых элементов каждой строки и столбца; λ — количество одинаковых элементов, имеющих одну и ту же позицию в каждой паре строк или столбцов.

В качестве примера семейства на рис. 1 показаны две матрицы Мерсенна [3] порядка 15 с инвариантами $\{15, 7, 3\}$, каждая имеет по семь одинаковых клеток в каждой строке и столбце

и по три — в каждой паре строк или столбцов (клетки иного цвета соответствуют параметрам некоторого зависимого дизайна).

Длительное время считалось, что циклические структуры (матрица слева на рис. 1) могут быть ортогональными матрицами с вещественными элементами только для простых порядков, пока не были обнаружены контрпримеры на составных порядках со значениями 15, 35 и 63. Первые два [4] образованы произведениями пар



■ Рис. 1. Два $\{15, 7, 3\}$ -орнамента матриц Мерсенна

близких простых чисел 3, 5 и 5, 7. Порядок 63 входит в семейство чисел Мерсенна $2^k - 1$, которые образуют особое представительство в пределах $4t - 1$.

В настоящей работе рассматриваются задачи, связанные с изучением различных типов орнаментов матриц, определяющих возможность построения ортогональных массивов.

Квадратичные уравнения орнаментов

Порядок матрицы ограничивает возможные сочетания инвариантов $\{n, k, \lambda\}$, поскольку не все орнаменты реальны в рамках квадратной структуры. Реализуемые параметры [2] связывает квадратичное диофантово уравнение I вида

$$k(k - 1) = \lambda(n - 1).$$

Второе столь же общее матричное квадратичное уравнение $\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \omega \mathbf{I}$, где ω — вес матрицы, а \mathbf{I} — единичная матрица, отражает условие ортогональности столбцов матрицы. Для матриц с двумя элементами $a, -b$ (матрица с положительными элементами не может быть ортогональной) скалярное произведение любых двух строк, отличающихся индексами, содержит λ произведений вида $a^2, 2(k - \lambda)$ произведений ab ($k - \lambda$ элементов a каждой из строк умножено на b) и $n - 2k + \lambda$ произведений b^2 . Отсюда следует квадратичное характеристическое уравнение II ортогонального дизайна

$$(n - 2k + \lambda)b^2 - 2(k - \lambda)ab + \lambda a^2 = 0, \quad (1)$$

записанное в виде, удобном для поиска корней при превалировании количеств положительных элементов над отрицательными. Для матриц с целыми элементами $a, -b$ оно дает квадратичное диофантово уравнение II.

Связь дискретных и непрерывных задач

Не следует думать, что квадратичное уравнение (1) касается поиска только ортогональных матриц. Оно возникает и в том случае, когда искомого неортогональную матрицу обязательно сопровождает ортогональная.

Значения параметров $a, -b$ инвариантами орнамента не фиксированы. Поэтому для его поиска важно лишь то, что ортогональная матрица существует и является необходимым условием решаемой задачи.

Среди матриц с элементами 1, -1 наиболее известны неортогональные матрицы максимума детерминанта [2] и ортогональные по столбцам (строкам) матрицы Адамара [5, 6] с весом $\omega = n$.

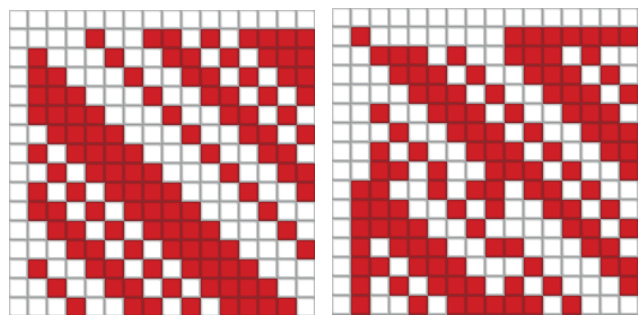
Орнаменты первых отличаются лишь тем, что у матрицы Адамара свойства иметь 1, -1 и быть ортогональными совмещены в одной матрице, а у матриц максимума детерминанта ортогональность достигается параметрическим изменением уровней до некоторых фиксированных ортогональностью значений. Важным случаем является вариант ортогонализации матрицы без изменения количества уровней $a, -b$.

Это отчасти напоминает логику привлечения комплексных чисел для поиска вещественных корней полиномов. Вместо матрицы максимума детерминанта с элементами 1, -1, оказывается, можно искать ортогональную матрицу локального максимума детерминанта с вещественными рациональными или даже иррациональными элементами $a, -b$, а затем округлением до целых 1, -1 находить итоговое решение, так как орнамент у них один. Этот путь, через обращение к вещественным матрицам, не видят те, кто занят сугубо комбинаторным исследованием задачи.

Добавим, что изменение параметров $a, -b$ важное, но не единственное средство обратного перехода к целочисленной задаче.

В теории матриц Адамара [2, 6] структуру (орнамент), описываемую тремя инвариантами, как правило, имеет не сама матрица, а ее блок или блоки, в частности, основа (core) нормализованной матрицы с каймой в виде первой строки и столбца из 1. Лишенная каймы и инвертированная по знаку основа с элементами 1, -1 не ортогональна, но ортогональность ее столбцам и строкам можно вернуть изменением элементов $a, -b$. На рис. 2 показаны две матрицы Адамара, неортогональные внутренние блоки которых (при инверсии знаков) отвечают двум показанным на рис. 1 орнаментам {15, 7, 3} вещественных ортогональных по столбцам (и строкам) матриц Мерсенна.

Следовательно, узор неортогональных целочисленных блоков такой матрицы должен удовлетворять обоим квадратичным уравнениям, указанным выше.



■ Рис. 2. Две матрицы Адамара с блоками из матриц Мерсенна

Циклические и бициклические орнаменты матриц

Погружение задачи теории целочисленных матриц в более широкую область матриц с рациональными или иррациональными коэффициентами открывает дополнительные возможности. Например, итерациями можно проводить поиск значений вещественных элементов. Рассмотрим типичные структуры.

Циклическая матрица (моноцикл) — это регулярная структура, образуемая сдвигом верхней строки вправо с размещением вытесняемых элементов слева. В данном случае λ описывает количество близких пар отрицательных элементов строки, причем первый и последний элементы рассматриваются как соседствующие.

$$\text{Бициклическая матрица (бицикл)} \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T & -\mathbf{A}^T \end{pmatrix}$$

образована двумя циклическими матрицами \mathbf{A} , \mathbf{B} с параметрами $\{v, k_1, \lambda_1\}$, $\{v, k_2, \lambda_2\}$. Нижняя часть узора зависима, ортогональность блоков нас, как правило, не интересует, поэтому для описания орнамента достаточно четырех параметров $\{n = 2v; k_1, k_2; \lambda\}$, где $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$.

Диофантово уравнение I бицикла имеет вид $k_1(k_1 - 1) + k_2(k_2 - 1) = \lambda(v - 1)$. Заменой переменных $x = p - k_1$, $y = p - k_2$ при $p = k_1 + k_2 - \lambda$ оно сводится к уравнению окружности

$$x^2 + y^2 = p + \lambda(v - 2p), \quad (2)$$

решаемому в целых числах. Характеристическое уравнение

$$\lambda b^2 - 2(k_1 + k_2 - \lambda)ab + (n - 2(k_1 + k_2) + \lambda)a^2 = 0 \quad (3)$$

отражает условие ортогональности строк бицикла с элементами $a, -b$, оно записано в виде, удобном для поиска корней при превалировании количества положительных элементов над отрицательными.

Ортогональные моноциклы

Циклические структуры разрешимы, например, на порядках простых чисел, но целочисленные варианты жестко ограничены решением пары квадратичных диофантовых уравнений I, II. Согласно гипотезе Райзера [7], циклических матриц Адамара порядка выше 4 не бывает. Этот порядок разрешим единственной в своем роде не тривиальной по порядку (скалярный случай тривиален) симметричной матрицей с негативными элементами на диагонали.

Тем самым структуры с равными по своим абсолютным величинам элементами обладают недо-

статочной гибкостью для изготовления ортогональных моноциклов. Неравенство абсолютных величин элементов $a, -b$ создает дополнительный ресурс, которым можно пользоваться. Кроме того, мы можем рассматривать такие блоки как строительный материал для расширяемых каймой матриц с равными значениями $a = b$.

Диофантово уравнение I вида $k(k - 1) = \lambda(n - 1)$ с параметрами $\lambda = t$, $k = 2t$ заведомо разрешимо для порядков $n = 4t - 1$.

После подстановки параметров в уравнение связи (1) оно упрощается до $(t - 1)b^2 - 2tba + ta^2 = 0$, положительный корень этого полинома дает уровень вещественных ортогональных моноциклов Мерсенна [3, 5] $b = \frac{t}{t + \sqrt{t}}$ при $a = 1$.

Это не означает, что такое решение возможно именно в виде моноцикла, решение справедливо для всех гипотетически возможных орнаментов семейства с указанными параметрами. Циклический тип орнамента не универсален, зато тесно связан с числовой системой. Он сопровождает все числа Мерсенна, парные произведения близких простых чисел и простые числа — специфический индикатор простоты числа, если убрать два исключения.

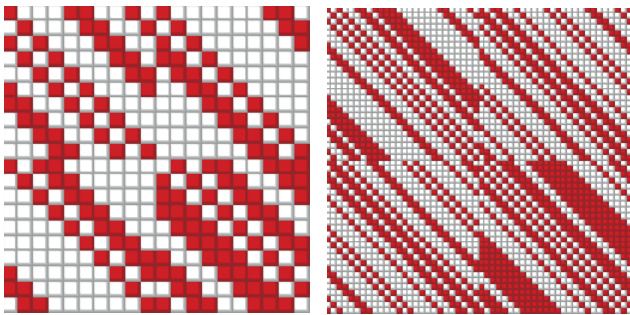
Ортогональные бициклы Адамара

Центральный вопрос относительно разрешающей силы орнаментов поставлен, по сути, формулировкой проблемы Райзера [7]: существуют ли бициклы, ортогональные независимо от значения их порядка?

В теории чисел есть две теоремы, одна из которых дает условия разложения нечетного числа на суммы квадратов двух чисел (теорема Ферма, доказательство которой опубликовал Эйлер), и теорема Лагранжа о разложимости любого числа на сумму двух квадратов. Теория матриц-орнаментов сопровождает эти теоремы графически и иллюстрациями, являясь их интерпретацией.

То, что теорема Лагранжа отвечает разрешимости матриц Адамара орнаментов в виде четырехблочной конструкции, было очевидно уже в середине прошлого века Вильямсону [8]. Для сокращения перебор он предложил искать только симметричные решения блоков, первый неразрешимый порядок матриц Вильямсона 35 обнаружил Драгомир Джокович [9]. Границу известного очерчивает таблица матриц Вильямсона [10] с предельно достижимым современной вычислительной техникой размером блока 59 (более общая форма была предложена Гетхальсом — Зейделем [2, 11]).

Буквальная визуализация представления матрицы Адамара *двумя квадратами* является иллюстрацией теоремы Эйлера — Ферма для нечет-



■ **Рис. 3.** Бициклические матрицы Адамара порядков $n = 20$ и $n = 52$

ных чисел $p = n/4 = x^2 + y^2$, разности $k_1 = p - x$ и $k_2 = p - y$ описывают количества элементов одного знака в строке (рис. 3).

Напомним, что в 1749 г. Эйлер после семи лет работы и почти через сто лет после смерти Ферма доказал теорему о простых числах, согласно которой разложение числа p на сумму квадратов всегда возможно для чисел $4t - 3$, к которым относятся числа p , равные $5 = 1 + 2^2$ и $13 = 2^2 + 3^2$.

В данном случае $k_1 = p - x = 4$ и $k_2 = p - y = 3$ отвечают матрице порядка $n = 20$, $k_1 = p - x = 11$ и $k_2 = p - y = 10$ отвечают матрице порядка $n = 52$. Требуемое значение одинаковых элементов в каждой паре строк $\lambda = p - x - y$.

Граница симметрии бициклов Адамара отодвинута с 4-го порядка Райзера (для моноциклов) до критического 32-го порядка [12].

Ни одно число вида $4t - 1$ не представимо в виде суммы двух квадратов, поэтому нет, например, бициклической матрицы Адамара порядка 12, $p = n/4 = 3$. Соответственно, в первой сотне существует всего 12 бициклических матриц Адамара порядков 1, 4, 8, 16, 20, 32, 40, 52, 64, 68, 80, 100.

Ортогональные бициклы Эйлера

Для всех матриц Эйлера [3, 5] порядков $n = 4t - 2$ (размер плеча $v = n/2 = 2p - 1$, $p = t$) диофантово уравнение (2) сводится к уравнению равнобедренного прямоугольного треугольни-

ка $x^2 + y^2 = 2$, разрешимое для точки $x = y = 1$ окружности с квадратом радиуса $p + \lambda(v - 2p) = 2$.

Поскольку $k_1 = p - x$ и $k_2 = p - y$, количества элементов одного знака в плечах бицикла равны $k_1 = k_2 = p - 1 = (v - 1)/2$, $\lambda = p - 2 = (v - 3)/2$.

Дизайн $\{n = 2v; k_1, k_2; \lambda\} = \{n = 2v; (v - 1)/2, (v - 1)/2; (v - 3)/2\}$ назовем *эйлеровым*.

Формальный переход от бициклической матрицы Эйлера к матрице Мерсенна с бинарной каймой [5] и (после добавления каймы с инверсией основы) к матрице Адамара иллюстрируется рис. 4.

Наиболее проста реализация бицикла Эйлера с равными плечами $\mathbf{A} = \mathbf{B}$, $\lambda_1 = \lambda_2$, $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$, которые представляют собой, в частности, циклические матрицы Мерсенна вдвое меньшего размера $v = 3 \pmod{4}$, рассмотренные ранее.

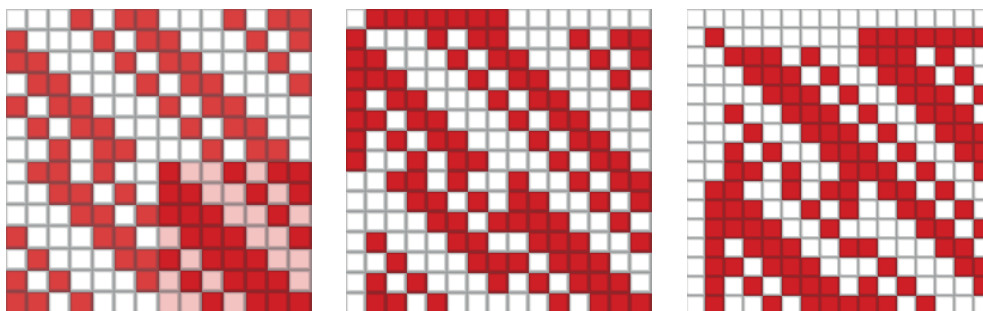
Пусть разложение на базе одной и той же матрицы в обоих плечах невозможно, тогда раскрывается скрытый ресурс бицикла: плечи его утрачивают равновесие $\mathbf{A} \neq \mathbf{B}$, отклонение $\lambda_1 = \lambda_2 + 1$ берет в расчет блоки, которым самим не обязательно быть ортогональными, ортогональна конструкция в целом.

Характеристическое уравнение (3) отражает условие ортогональности строк с элементами $a, -b$, причем $(n - 2(k_1 + k_2) + \lambda) = (n - 2p + \lambda) = p$ при $\lambda = p - 2$, $2(k_1 + k_2 - \lambda) = 2p$ и для $n = 4t - 2$, $p = t$. Положительный корень этого полинома дает уровень матриц Эйлера $b = \frac{t}{t + \sqrt{2t}}$ при $a = 1$.

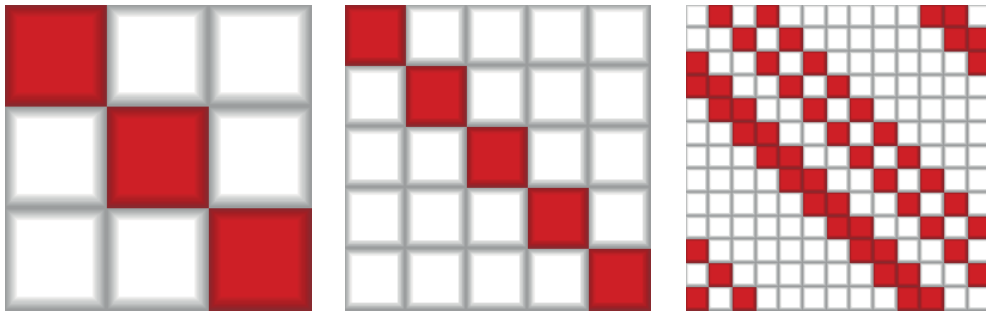
Неортогональные целочисленные бициклы

Отдельное от ортогональных матриц семейство составляют матрицы максимума детерминанта — абсолютное значение детерминанта максимально на множестве матриц с амплитудами элементов, не превышающими значения 1.

В силу исключительности свойств (детерминант максимален, элементы целочисленны) структура матриц максимума детерминанта нечетного порядка неограниченно усложняется по мере роста их размера, что затрудняет их поиск.



■ **Рис. 4.** Переход от бицикла Эйлера к матрице Мерсенна и Адамара



■ Рис. 5. Циклические матрицы максимума детерминанта порядков 3, 5, 13

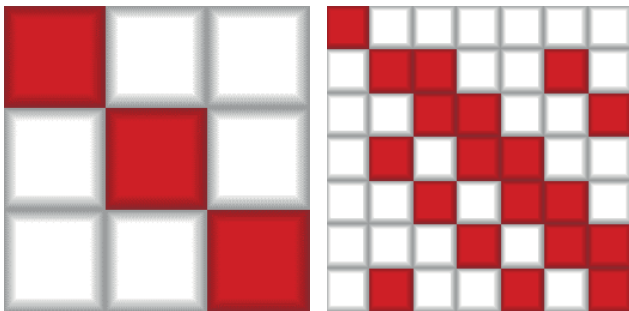
Семейство циклических матриц состоит (никто ранее не высказывал этого предположения, выскажем его) всего из трех представителей порядков 3, 5, 13 (рис. 5).

Помимо семейства циклических матриц, есть *моноциклы с каймой* из единиц порядков первых двух простых чисел Мерсенна 3, 7 (они же — бициклы с каймой без инверсии знака вида $[A \ B; \ B \ A]$) (рис. 6).

Семейству моноциклов Мерсенна вторит семейство бициклических матриц (тоже с каймой)

$$\text{Ферма вида } F = \begin{pmatrix} -1 & e^T & e^T \\ e & A & B \\ e & B^T & -A^T \end{pmatrix} \text{ порядков } 3, 5, 17,$$

повторяющих первые три простых числа Ферма, здесь e — вектор из единиц (рис. 7).



■ Рис. 6. Моноциклы с каймой порядков 3, 7

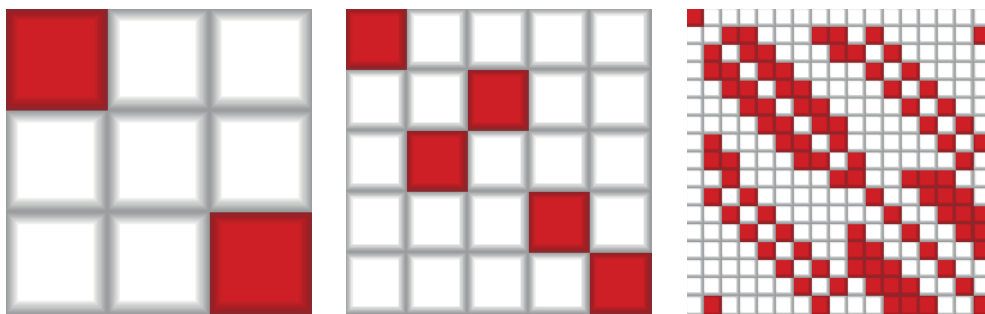
Простые числа Ферма — классические объекты теории чисел, известно всего пять таких чисел $F_k = 3, 5, 17, 257, 65\ 537$.

В 1796 г. Карл Фридрих Гаусс обнаружил неожиданную связь между ними и геометрическими фигурами, вписав в круг правильный семнадцатигульник и доказав более общее положение, что если число сторон правильного многоугольника равно простому числу Ферма, то его можно построить при помощи циркуля и линейки. Эта междисциплинарная связь глубока и может находить иные оригинальные проявления.

Гипотеза. Матрицы Ферма порядков простых чисел $n = F_k = 3, 5, 17, 257, 65\ 537, \dots$ — матрицы абсолютного максимума детерминанта, оцениваемого по формуле $F_{k-1}/(2F_k - 1)^{1/2} \times B$, где $B = (n - 1)^{(n-1)/2}(2n - 1)^{1/2}$ — оценка Гвидо Барбы [13] детерминанта сверху.

Матрицы Ферма [5] дополняются матрицами относительной простотой структуры нечетных порядков $4t + 1$, равных сумме квадратов ближайших (четное и нечетное числа) друг к другу чисел $n^B = q^2 + p^2$ при $p = q + 1$, выделенных Барбой [13]. За пределами этих двух семейств — орнаментальный хаос, отягощаемый предположением о его неограниченном усложнении (как у фракталов).

Часть матриц максимума детерминанта четных порядков $4t$ совмещают в себе качество быть экстремальными и ортогональными одновременно.



■ Рис. 7. Бициклические матрицы Ферма порядков 3, 5, 17

Прежде всего, это матрицы Адамара, которые, в отличие от вездесущих матриц Эйлера, к бициклам сводимы далеко не всегда. Бициклы максимума детерминанта иных четных порядков $4t - 2$ не ортогональны, но ортогонализуемы параметрически изменением одного из уровней от 1 до $-b$.

Узоры экстремального и ортогонального вариантов совпадают и описываются одинаковым набором орнаментальных инвариантов. Семейство неоднородно и распадается на два подсемейства Барбы четных порядков $n = n^B + 1$ и $n = 2n^B$ сложностью, не превосходящей сложность бицикла. Каждое имеет свое характеристическое уравнение и, соответственно, идентифицирующий семейство решений уровень $b = b(n)$.

Ортогонализуемый бицикл максимума детерминанта, по аналогии с основой (core) матриц Адамара, отличается превалярованием числа отрицательных элементов над положительными, поэтому его надо инвертировать либо оставить как есть, переписав характеристическое уравнение (3) к форме $(n - 2p + \lambda)b^2 - 2pab + \lambda a^2 = 0$ с учетом, что для его порядка $(n - 2(k_1 + k_2) + \lambda) = (n - 2p + \lambda)$, $2(k_1 + k_2 - \lambda) = 2p$, $p = k_1 + k_2 - \lambda = (n - 2)/4$. Его корни дают ортогональные матрицы с уровнем

$$b = \frac{p \pm \sqrt{p^2 - \lambda(n - 2p + \lambda)}}{n - 2p + \lambda} \text{ при } a = 1.$$

Семья Барбы 1. Порядки $n = n^B + 1 = 2(q^2 + q + 1) = 6, 14, 26, 42, 62, 86, 114, \dots$ разрешимы на $k_1 = q(q + 1)/2$, $k_2 = q(q - 1)/2$, где $q = k_1 - k_2$ — радиус окружности; $x^2 + y^2 = k_1 + k_2 = q^2$, $p = k_1 = (n - 2)/4$, $\lambda = k_2 = p - q$, $q^2 = k_1 + k_2 = k$, $n - 2p - \lambda = n - 2k_1 - k_2$, формула для уровня упрощается до зависимости $b = \frac{k_1 \pm \sqrt{k_2^2 - (n - 2k_1 - k_2)}}{n - 2k_1 - k_2}$ от параметров k_1, k_2 .

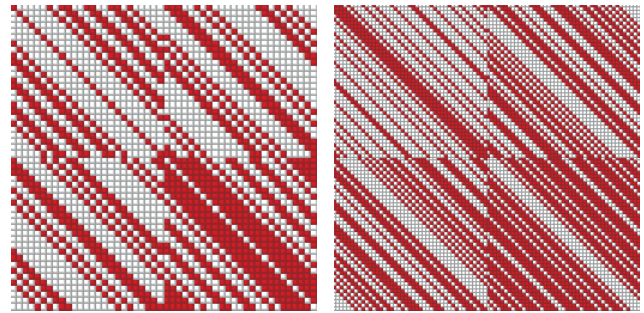
Матрица порядка 6 двоякосимметрична, в цепочке симметричных матриц 6, 14, 26, (не симметрична 42), 62, 86 порядок 86 предположительно последний симметричный.

Семья Барбы 2. Порядки $n = 2n^B = 2(2q^2 + 2q + 1) = 10, 26, 50, 82, 122, \dots$ разрешимы на $k_1 = k_2 = q^2$, где $\sqrt{2}q$ — радиус окружности; $x^2 + y^2 = 2q^2$, $x = y = q$, $\lambda = q^2 + q$, $p = q^2 - q = (n - 2)/4$, $q^2 = (k_1 + k_2)/2 = k/2$, формула для уровня указана выше.

Матрица 10 двоякосимметрична, в цепочке симметричных матриц 10, (не симметрична 26), 50 порядок 50 предположительно последний симметричный.

Симметричные ортогональные бициклы двух выделенных семейств порядков 50 и 86 изображены на рис. 8.

Матрицы Адамара совмещают качество быть ортогональными и целочисленными, а параметры бициклических матриц максимума детер-



■ Рис. 8. Симметричные ортогональные бициклы порядков 50, 86

минанта нужно «уводить» от целых значений, в остальном это одинаковые по содержанию матрицы, образующие на четных порядках семейства и существующие на них, в отличие от бициклов Эйлера, далеко не всегда.

Метод орбит

Динамические системы первого порядка в поле Галуа используются как генераторы первых строк бициклов. Метод орбит состоит в следующем. В обычном вещественном поле показательная функция (выход динамической системы) монотонно возрастает. В конечном поле $GF(p)$ рост функции заведомо ограничен теоремой Ферма $g^{p-1} = 1$, где g — элемент поля Галуа. Это напоминает поведение бильярдных шаров: динамика их несложна, но столкновения с бортом придают сложность движению.

В качестве примера поля Галуа рассмотрим набор целых чисел $0, 1, \dots, p - 1$ с умножениями по модулю p (простое число). Мультипликативная группа поля Галуа, обозначаемая как $GF^*(p)$, состоит из всех элементов поля, кроме 0. Необходимость введения подгрупп заключается в том, что показательная функция может закончиться единицей для степеней, меньшей, чем $p - 1$, но пропорциональной ей.

Пример. Рассмотрим подгруппы $GF^*(p)$ для $p = 11$ (таблица), разложение $p - 1 = 1 \times 2 \times 5 = 10$ указывает на размеры 1, 2, 5, 10 циклических подгрупп.

Элементы 2, 6, 7, 8 левого столбца таблицы называются *примитивными*, они порождают циклическую подгруппу максимальной длины, совпадающую с $GF^*(11)$. Такая орбита, как ее еще иногда называют, дает ортогональную циклическую матрицу (единичную) порядка 12 с элементами $a = 1, b = 0$, где элементы орбиты — адреса элемента b в первой строке, т. е. все 0, за исключением первой единицы. Вторая орбита (минимальной длины), отвечающая $g = 1$, дает ту же самую матрицу, если поменять значения ее элементов на противоположные и добавить циклический

■ Циклические подгруппы $GF^*(11)$

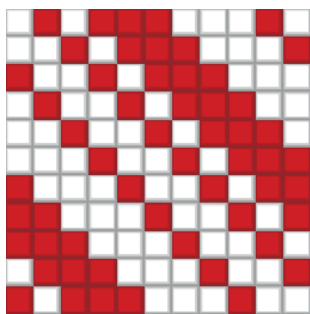
g	g^k
1	1
2	1, 2, 4, 8, 5, 10, 9, 7, 3, 6
3	1, 3, 9, 5, 4
4	1, 4, 5, 9, 3
5	1, 5, 3, 4, 9
6	1, 6, 3, 7, 9, 10, 5, 8, 4, 2
7	1, 7, 5, 2, 3, 10, 4, 6, 9, 8
8	1, 8, 9, 6, 4, 10, 3, 2, 5, 7
9	1, 9, 4, 3, 5
10	1, 10

сдвиг строк на один шаг назад. Есть еще бинарная матрица с двумя элементами. Такие матрицы отличаются сравнительно низким значением детерминанта (единица у единичной матрицы).

Орбита средней длины 5 из таблицы порождает ортогональную циклическую матрицу размера 11 с элементами $a = 1, -b$ (рис. 9). Если индексировать элементы с 0, то числа 1, 3, 4, 5, 9 отвечают положениям элемента $-b$, отличаемого цветом.

В данном случае для построения ортогонального моноцикла хватило одной орбиты. В теории мультипликативных групп принято выделять орбиты, называемые также *действием группы* на элемент t или множество элементов. Под действием подразумевается умножение t на элементы группы или подгруппы. Итог зависит от выбранного элемента. Например, если умножать единичный элемент $t = 1$ на группу, то итогом будет вся группа. А если умножать $t = 2$, то у этого числа иные продуктивные способности: в бесконечномерном случае оно порождает четные числа (идеал).

Вследствие умножения орбита перестает быть подгруппой. Содержательная сторона выделения орбит состоит в том, что циклические блоки размера p базируются на бинарных последователь-



■ Рис. 9. Циклическая ортогональная матрица

ностях элементов, причем адреса (индексы) элементов одного знака представляют собой, что особенно важно для матриц максимума детерминанта двух отмеченных выше семейств, совокупность частных орбит tg^k , включая тривиальную 0.

Заключение

Прибавление каймы к *всегда существующему вещественному бициклу Эйлера* приводит его, после коррекции уровней, к вещественной же матрице Мерсенна и далее — к *целочисленной* матрице Адамара, что создает предпосылку для доказательства существования всех матриц Адамара и указывает на ограничение ее сложности: любая матрица Адамара не сложнее бицикла с парной каймой.

В статье рассмотрен подход, раскрывающий разрешимость бициклов ортогональными матрицами не в пользу матриц Адамара, а в пользу матриц Эйлера соседних с ними четных порядков. Общий алгоритм дискретизации за два прохода переводит нецелочисленные матрицы Эйлера путем структурных дискретных преобразований (добавлением каймы) в целочисленные матрицы Адамара: матрицы Эйлера порождают, при их расширении каймой, матрицы Мерсенна, а матрицы Мерсенна являются строительными блоками матриц Адамара.

Поскольку матрицы Эйлера не стеснены требованием целочисленности, это позволяет по-новому взглянуть на проблему «недоказуемости» существования матриц Адамара комбинаторными методами. Перебором можно найти любой конечный орнамент, но нельзя гарантировать обязательность существования решения. В этом корень этой уже столетней проблемы. Заметим, что без использования иррациональных чисел ровно так же озадачивает вычисление длины гипотенузы прямоугольного треугольника с равными катетами.

Вещественные матрицы Эйлера выступают как «обычные» локально оптимальные по детерминанту матрицы. Разрешимость задачи поиска локального экстремума гарантируется общностью положения, никакой проблемы существования при этом не обнаруживается. Элементы матриц Эйлера — вещественные, в том числе рациональные и иррациональные, числа. Их теория никак не стеснена целочисленностью или рациональностью возможных решений. Они могут быть продуктом оптимизации детерминанта и впервые были получены итерациями как локально оптимальные по детерминанту матрицы.

Существующие на порядках с шагом 4 бициклы Эйлера, как антитеза известной гипотезе Райзера о существовании единственной матрицы Адамара (скалярный вариант не рассматриваем)

в форме моноцикла 4-го порядка, представляют собой законченное решение вопроса о гипотезе Адамара.

Обзоры и примеры найденных новых порядков матриц максимума детерминанта сосредоточены обычно на более простых четных порядках. Семейство матриц порядков, равных числам Ферма, выделено нами впервые. Оно дополняет матрицы нечетных порядков Барбы, более того,

это главное и единственное семейство, отличное от прочих как тем, что мы умеем его орнаменты строить, так и тем, что оно связано с теоремой Гаусса о семнадцатиугольнике.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ при проведении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2.2200.2017/ПЧ.

Литература

1. Балонин Н. А., Мироновский Л. А. Флип-метод определения сингулярных функций ганкелева оператора и оператора свертки // Автоматика и Телемеханика. 1999. № 11. С. 3–18.
2. Handbook of Combinatorial Designs. Ser. Discrete Mathematics and its Applications/ C. J. Colbourn (Ed.), J. H. Dinitz (Ed.). — London: Chapman and Hall/CRC, 2006. — 1000 p.
3. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы Мерсенна и Адамара // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1. С. 2–15. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.2
4. Hall M. A Survey of Difference Sets // Proc. Amer. Math. Soc. 1956. Vol. 7. P. 975–986.
5. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы локального максимума детерминанта // Информационно-управляющие системы. 2014. № 1. С. 2–15.
6. Hadamard J. Résolution d'une Question Relative aux Déterminants//Bulletin des Sciences Mathématiques. 1893. Vol. 17. P. 240–246.
7. Ryser H. J. Combinatorial Mathematics: The Carus Mathematical Monographs/ Published by the Mathematical Association of America. — N. Y.: John Wiley and Sons, 1963. N 14. — 162 p.
8. Williamson J. Hadamard's Determinant Theorem and the Sum of Four Squares // Duke Math. J. 1944. N 11. P. 65–81.
9. Doković D. Ž. Williamson Matrices of Order $4n$ for $n = 33; 35; 39$ // Discrete Math. 1993. Vol. 115. P. 267–271.
10. Holzmann W. H., Kharaghani H., Tayfeh-Rezaie B. Williamson Matrices up to Order 59 // Designs, Codes and Cryptography. 2008. N 46. P. 343–352.
11. Goethals J. M., and Seidel J. J. Orthogonal Matrices with Zero Diagonal // Canadian Journal of Mathematics. 1969. Vol. 19. P. 1001–1010.
12. Балонин Н. А., Джокович Д. Ж. Симметрия двуциклических матриц Адамара и периодические пары Голея // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3. С. 2–16. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.2
13. Barba G. Intorno al Teorema di Hadamard Sui Determinanti a Valore Massimo // Giorn. Mat. Battaglini. 1933. N 71. P. 70–86.

UDC 519.61:511-33

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.2

Ryser's Conjecture Expansion for Birculant Strictures and Hadamard Matrix Resolvability by Double-Border Bicycle Ornament

Balonin N. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, korbendfs@mail.ru

Sergeev M. B.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, mbse@mail.ru

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

Purpose: Our goal is to expand the border of critical orders for Ryser's conjecture from circulant to birculant structures of quasi-orthogonal matrices with two values (levels) of the entries, and to investigate the resolvability of birculant structures with one or two borders for the known types of column/row orthogonal matrices. **Results:** We have shown that orthogonal birculant Euler matrices with levels $a=1, -b$, where $b = \frac{t}{t + \sqrt{2t}}$, exist for all orders $n=4t-2$ and, with a border added, turn through an intermediate stage of

real Mersenne matrices into integer Hadamard matrices, defining thereby a matrix structure of minimum complexity resolvable for all possible orders they have determined. In other words, the Hadamard matrix conjecture (well known by its irresolvability by non-combinatorial methods) is proved now through an appeal to "matrix transitions" from real matrix types (not limited by the ban to have irrational entries) to integer Hadamard matrices with entries 1, -1. We have demonstrated that maximum determinant matrices of orders $n=4t-2$ are related to orthogonal birculant matrices. They are essentially different from Euler matrices because their birculant structure, as well as the structure of birculant Hadamard matrices, is not always resolvable for their corresponding orders. We have

also estimated the symmetry borders for various families of bicirculant maximum determinant matrices, including Hadamard matrices. **Practical relevance:** The algorithms of calculating bicirculant matrices have been used in developing research software. Matrices suboptimal by their determinant are the basis of Euler and Mersenne filters used for image compression and masking.

Keywords — Orthogonal Matrix, Circulant Matrix, Bicirculant Matrix, Ryser's Conjecture, Hadamard Conjecture, Hadamard Matrix, Mersenne Matrix, Euler Matrix.

References

1. Balonin N. A., Mironovskii L. A. Flip Method for Obtaining Singular Functions of Hankel Operators and Convolution Operators. *Avtomatika i Telemekhanika*, 1999, vol. 60, no. 12, part 2, pp. 3–18 (In Russian).
2. *Handbook of Combinatorial Designs*. Ser. Discrete Mathematics and its Applications. 2nd ed. / C. J. Colbourn (Ed.), J. H. Dinitz (Ed.). London, Chapman and Hall/CRC, 2006. 1000 p.
3. Balonin N. A., Sergeev M. B. Mersenne and Hadamard Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 1, pp. 2–15 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.2
4. Hall M. A Survey of Difference Sets. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 1956, vol. 7, pp. 975–986.
5. Balonin N. A., Sergeev M. B. Local Maximum Determinant Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 1, pp. 2–15 (In Russian).
6. Hadamard J. Résolution d'une Question Relative aux Déterminants. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 1893, vol. 17, pp. 240–246 (In French).
7. Ryser H. J. *Combinatorial Mathematics*. The Carus Mathematical Monographs. Published by the Mathematical Association of America, New York, John Wiley and Sons, 1963, no. 14. 162 p.
8. Williamson J. Hadamard's Determinant Theorem and the Sum of Four Squares. *Duke Math. J.*, 1944, vol. 11, pp. 65–81.
9. Doković D. Ž. Williamson Matrices of order $4n$ for $n=33;35;39$. *Discrete Math.*, 1993, vol. 115, pp. 267–271.
10. Holzmann W. H., Kharaghani H., Tayfeh-Rezaie B. Williamson Matrices up to Order 59. *Designs, Codes and Cryptography*, 2008, no. 46, pp. 343–352.
11. Goethals J. M., and Seidel J. J. Orthogonal Matrices with Zero Diagonal. *Canadian Journal of Mathematics*, 1969, vol. 19, pp. 1001–1010.
12. Balonin N. A., Djokovic D. Z. Symmetry of Two-Circulant Hadamard Matrices and Periodic Golay Pairs. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 3, pp. 2–16 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.2
13. Barba G. Intorno al Teorema di Hadamard sui Determinanti a Valore Massimo. *Giorn. Mat. Battaglini*, 1933, vol. 71, pp. 70–86 (In Italian).

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.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЗАДАЧИ СЖАТИЯ

И. В. Богачев^а, аспирант

А. В. Левенец^а, канд. техн. наук, доцент

Чье Ен Ун^а, доктор техн. наук, профессор

^аТихоокеанский государственный университет, Хабаровск, РФ

Введение: задача адаптивного сжатия подразумевает необходимость оперативного анализа (классификации) сжимаемых данных для выбора наиболее эффективного алгоритма сжатия и установки его оптимальных параметров. Классификации данных по функциональному признаку не учитывают особенностей сжатия измерительной информации, поэтому более эффективной следует считать классификацию данных по статистическим свойствам. **Цель исследования:** оценка перспектив алгоритмов сжатия, учитывающих статистические и автокорреляционные свойства телеметрических данных. **Результаты:** исследования гистограмм распределения как исходных данных, так и их разностного представления показывают, что большой динамический диапазон не позволяет удовлетворительно решить задачу сжатия нестационарных данных, однако для стационарных данных можно прогнозировать достаточно высокую эффективность сжатия. Результаты проведенных исследований одномерных и двумерных автокорреляционных функций разных типов телеметрических данных позволяют сделать вывод о том, что наиболее эффективными могут оказаться алгоритмы сжатия, в основе которых лежит учет корреляций как между отсчетами отдельного кадра телеметрии, так и между кадрами потока данных. Проведенные исследования показали, что наиболее перспективными можно считать алгоритмы, в основе которых лежит представление телеметрических кадров в разностно-битовом виде, а также учет особенности объединения данных от отдельных источников в телеметрические кадры. Предложены базовые принципы способа сжатия, основанного на повторном проведении операции дельта-кодирования над элементами анализируемых данных, которые соответствуют первой и второму максимуму одномерной автокорреляционной функции. В качестве дальнейшего развития способов сжатия телеметрических данных предлагается поиск однородных структур внутри телеметрического кадра.

Ключевые слова — телеметрические данные, автокорреляционная функция, классификация данных, сжатие данных, гистограмма распределения.

Введение

Все более глубокая информатизация и развитие промышленности приводят к значительному росту потоков данных в информационно-измерительных системах промышленных предприятий, что в свою очередь влечет за собой существенное увеличение стоимости таких систем, в частности, в силу необходимости либо аренды уже существующих, либо прокладки собственных высокоскоростных линий связи. Снижение таких затрат в первую очередь связывают с процедурами сжатия информационных потоков, а также с глубокой обработкой исходных данных в целях их анализа и выявления свойственных им признаков и закономерностей, что в дальнейшем может послужить основой для разработки новых, более эффективных алгоритмов сжатия.

Во многих отраслях промышленности телеметрические системы отвечают за решение таких важных и разноплановых задач, как сбор и обработка данных, осуществление управления как отдельными элементами, так и техническим объектом в целом и т. д. Тем не менее следует отметить, что до недавнего времени не уделялось особого внимания проблеме модернизации таких систем [1–6]. Более того, принципы обработки и сжатия информации даже в новых системах часто остаются неизменными фактически в течение

нескольких десятилетий. В первую очередь такое положение связано с ограничениями существующего подхода к сжатию данных телеметрии, согласно которому сжатию подвергаются данные от каждого источника по отдельности, без учета корреляционных взаимосвязей между самими источниками.

На настоящий момент можно выделить два подхода к классификации телеметрических данных: функциональный [7] и статистический [8, 9]. Суть функционального подхода заключается в анализе данных по их функциональному признаку. Этот способ предполагает, что телеметрические данные могут быть отнесены к одной из трех групп: телеуправлению, телесигнализации и телеизмерению. У такого подхода есть существенный недостаток, так как он учитывает только природу данных, не затрагивая их свойства, что приводит к серьезному ограничению по применению такой классификации для решения задач сжатия.

Другой подход основывается на анализе данных по их статистическим характеристикам, что более рационально. При этом ввиду широкого распространения разностного принципа как средства уменьшения динамического диапазона данных были подвергнуты исследованию как сами временные ряды, так и их разностное представление.

Такой подход, в отличие от функционального, позволяет произвести переход от анализа и классификации непосредственно к решению задачи сжатия, но его особенностью является то, что исследованию подлежали только временные ряды, полученные от одного источника данных, тогда как наиболее эффективным может оказаться подход, в основу которого положен анализ данных, объединенных в телеметрические кадры. В таком случае появляется возможность перехода от одномерных алгоритмов сжатия, учитывающих лишь особенности каждого отдельного потока данных, к двумерному сжатию, в основу которого может быть положен учет свойств телеметрических кадров, представляющих собой совокупность множества отдельных источников.

Структура анализируемых данных

В данной работе исследованию подверглись телеметрические кадры \mathbf{d} , а также их разностные формы $\Delta\mathbf{d}$, объединяющие m отсчетов данных, полученных от n датчиков, которые можно описать вектор-столбцами следующего вида:

$$\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_n)^T;$$

$$\Delta\mathbf{d} = (\Delta d_1, \Delta d_2, \dots, \Delta d_j, \dots, \Delta d_n)^T.$$

Предполагая, что телеметрические данные имеют разрядность k , каждый элемент d_i и Δd_i вектор-столбцов можно развернуть в виде битовых последовательностей, записав в виде вектор-строк \mathbf{b} и $\Delta\mathbf{b}$ соответственно размерности k :

$$d_i = \mathbf{b}_i = (b_{i,1}, b_{i,2}, \dots, b_{i,j}, \dots, b_{i,k});$$

$$\Delta d_i = \Delta\mathbf{b}_i = (\Delta b_{i,1}, \Delta b_{i,2}, \dots, \Delta b_{i,j}, \dots, \Delta b_{i,k}).$$

Таким образом, вектор-столбцы \mathbf{d} и $\Delta\mathbf{d}$ можно записать в виде матриц \mathbf{B} и $\Delta\mathbf{B}$ соответственно размерностью $n \times k$:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_j, \dots, \mathbf{b}_n)^T;$$

$$\Delta\mathbf{B} = (\Delta\mathbf{b}_1, \Delta\mathbf{b}_2, \dots, \Delta\mathbf{b}_j, \dots, \Delta\mathbf{b}_n)^T.$$

Такое рассмотрение данных позволит произвести статистический анализ не только между всей совокупностью кадров, но и между отдельными отсчетами одного кадра.

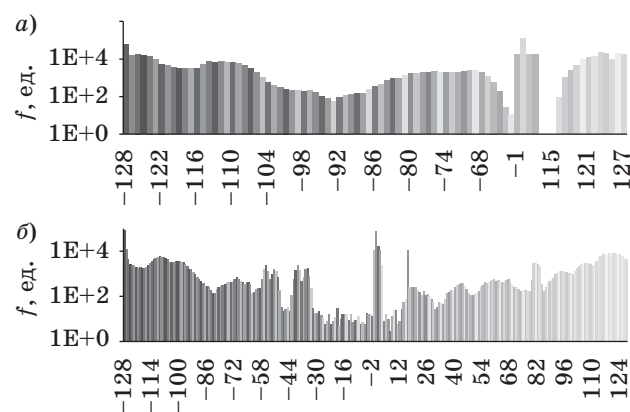
Для исследования использовалось пять наборов телеметрических данных, обладающих как стационарными, так и нестационарными свойствами, объем которых составлял от десяти до двадцати тысяч кадров. Кадр данных в рассмотренном случае представлял собой набор однобайтных отсчетов, причем для разных наборов данных кадры объединяли в себя разное число датчиков (от 32 до 56). Все телеметрические потоки условно предлагается разделить на

две группы: стационарные и нестационарные. Необходимость такого разделения вызвана делением по уровню сложности алгоритмов сжатия, так как чем менее стационарен поток, тем более сложный алгоритм сжатия позволит получить на нем приемлемую степень компрессии.

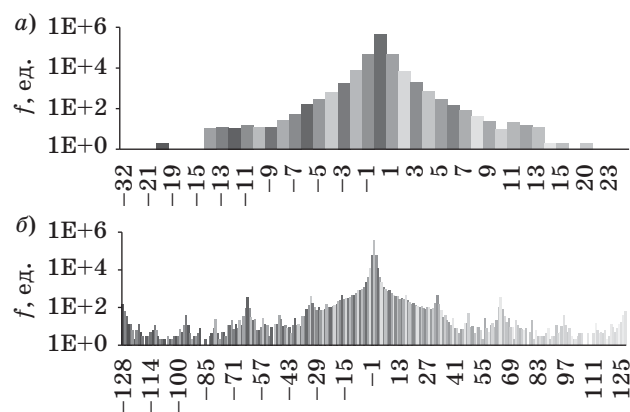
Анализ гистограмм распределения

Хорошее представление о свойствах сигнала, в частности о его динамическом диапазоне, стационарности, законе распределения и т. д., дает его гистограмма, что обуславливает ее применение для анализа свойств потока телеметрических кадров. На рис. 1 приведены типовые гистограммы для стационарных (рис. 1, а) и нестационарных (рис. 1, б) потоков телеметрических кадров, а на рис. 2, а и б — их разностные формы соответственно.

Проведенный по имеющимся данным анализ показывает, что как стационарный, так и нестационарный потоки кадров имеют достаточно ши-



■ Рис. 1. Гистограммы для стационарного (а) и нестационарного (б) потоков кадров



■ Рис. 2. Гистограммы для разностного эквивалента стационарного (а) и нестационарного (б) потоков кадров

рокий динамический диапазон данных, который все же меньше у стационарного потока. Для обоих случаев не характерна концентрация данных относительно какого-либо диапазона. Указанные свойства сохраняются и у разностного представления нестационарного потока кадров. Также у разностного ряда нестационарных данных может наблюдаться несколько локальных максимумов, хотя в целом соблюдается симметричность относительно некоторого центрального значения. В отличие от разностного представления нестационарного потока кадров, у разностного представления стационарного потока кадров динамический диапазон значительно уже, чем у исходного представления, и наблюдается концентрация данных относительно центрального значения.

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что ввиду большого динамического диапазона, приближенно сопоставимого с равномерным распределением, решение задачи сжатия нестационарных потоков не принесет особой пользы, что нельзя сказать относительно стационарного потока, для которого можно прогнозировать достаточно высокие коэффициенты сжатия.

Анализ автокорреляционных функций

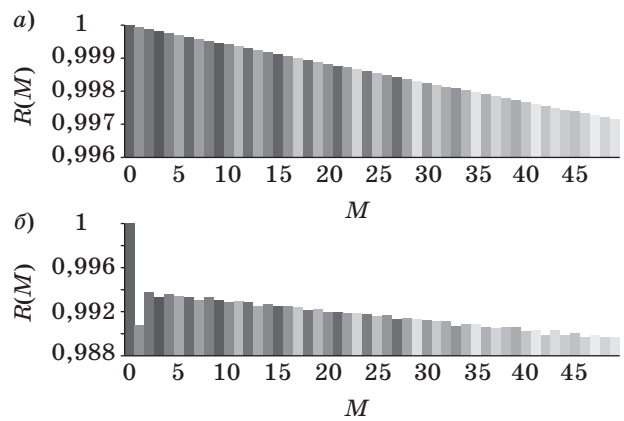
В общем случае, анализируя автокорреляционные функции (АКФ), можно выявить скрытые корреляции как между одними и теми же отсчетами в соседних кадрах (одномерная АКФ), так и между отсчетами внутри кадра (двумерная АКФ), что в свою очередь позволит не только проводить предварительную оценку возможности сжатия кадров, но и поможет выработать специальные методы сжатия, опирающиеся на корреляционные свойства данных.

Под одномерной автокорреляционной функцией (ОАКФ) понимается такая функция, которая определяет зависимость дискретного сигнала $d_j(h + M)$ в момент времени $h + M$ от того же сигнала $d_j(h)$ в момент времени h и рассчитывается согласно формуле [5]

$$R(M) = \sum_{h=1}^m d(h)d(h+M),$$

где M — аргумент ОАКФ, по которому проводится расчет АКФ по времени (в данном случае величина M не превышала значения 50).

Типовые ОАКФ для разностных представлений стационарных и нестационарных сигналов показаны на рис. 3, а и б. При этом исследовались также и исходные (не разностные) сигналы, но так как их ОАКФ имела тривиальный вид и по ней было невозможно определить принадлеж-



■ Рис. 3. ОАКФ для разностного эквивалента стационарного (а) и нестационарного (б) сигналов

ность к какому-либо классу, то их рассмотрение опущено.

Исходя из анализа представленных на рис. 3 результатов, можно сделать выводы о том, что независимо от стационарности и формы представления сигнала показатель автокорреляции носит убывающий характер, но при этом в случае разностного представления сигнала его значение в меньшей степени меняется с увеличением аргумента ОАКФ. Этот факт, наравне с тем, что в случае как стационарного, так и нестационарного сигнала в ходе их преобразования к разностному виду удается значительно увеличить показатель автокорреляции, доказывает эффективность применения разностного подхода как метода сжатия первого уровня, под которым понимается способ предварительной обработки данных, используемый в целях приведения их к виду, оптимальному с точки зрения сжатия тем или иным методом.

Важно отметить, что согласно полученным результатам для случая разностного представления нестационарного сигнала характерно то, что $R(1)$ не является вторым максимумом. Опираясь на это свойство, можно разработать методы сжатия, основанные на повторном проведении операции дельта-кодирования над разностным представлением первого и второго максимума ОАКФ анализируемых данных. Но такой метод пригоден лишь для архивирования данных в целях их длительного хранения и не подходит для сжатия данных, передаваемых по каналу связи, ввиду требования работы телеметрической системы в режиме реального или «мягкого» реального времени.

Относительно потока телеметрических кадров под двумерной автокорреляционной функцией (ДАКФ) понимается такая функция, которая определяет зависимость дискретного сигнала $d_j(h + M)$ не только в момент времени $h + M$ от того

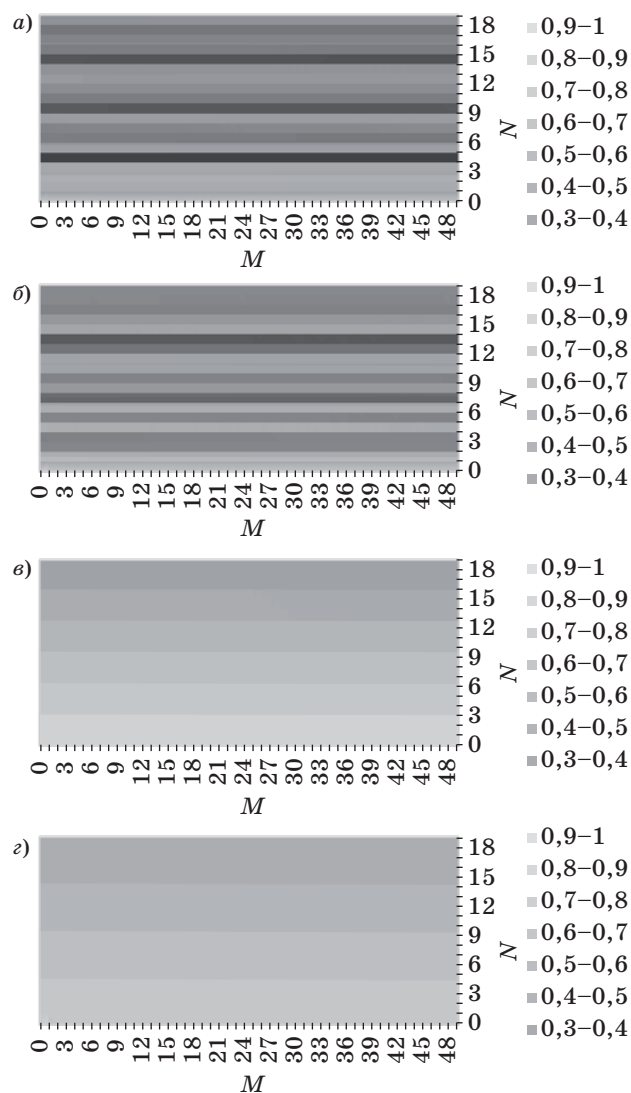
же сигнала $d_j(h)$ в момент времени h , но и между отсчетами, находящимися внутри одного кадра, и рассчитывается согласно формуле [10]

$$R(N, M) = \sum_{h=1}^n \sum_{l=1}^m d(h, l)d(h+N, l+M),$$

где N — аргумент ДАКФ, по которому проводился расчет АКФ по датчикам (N было ограничено числом датчиков); M — аргумент ДАКФ, по которому проводился расчет АКФ по времени (максимальное значение M , как и выше, не превышало 50).

Типовые ДАКФ, построенные относительно потока телеметрических кадров для стационарных и нестационарных сигналов, а также для их разностных представлений, показаны на рис. 4, *a–г*.

Анализируя данные, представленные на рис. 4, можно сделать вывод о том, что независимо от



■ Рис. 4. Типовые ДАКФ для стационарного (*a*) и нестационарного (*б*) потоков кадров и их разностных эквивалентов (*в*, *г*) соответственно

стационарности и формы представления потока телеметрических кадров практически полностью отсутствуют корреляции между отсчетами одного и того же кадра. При этом наблюдаются ярко выраженные корреляции между соседними отсчетами всего потока кадров, что делает невозможным построение алгоритма с использованием дельта-кодирования между отсчетами одного кадра. Исходя из вышесказанного, можно ввести оценку сжимаемости потока кадров на косвенном расчете его стационарности согласно следующей формуле:

$$Q = \left(\frac{\sum_{i=1}^n R_i(2)}{R_i(1)} \right) \frac{1}{n},$$

где Q — оценочная характеристика, косвенно показывающая степень стационарности кадра; n — число датчиков; $R_i(1)$ и $R_i(2)$ — значения соответственно первого и второго аргумента ОАКФ, полученные для i -го датчика.

Так, чем больше характеристика Q , тем в большей степени стационарен кадр, а, следовательно, наибольшую эффективность могут показать методы, изначально адаптированные для сжатия стационарных данных, и напротив, чем меньше характеристика Q , тем более эффективными могут оказаться методы сжатия, основанные на учете особенностей нестационарных кадров.

В результате такой оценки для предлагаемых наборов данных (НД) получены следующие значения: НД1 — 0,999; НД2 — 0,996; НД3 — 0,999; НД4 — 0,998; НД5 — 0,999. Видно, что наибольшее значение характеристика Q принимает для наборов НД1, НД3 и НД5, следовательно, на этих наборах может быть достигнут наибольший коэффициент сжатия с использованием алгоритмов, предназначенных для сжатия стационарных данных.

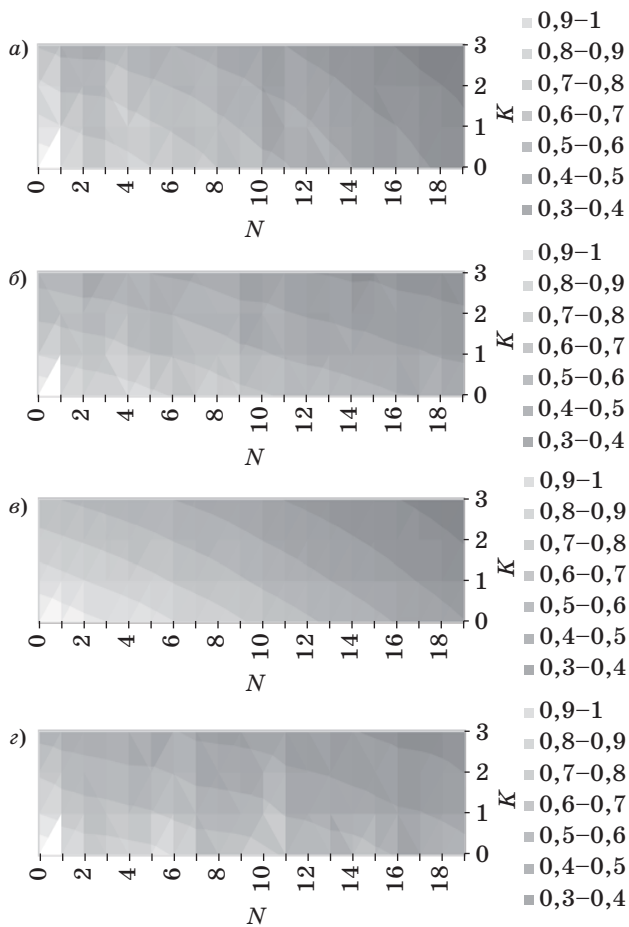
Относительно телеметрических кадров, представленных в битовом виде, под ДАКФ понимается такая функция, которая определяет зависимость между битами отсчетов внутри кадра и рассчитывается согласно следующей формуле [10]:

$$R(N, K) = \sum_{h=1}^n \sum_{l=1}^k B(h, l)B(h+N, l+K),$$

где K — аргумент ДАКФ, по которому проводился расчет АКФ по разрядам (K было ограничено разрядностью данных).

Типовые ДАКФ, построенные относительно телеметрических кадров, представленных в битовом виде для стационарных и нестационарных сигналов, а также для их разностных представлений, показаны на рис. 5, *a–г*.

Результаты, представленные на рис. 5, позволяют сделать вывод о том, что независимо от стационарности и формы представления кадров для



■ **Рис. 5.** Типовые ДАКФ для стационарного (а) и нестационарного (б) кадров в битовом виде и их разностных эквивалентов (в, з) соответственно

них характерна ярко выраженная автокорреляция как между разрядами одного отсчета, так и между разрядами всех отсчетов, объединенных

внутри кадра. При этом кадры, представленные в разностном виде, показывают наилучшую автокорреляцию. Это, в свою очередь, может стать основой для построения алгоритмов сжатия, учитывающих такую особенность. Как и в случае с анализом ДАКФ для потока кадров, наблюдается более яркая корреляционная зависимость для потока стационарных данных и для их разностных рядов.

В таком случае в виде простейшего метода сжатия можно предложить способ, основанный на поиске однородных зон внутри кадра. Под такими зонами понимаются скопления бит, значения которых принимают только одно из двух возможных состояний. В простейшем случае такие зоны можно ограничить прямоугольной областью. Эффективность использования такого подхода показана в работе [11].

Заключение

Проведенное исследование статистических свойств телеметрических данных показывает, что наибольшие перспективы с точки зрения задачи сжатия будут иметь те алгоритмы, в основе которых соблюдаются следующие условия:

- объединение разрозненных данных, полученных от отдельных источников, в телеметрические кадры;
- учет свойств одномерных и двумерных автокорреляционных функций;
- представление телеметрических кадров в разностно-битовом виде.

Выполнение этих трех условий может позволить разработать специализированные алгоритмы сжатия, преимуществом которых будет учет всех возможных корреляций как в потоке телеметрических кадров, так и между отсчетами каждого отдельного кадра.

Литература

1. Чичев С. И., Калинин В. Ф., Глинкин Е. И. Информационно-измерительная система электросетевой компании. — М.: Спектр, 2011. — 156 с.
2. Иванен Н. Т. Автоматизированные системы контроля и учета энергоресурсов на примере газовой отрасли: дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: СПбГУ, 2005. — 126 с.
3. Нечистяк М. М. Применение данных телеметрических систем для оптимизации затрат производства // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2011. № 5. С. 32–34.
4. Макарихин К. Б. и др. Система приема и обработки телеметрической информации, система контроля технологических параметров/ К. Б. Макарихин, А. А. Поляков, М. Г. Скрипкин, Н. В. Ушаков //

- Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2014. № 1. С. 59–63.
5. Влацкая И. В., Голубенко И. В., Голубенко Д. В. Автоматизированная система распознавания и классификации декодированных данных с глубоких блоков телеметрических систем // Перспективы развития информационных технологий. 2011. № 4. С. 109–113.
6. Лоскутов А. И., Патраков С. С., Шестопалова О. Л. Интеллектуальная информационно-диагностическая система оценивания технического состояния бортовой аппаратуры космических аппаратов при подготовке их к запуску // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2. С. 18–24.
7. Митюшкин К. Г. Телеконтроль и телеуправление в энергосистемах. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 286 с.

8. Юлин С. С., Паламарь И. Н. Метод классификации сигналов на основе спектрального анализа графа кластерного разбиения // Информационно-управляющие системы. 2015. № 2. С. 23–29. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.2.23
9. Левенец А. В. Классификация телемеханических данных и их разностных рядов с точки зрения задачи сжатия // Вестник ТОГУ. 2009. № 4. С. 71–80.
10. Липкин И. А. Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования. — М.: Вузовская книга, 2002. — 216 с.
11. Богачев И. В., Левенец А. В., Чье Ен Ун. Геометрический подход к сжатию данных телеметрических систем // Информатика и системы управления. 2015. № 4. С. 16–22.

UDC 004.627

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.11

Statistical Analysis of Telemetry Data for CompressionBogachev I. V.^a, Post-Graduate Student, ilya.bogachev@yahoo.comLevenets A. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, levalvi@bk.ruChye En Un^a, Dr. Sc., Tech., Professor, chye@ais.khstu.ru^aPacific National University, 136, Tikhookeanskaia St., 680035, Khabarovsk, Russian Federation

Introduction: The problem of adaptive compression implies the need for operational analysis (classification) of the compressed data in order to select the most efficient compression algorithm and set its optimal parameters. Classifying data by functional features does not take into account the compression of the measurement information, so classification on the base of statistical properties should be considered more appropriate. **Purpose:** We estimate the prospects of compression algorithms which take into account statistical and autocorrelation properties of telemetry data. **Results:** Studying the distribution histograms of the raw data and its differential view has shown that a large dynamic range does not allow you to efficiently solve the problem of non-stationary data compression, but for stationary data you can predict a sufficiently high compression efficiency. The studies of one-dimensional and two-dimensional autocorrelation functions of various telemetry data types suggest that the most efficient compression algorithms can be those which take into account the correlations between references of a single telemetry frame and between different frames of a data flow. The studies have shown that the most promising algorithms represent a telemetry frame in a difference-bit form, taking into account the way in which data from separate sources merge into telemetry frames. We proposed basic principles of a compression method based on repeated delta encoding of the analyzed data elements which correspond to the first and second maximum of a one-dimensional autocorrelation function. For further development of telemetry data compression methods, we suggest to search for homogeneous structures inside a telemetry frame.

Keywords — Telemetry Data, Autocorrelation Function, Data Classification, Data Compression, Distribution Histogram.

Reference

- Chichev S. I., Kalinin V. F., Glinkin E. I. *Informatsionno-izmeritel'naiia sistema elektrossetvoi kompanii* [Information-Measuring System in the Power Grid Companies]. Moscow, Spektr Publ., 2011. 156 p. (In Russian).
- Ivanen N. T. *Avtomatizirovannye sistemy kontroliia i ucheta energoresursov na primere gazovoi otrasli*. Dis. kand. tekhn. nauk [Automated System of Control and Metering of Energy Resources on The Example of the Gas Industry. PhD tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, SPbGU Publ., 2005. 126 p. (In Russian).
- Nechistyak M. M. Application of Telemetric Systems Data to Optimize Productions Costs. *Avtomatizatsiia, telemekhanizatsiia i sviaz' v nefianoi promyshlennosti*, 2011, no. 5, pp. 32–34 (In Russian).
- Makarikhin K. B., Polyakov A. A., Skripkin M. G., Ushakov N. V. The System of Receiving and Processing of Telemetry Data, the System of Technological Parameters Control. *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina*, 2014, no. 1, pp. 59–63 (In Russian).
- Vlatskaia I. V., Golubenko I. V., Golubenko D. V. Automated System of Recognition and Classification of the Decoded Data from Depth Units of Telemetric Systems. *Perspektivy razvitiia informatsionnykh tekhnologii*, 2011, no. 4, pp. 109–113 (In Russian).
- Loskutov A. I., Patrakov S. S., Schestopalova O. L. Intellectual Information-Diagnostic System for Evaluating Technical Condition of Space Vehicles Onboard Equipment during Pre-Launching Activities. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 2, pp. 18–24 (In Russian).
- Mitiushkin K. G. *Telekontrol' i teleupravlenie v energosistemakh* [Telemonitoring and Telecontrol in Power Systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 286 p. (In Russian).
- Yulin S. S., Palamar I. N. The Method of Time-Series Classification Based on Spectral Analysis of Self-Organizing Map. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 2, pp. 23–29 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.2.23
- Levenets A. V. Classification of Telemechanical Data and Their Difference Rows from the Standpoint of Compression. *Vestnik TOGU*, 2009, no. 4, pp. 71–80 (In Russian).
- Lipkin I. A. *Staticheskaiia radiotekhnika. Teoriia informatsii i kodirovaniia* [Statistical Radio Engineering. The Theory of the Information and Coding]. Moscow, Vuzovskaia kniga Publ., 2002. 216 p. (In Russian).
- Bogachev I. V., Levenets A. V., Chye E. U. Geometrical Approach to Data Compression of Telemetry Systems. *Informatika i sistemy upravleniia*, 2015, no. 4, pp. 16–22 (In Russian).

АНАЛИТИКО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ СЕТЕЙ С ТОПОЛОГИЕЙ MESH

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

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

Постановка проблемы: высокий потенциал технологии беспроводных телекоммуникационных сетей с топологией mesh делает актуальной задачу моделирования таких mesh-сетей в целях оценки качества их функционирования. Самоорганизующаяся архитектура обеспечивает живучесть mesh-сети, т. е. выполнение основных функций по доставке данных при потере отдельных элементов сети. **Цель:** разработка аналитико-статистической модели оценки живучести телекоммуникационных сетей с топологией mesh. **Результаты:** предложена имитационная модель, реализующая аналитико-статистический подход к оценке живучести телекоммуникационной сети с топологией mesh, где количественным показателем выбрана вероятность установления соединения, а качественным показателем — предоставление связи абонентам сети в течение заданного интервала времени, начиная с момента поступления вызова. Учитывая условия, соответствующие реальному процессу установления соединения в mesh-сети: динамическую маршрутизацию, скачки сетевой нагрузки, потерю отдельных элементов сети, — разработанная модель позволяет оценить время установления соединения и в зависимости от полученного результата выполнить подбор технических параметров для обеспечения допустимого времени установления соединения при соблюдении вероятности гарантированной доставки вызова. **Практическая значимость:** модель может найти применение при построении mesh-сетей с заданными характеристиками качества функционирования.

Ключевые слова — беспроводные телекоммуникационные сети, топология mesh, живучесть сети, установление соединения в сети, транзит, виртуальный канал, статистическое моделирование, имитационная модель, эксперимент на модели.

Введение

Развитие технологий беспроводной передачи данных повлияло в настоящее время на распространение телекоммуникационных сетей с топологией mesh (англ. *mesh* — петля, ячейка сети, отверстие сита), или mesh-сетей [1].

Mesh-сеть — это телекоммуникационная сеть с децентрализованным управлением, в которой беспроводные устройства объединяются многочисленными соединениями, образующими ячеистую топологию. Отличительной особенностью mesh-сети является самоорганизующаяся архитектура, что позволяет реализовать следующие возможности [2]:

- создание зон сплошного информационного покрытия большой площади;
- масштабируемость сети, т. е. увеличение площади зоны покрытия и плотности информационных потоков в режиме самоорганизации;
- использование беспроводных транспортных каналов для связи точек доступа в режиме «каждый с каждым»;
- устойчивость сети к потере отдельных элементов.

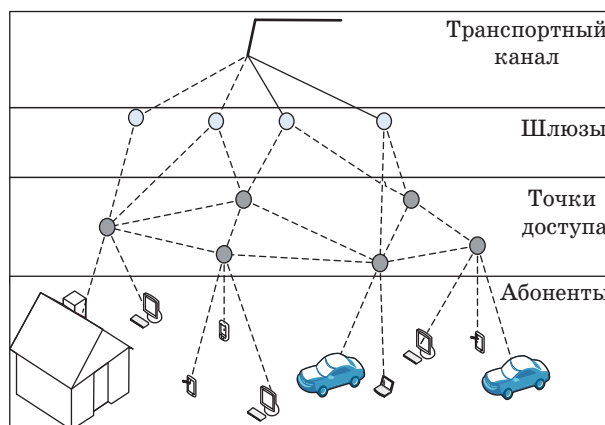
Эти возможности обеспечивают живучесть mesh-сетей. Также немаловажным фактором, обусловившим их быстрое распространение, является стоимость развертывания mesh-сетей, которая может быть значительно меньше стоимости традиционных проводных сетей, поскольку для

этого не требуется наличие дорогостоящей инфраструктуры и прокладка кабеля.

Высокий потенциал технологии, который отмечают специалисты, делает актуальной задачу моделирования mesh-сетей в целях оценки их живучести и производительности.

Общая характеристика mesh-сетей

Общий вид структурной организации mesh-сети показан на рис. 1. Сеть строится как совокупность кластеров, на которые разделяется



■ **Рис. 1.** Общий вид структурной организации mesh-сети: ----- — проводной канал связи; ————— — беспроводной канал связи

территория покрытия, количество кластеров теоретически не ограничено. В одном кластере размещается от восьми до 16 узловых точек доступа. Одна из таких точек является шлюзом [3] и подключается к магистральному информационному каналу с помощью оптического либо электрического кабеля или по радиоканалу с использованием систем широкополосного доступа.

Точки доступа в кластере соединяются между собой по радиоканалу. В зависимости от конкретного решения точки доступа могут выполнять либо функции только маршрутизатора для других узлов сети, либо функции маршрутизатора и абонентской точки доступа. Протоколы, реализующие функции транспортировки в mesh-сети, основаны на создании таблицы абонентов сети с контролем состояния транспортного канала и поддержкой динамической маршрутизации, что позволяет каждой точке доступа отправлять трафик по оптимальному маршруту между соседними точками [4]. При отказе какой-либо из них происходит автоматическое перенаправление трафика по другому маршруту, что гарантирует не просто доставку трафика адресату, а доставку за минимальное время. В условиях резких скачков нагрузки как внутри сети, так и на ее границах перераспределение трафика может решаться установкой новых точек доступа в пределах кластера, интеграция которых в существующую сеть происходит автоматически. Добавлением в сеть новых маршрутизаторов увеличивают зону покрытия. Таким образом выполняется масштабирование mesh-сети.

Недостаток mesh-сетей заключается в том, что использование промежуточных узловых точек может вызвать недопустимую задержку передачи данных и, как следствие, снизить качество трафика реального времени, например речи или видео. Вследствие этого существуют ограничения на количество точек доступа в одном кластере.

В статье предлагается аналитико-статистический подход к оценке живучести mesh-сети. Живучесть сети обеспечивается установлением соединения между узловыми точками, несмотря на отказы отдельных элементов сети [5]. Предлагаемая модель позволяет оценить время установления соединения и благодаря этому выполнить подбор необходимых технических параметров для обеспечения допустимого времени установления соединения при соблюдении вероятности гарантированной доставки вызова. Модель позволяет учесть динамическую маршрутизацию, скачки сетевой нагрузки, потерю отдельных элементов сети, — те условия, которые соответствуют реальному процессу установления соединения в mesh-сети.

Модель оценки живучести mesh-сети

Установление требуемого соединения в сети, несмотря на отказы отдельных ее элементов, позволяет сохранять работоспособность, т. е. обеспечивает живучесть. Для оценки живучести телекоммуникационной сети с топологией mesh количественным показателем может служить вероятность установления соединения при поступлении соответствующего вызова [6]. На качественном уровне живучесть отражает возможность сети предоставлять связь абонентам в течение заданного интервала времени, начиная с момента поступления вызова. В основном эта характеристика зависит от принятой системы назначения маршрутов и плотности информационных потоков [7].

Процесс установления соединения — это прохождение вызова от источника к адресату по одному из множества альтернативных маршрутов, каждый из которых представляет собой виртуальный канал (ВК), построенный для последующей передачи по нему данных. Виртуальный канал состоит из транзитов (каналов), связывающих узловые точки и входящих в данный маршрут [8]. При прохождении вызова от одной узловой точки к другой транзит принимает одно из двух состояний: либо «1» — транзит занят, и вызов по нему не пройдет, либо «0» — транзит имеет канал требуемой скорости, и вызов по нему пройдет.

Повторные попытки установления соединения придают стохастичность этому процессу, так как возникают вынужденные возвращения на предыдущие узловые точки, и число транзитов, пройденных вызовом при его доставке адресату, оказывается случайным числом. Учет данного аспекта позволяет прибегнуть к имитационному моделированию для определения факта установления соединения [9].

Таким образом, время установления соединения $t_{уст}$ определим как случайную величину, которая может быть найдена выражением

$$t_{уст} = \sum_{i=1}^{n_{тр}} t_{тр_i} + \sum_{i=1}^{n_{о.тр}} t_{о.тр_i} + n_{п} t_{п}, \quad (1)$$

где $n_{тр}$ — число транзитов ВК, построенного от источника к адресату; $t_{тр_i}$ — время прохождения i -го транзита; $n_{о.тр}$ — число транзитов, на которые вызов вернулся обратно при поиске альтернативного маршрута; $t_{о.тр_i}$ — время обратного прохождения i -го транзита; $n_{п}$ — число попыток в зафиксированной реализации процесса установления соединения, в общем случае $0 \leq n_{п} < n_{доп}$, где $n_{доп}$ — допустимое число попыток при установлении соединения; $t_{п}$ — время переключения на другой маршрут (на повторную попытку).

Каждый эксперимент на имитационной модели дает реализацию трех случайных величин: $n_{тр}$, $n_{о.тр}$ и $n_{п}$, — что позволяет оценить время доставки вызова $t_{уст}$ в соответствии с выражением (1). Полученное значение $t_{уст}$ определяет результат установления соединения:

- если $t_{уст} \leq t_{доп}$, то соединение установлено;
- если $t_{уст} > t_{доп}$, то соединение установлено, но за время, превышающее допустимое, и для данных срочной доставки это имеет критическое значение, так как они могли потерять свою актуальность [10];

- если $n_{п} > n_{доп}$, то соединение не установлено.

Исходными данными для моделирования являются:

1) структурная и потоковая метрики:

- множество альтернативных ВК с характеристикой транзитов, составляющих каждый ВК: время передачи вызова по транзиту в прямом и обратном направлениях;
- значения вероятностей полной занятости транзитов;

2) ограничения, при которых должно выполняться соединение:

- допустимое время установления соединения;
- число попыток установления соединения;
- время, выделенное на повторную попытку, — переключение на другой ВК.

Имитационная модель накапливает статистики, позволяющие оценить вероятность установления соединения за время, не превышающее допустимое, а также средние и среднеквадратические значения $t_{уст}$, характеризующие процесс установления соединения в mesh-сети.

Особенности реализации имитационной модели установления соединения в mesh-сети

На всем множестве виртуальных каналов, соединяющих источник i и адресата j , производится расслоение по числу занятых транзитов c ($c = c_{min}, \dots, c_{max}$). В отдельном эксперименте разыгрывается число c номеров занятых транзитов во множестве ВК $_{ij}$, и на полученной реализации ВК $_{ij}$ имитируется процесс доставки вызова адресату. По факту доставки вызова фиксируются значения $n_{тр}$, $n_{о.тр}$ и $n_{п}$. Процедура повторяется N раз. По результатам экспериментов вычисляются необходимые статистики.

Реализация количества занятых транзитов c сводится к «выбору наугад» номеров транзитов из d возможных. Очередной номер занятого транзита z определяется по формуле $z = \lceil Ud + 1 \rceil$, где U — случайное число, $U \in [0, 1]$, получаемое путем обращения к датчику случайных чисел. Скобки $\lceil \cdot \rceil$ означают округление в меньшую сторону. Транзиту c номером z присваивается «1»

во множестве альтернативных маршрутов ВК $_{ij}$. Процедура определения z повторяется s раз.

Задача расчета характеристик установления соединения может быть сведена к задаче оценивания математического ожидания $M\xi$ случайной величины $\xi = f(\alpha)$, причем $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_d)$ имеет закон распределения вероятностей p (т. е. $\alpha \sim p$), который известен. В данной задаче $\xi \in \{0, 1\}$, $\xi = 0$ соответствует установлению соединения, $\xi = 1$ — неустановлению соединения. Значение $M\xi = P\{\xi = 1\}$ имеет смысл вероятности неустановления соединения. Случайная величина ξ невырожденная, т. е. $0 < M\xi < 1$.

Интерпретируем случайную величину α как вектор $\alpha = (\alpha_1^v, \dots, \alpha_d^v)$, отображающий состояние транзитов, входящих в моделируемое множество альтернативных маршрутов в смысле наличия или отсутствия свободных транзитов. Случайная величина $\alpha_i^v \in \{0, 1\}$, $i = \overline{1, d}$, d — число транзитов в моделируемом множестве ВК $_{ij}$. Значение $\alpha_i^v = 1$ имеет смысл отсутствия свободных каналов со скоростью v в i -м транзите. Случайные величины α_i^v считаются независимыми, α имеет конечное множество значений $\alpha \in X$, $X = \{x_j; j = \overline{1, n}; n = 2^d\}$. Для нее распределение $\rho(x)$, $x \in X$ задается набором вероятностей $p(x_j) = P\{\alpha = x_j\} = p_j \geq 0$, $j = \overline{1, n}$. С учетом расслоения по c оценку $M\xi$ найдем в виде

$$\tilde{M}\xi = \sum_{c_{min}}^{c_{max}} M\xi(c), \quad (2)$$

где $\tilde{M}\xi$ — оценка вероятности неустановления соединения при наличии c транзитов, не проводящих вызов.

Оценка $\tilde{M}\xi$ находится методом равнозвешенного моделирования [2].

Для задания состояний ВК $_{ij}(c)$ на k -м розыгрыше применяем случайный выбор номеров не проводящих транзитов c . В результате вектор α получает конкретную реализацию x , содержащую c единиц и $(d - c)$ нулей. В соответствии с правилом прохождения вызова по множеству альтернативных путей ВК $_{ij}$ и правилом установления соединения вычисляется значение

$$\xi(x|c)_k = f[\text{ВК}_{ij}^k],$$

где $\xi(x|c)_k$ — исход доставки (недоставки) вызова при k -м испытании (k -й реализации ВК $_{ij}$), $\xi(x|c)_k \in [0, 1]$, и вероятность полученной реализации

$$p(x) = p[\text{ВК}_{ij}^{(k)}].$$

Значение $\xi(x|c)_k = 1$ имеет место, если вызов не дошел до адресата (все ВК из множества альтернативных маршрутов оказались непродвигавшимися).

ми), либо число попыток превысило допустимое значение, либо вызов дошел до адресата и установлено соединение, но за время $t_{уст} > t_{доп}$.

Оценка вероятности неустановления соединения между парой станций (i, j) при c непроводящих транзитах во множестве всех $ВК_{ij}^{(k)}$ определяется в виде

$$\tilde{M}\xi(c) = \frac{C_d^c}{N_{2c}} \sum_{k=1}^{N_{2c}} p(ВК_{ij}^{(k)} | \xi(x|c) = 1),$$

где N_c — число разыгранных состояний (реализаций) множества $ВК_{ij}$.

Вероятность $p(ВК_{ij}^{(k)})$ рассчитывается по формуле

$$p(ВК_{ij}^{(k)}) = \prod_{i=1}^h p(\alpha_i = 1) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{d-h} [1 - p(\alpha_i = 1)].$$

Вероятности $p(\alpha_i = 1), i = \overline{1, d}$ заданы при решении задачи распределения потоков.

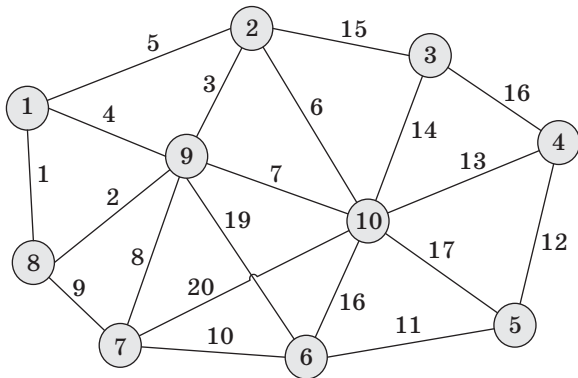
Окончательная оценка вероятности неустановления соединения между парой станций (i, j) примет вид

$$\tilde{M}\xi = \sum_{c=c_{\min}}^{c_{\max}} \frac{C_d^c}{N_c} \sum_{k=1}^{N_c} p(ВК_{ij}^{(k)} | \xi(x|c) = 1). \quad (3)$$

Таким образом, выражение (3) полностью отражает вероятностный подход к определению живучести mesh-сети.

Эксперимент на модели

Представим некоторые результаты проведенного эксперимента на модели, демонстрирующие возможности предлагаемой аналитико-статистической модели оценки живучести сетей с топологией mesh. Эксперимент проведен на сети, топологическая структура которой показана на рис. 2.



■ Рис. 2. Топология mesh-сети

Заданы следующие параметры, характеризующие узловые точки и каналы связи:

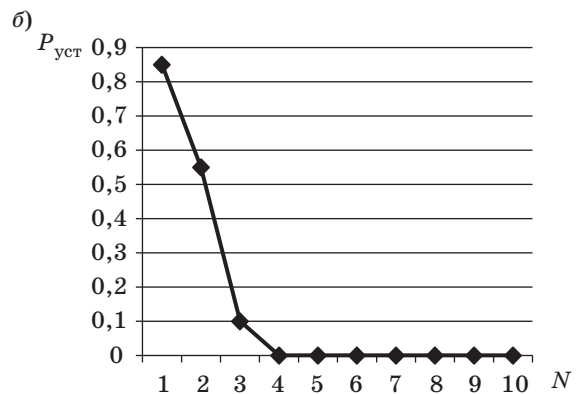
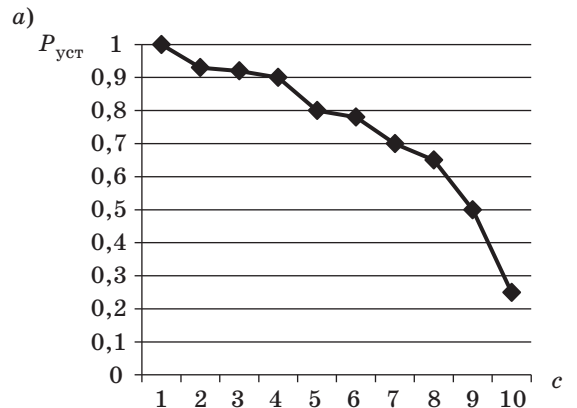
- вероятность отказа узловой точки — 10^{-3} ;
- пропускная способность канала связи — 9600 бод;
- вероятность отказа канала связи — $5 \cdot 10^{-3}$;
- время прохождения i -го транзита $t_{тр_i}$ — 0,5 мс;
- время прохождения i -го транзита в режиме «обратной волны» $t_{о.тр_i}$ — 0,7 мс;
- время переключения на другой маршрут $t_{п}$ — 10^{-2} мс;
- допустимое время на установление соединения $t_{доп}$ — 50 мс;
- количество экспериментов — 100.

Построим зависимости вероятности установления соединения $P_{уст}$ и времени установления соединения $\bar{t}_{уст}$ от количества:

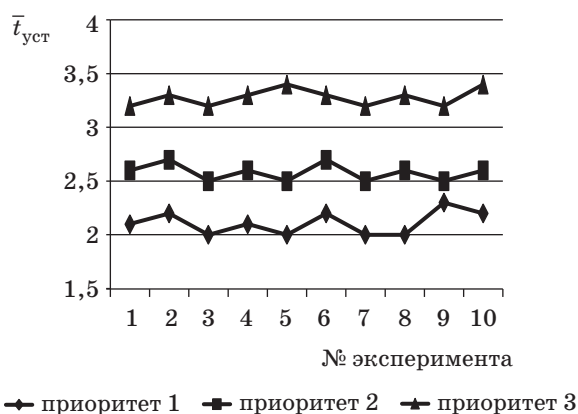
- закрытых транзитов c ;
- закрытых узловых точек N ;
- попыток $n_{п}$.

Собранные в результате моделирования статистики позволяют построить важные зависимости, характеризующие живучесть mesh-сети.

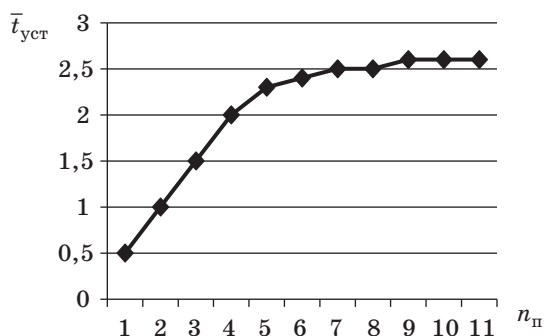
Зависимости вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов и от числа закрытых узловых точек представлены



■ Рис. 3. Зависимость вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов (а) и закрытых узловых точек (б)



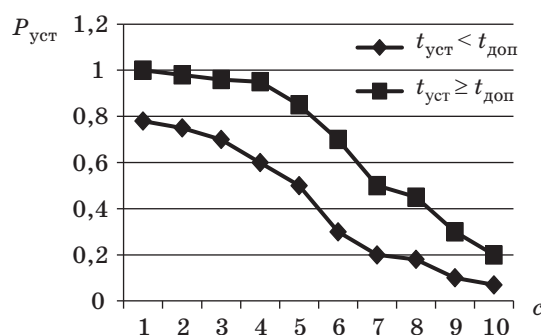
■ Рис. 4. Зависимость времени установления соединения от приоритета отправки вызова



■ Рис. 5. Зависимость времени установления соединения от количества попыток поиска альтернативного маршрута

на рис. 3, а и б соответственно, результаты получены при $n_{п} = 3$ и $c = 3$. Очевидно, что вероятность установления соединения снижается с увеличением количества неработоспособных транзитов и узловых точек. Таким образом, из множества альтернативных маршрутов необходимо выбрать тот, который гарантирует установление соединения за допустимое время. Для этого администратору надо изменить приоритет отправки. В имитационной модели такая возможность предусмотрена. На рис. 4 приведен пример того, что для различных приоритетов отправки время доставки вызова будет разным. Естественно, что при установлении соединения необходимо выстраивать оптимальный маршрут, но если он занят или не работает, то необходимо иметь возможность назначить другой маршрут, может быть, худший по времени, но с гарантией установления соединения.

Зависимость времени установления соединения от количества попыток приведена на рис. 5. Очевидно, что чем больше возможностей на повторный поиск альтернативных маршрутов, тем больше значение $\bar{t}_{уст}$. Однако при количестве



■ Рис. 6. Зависимость вероятности и условной вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов

отказавших транзитов, равном трем, увеличение количества рестартов уже не влияет на время доставки, так как, видимо, такое количество рестартов достаточно, чтобы найти альтернативный путь доставки пакета. Такая возможность, представленная в имитационной модели, позволяет определить количество необходимых попыток при известном количестве потерянных элементов сети.

В модели также предусмотрена возможность менять допустимое время доставки вызова, и по результатам эксперимента рекомендовать его значение при соблюдении требуемой вероятности установления соединения. Для некоторых видов трафика такая характеристика имеет большое значение, и имитационная модель позволяет оценить условную вероятность (вероятность установления соединения при условии, что время доставки меньше допустимого). Графики на рис. 6 показывают зависимость вероятности и условной вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов.

Заключение

Предложенная вероятностная модель установления соединения между источником и адресатом в mesh-сети является инструментом, с помощью которого можно решать задачу оценки живучести сети. Модель позволяет определить время установления соединения при известной топологии сети. Также для обеспечения допустимого времени установления соединения при соблюдении вероятности гарантированной доставки вызова модель дает возможность определить технические параметры mesh-сети. В модели учтены условия, соответствующие реальному процессу установления соединения: наличие неработоспособных каналов и точек доступа, ограниченное количество повторных попыток установления соединений, наличие альтернативных маршрутов.

Литература

1. Вишнеvский В. В., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия Wi-Max. Путь к 4G. — М.: Техносфера, 2009. — 471 с.
2. Осипов И. Е. Mesh-сети: технологии, приложения, оборудование// Технологии и средства связи. 2006. № 4. С. 38–45.
3. 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
4. Кутузов О. И., Сергеев В. Г., Татарникова Т. М. Коммутаторы в корпоративных сетях. Моделирование и расчет. — СПб.: Судостроение, 2003. — 170 с.
5. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Golubev I. Y. Optimization and the Process of Task Distribution between Computer System Clusters//Automatic Control and Computer Sciences. 2012. N 3. P. 103–111.
6. Татарникова Т. М., Яготинцева Н. В. Оценка функциональной надежности корабельной сети передачи данных//Известия вузов. Приборостроение. Т. 57. 2014. № 9. С. 62–66.
7. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. — СПб.: Питер, 2016. — 992 с.
8. Tanenbaum A., Wetherall D. Computer Networks. 5th ed. — Prentice Hall, 2010. — 960 p.
9. Кутузов О. И., Татарникова Т. М. Моделирование систем и сетей телекоммуникаций: учеб. пособие. — СПб.: РГГМУ, 2012. — 134 с.
10. Богатырев В. А., Богатырев А. В., Богатырев С. В. Оценка надежности выполнения кластерами запросов реального времени//Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 4. С. 46–48.

UDC 004.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.17

Analytical-Statistical Model of Mesh Network Survivability Evaluation

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

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

Introduction: Modeling wireless telecommunication networks with mesh topology in order to assess the quality of their operation is an important problem. Self-organizing architecture provides the survivability of a mesh network, making sure that the basic functions of data delivery are still supported even when individual network elements are lost. **Purpose:** The goal is to develop an analytical-statistical model to assess the survivability of telecommunication networks with mesh topology. **Results:** A simulation model is proposed which implements an analytical-statistical approach to the assessment of survivability of a telecommunication network with mesh topology. The quantitative criterion is the connection establishment probability, and the qualitative criterion is providing the network to the subscribers within a given time interval starting from the moment the call was received. Taking into account the real conditions in a mesh network (dynamic routing, abrupt changes in the network load, loss of individual network elements), the proposed model allows you to estimate the time of connection establishment and, depending on the result, to choose technical parameters in order to provide an acceptable connection establishment time and a certain probability of guaranteed call delivery. **Practical relevance:** The model can be used to build mesh networks with specified characteristics of their functioning quality.

Keywords — Wireless Telecommunication Networks, Mesh Topology, Network Survivability, Network Connection, Transit, Virtual Channel, Statistical Modeling, Simulation Model, Model Experiment.

References

1. Vishnevskij V. V., Portnoj S. L., Shahnovich I. V. *Entsiklopediia Wi-Max. Put' k 4G* [Encyclopedia of Wi-Max. Path to 4G]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2009. 471 p. (In Russian).
2. Osipov I. E. Mesh-Networks: Technology, Applications, Equipment. *Tekhnologii i sredstva svyazi*, 2006, no. 4, pp. 38–45 (In Russian).
3. 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
4. Kutuzov O. I., Sergeev V. G., Tatarnikova T. M. *Kommutatory v korporativnykh setiakh. Modelirovanie i raschet* [Switches in Corporate Networks. Modeling and Calculation]. Saint-Petersburg, Sudostroenie Publ., 2003. 170 p. (In Russian).
5. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Golubev I. Y. Optimization and the Process of Task Distribution between Computer System Clusters. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2012, no. 3, pp. 103–111.
6. Tatarnikova T. M., Yagotintseva N. V. Evaluation of Functional Reliability of Shipboard Network. *Izvestiia vuzov. Priboroostroenie*, 2014, no. 9, pp. 62–66 (In Russian).
7. Olfier V., Olfier N. *Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly* [Computer Networks. Principles, Technologies, Protocols]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2016. 992 p. (In Russian).
8. Tanenbaum A., Wetherall D. *Computer Networks*. 5th ed. Prentice Hall, 2010. 960 p.
9. Kutuzov O. I., Tatarnikova T. M. *Modelirovanie sistem i setei telekommunikatsii* [Simulation of Systems and Telecommunications Networks]. Saint-Petersburg, RGGMU Publ., 2012. 134 p. (In Russian).
10. Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V. Evaluation of Reliability Performance Cluster Real-Time Query. *Izvestiia vuzov. Priboroostroenie*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 46–48 (In Russian).

УДК 621.396.946

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.23

МОДЕЛЬ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ КОМАНДНО-ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ С ФОРМИРОВАНИЕМ МАРШРУТА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ПОМЕХОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАДИОКАНАЛ

А. В. Харченко^а, доктор техн. наук, доцент

И. А. Ушаков^а, адъюнкт

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

Введение: при решении задач управления космическими аппаратами сетевые технологии реализуются в наземно-космических командно-информационных сетях и обладают существенными преимуществами перед технологиями, используемыми в настоящее время, с точки зрения глобальности и гибкости применения связанного ресурса космического сегмента ретрансляции в условиях внешних помеховых воздействий на радиоканалы информационного обмена с космическими аппаратами. **Цель:** разработка модели и алгоритмов маршрутизации сообщений в наземно-космических командно-информационных сетях. **Результаты:** разработана математическая модель на основе неориентированного взвешенного графа, описывающая функционирование перспективной наземно-космической командно-информационной сети в условиях внешних помеховых воздействий на радиоканалы информационного обмена с космическими аппаратами. Представлен обобщенный алгоритм маршрутизации сообщений в исследуемой сети, который базируется на алгоритме поиска кратчайшего пути в заданной метрике в графах с динамической структурой. Работа алгоритма основана на определении оптимального маршрута доведения информации до космического аппарата-абонента при формировании в наземно-космической командно-информационной сети «виртуального» канала. Особенностью используемого в модели алгоритма маршрутизации сообщений является его масштабируемость и возможность применения как в полностью связанной, так и в неполностью связанной наземно-космической командно-информационной сети. **Практическая значимость:** разработанная модель позволяет методом имитационного моделирования исследовать вероятностно-временные характеристики управления и информационного обмена с космическими аппаратами по сетевой технологии. Представленные результаты моделирования демонстрируют возможности повышения показателей глобальности и оперативности управления космическими аппаратами по сетевой технологии в условиях внешних помеховых воздействий на радиоканалы космического сегмента ретрансляции.

Ключевые слова — управление космическими аппаратами, спутник-ретранслятор, сетевая технология, алгоритм маршрутизации.

Введение

Поддержание в готовности космических аппаратов (КА) и их эффективное применение по назначению обеспечивается системами управления КА. Состав и характеристики средств системы управления КА, а также принятая технология управления КА должны удовлетворять требованиям к управлению КА соответствующей космической системы. В зависимости от типа КА к объему операций управления и качеству их выполнения могут предъявляться различные требования, при этом общими требованиями к управлению КА являются глобальность и оперативность управления [1].

В современных условиях совершенствование технологий управления КА происходит путем перехода к новым структурам системы управления КА. Перспективным направлением развития технологий управления является переход от управления КА при их нахождении в зоне радиовидимости наземных радиоэлектронных средств к управлению через спутники-ретрансляторы (СР). Это позволит перейти от существующей

структуры системы управления КА с многопунктным наземным комплексом управления к системе управления КА с малопунктным наземным комплексом управления и космическим ретрансляционным сегментом, который реализуется с помощью космических командно-ретрансляционных систем (КРС) [2, 3].

К настоящему времени в нашей стране и за рубежом накоплен опыт использования КРС на основе высокоорбитальных геостационарных СР [4, 5]. При этом одним из направлений дальнейшего развития КРС является переход к совместному использованию в космическом ретрансляционном сегменте наряду с высокоорбитальными низкоорбитальными СР [2, 6]. Это обуславливается наличием известных недостатков и достоинств у каждого из вариантов построения КРС в отдельности. Объединение в единую структуру позволяет использовать в полной мере достоинства каждой системы и нивелировать их недостатки. Рассматриваемая наземно-космическая командно-информационная сеть (НККИС) представляет собой систему управления КА, которая в общем виде состоит из малопунктного территориально

разнесенного наземного комплекса управления (НКУ), КА-абонентов, являющихся объектами управления, и космического ретрансляционного сегмента. Совместно данные элементы образуют сетевую структуру.

Наземно-космическая командно-информационная сеть

Наземный комплекс управления, входящий в состав НККИС, включает в себя центр управления полетами (ЦУП), который формирует информационные сообщения и производит расчет маршрута передачи данных сообщений на борт КА-абонентов; сеть радиоэлектронных систем (РЭС) управления КА, которые осуществляют операции по управлению КА-абонентами и СР, входящими в состав НККИС, непосредственно при прохождении КА в зоне радиовидимости либо с ретрансляцией через космический сегмент НККИС, а также наземную систему информационного обмена.

В общем случае НККИС является неполно-связной, и в ней могут быть использованы следующие методы информационного обмена:

- ретрансляция сообщений по межспутниковым каналам, образованным бортовой ретрансляционной аппаратурой СР, входящих в состав НККИС [2];

- ретрансляция сообщений с переносом в запоминающем устройстве СР (режим электронной почты) [7];

- передача сообщений через наземную сеть РЭС управления КА [8].

Рассматриваемая структура системы управления КА включает N узлов сети передачи данных, образующих множество L мощностью N , причем

$$N = N_{\text{ЦУП}} + N_{\text{РЭС}} + N_{\text{СР}} + N_{\text{КА}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{ЦУП}}$ — количество (мощность подмножества) ЦУП $L_{\text{ЦУП}}$, входящих в состав наземного сегмента НККИС (в частном случае $N_{\text{ЦУП}} = 1$); $N_{\text{РЭС}}$ — количество (мощность подмножества) РЭС $L_{\text{РЭС}}$, входящих в состав наземного сегмента НККИС; $N_{\text{СР}}$ — количество (мощность подмножества) спутников-ретрансляторов $L_{\text{СР}}$, входящих в состав инфокоммуникационной сети в качестве узлов ретрансляции данных; $N_{\text{КА}}$ — количество (мощность подмножества) КА-абонентов $L_{\text{КА}}$, входящих в состав инфокоммуникационной сети в качестве оконечных узлов приема-передачи информации.

Система управления КА должна быть способна выполнять задачи в условиях воздействия внешних мешающих факторов. При этом воздействия могут быть оказаны на РЭС управления КА и космические узлы ретрансляции. К внешним мешающим факторам относятся источники по-

мех, которые попадают в зону радиовидимости узлов ретрансляции в периоды проведения сеансов передачи информации.

Представим систему источников помех множеством Z с мощностью подмножества M . Математическая модель НККИС на сетевом уровне представляет собой неориентированный взвешенный граф $G(A; B)$, имеющий $N + M$ вершин, образующих множество $|A| = \{a_i\}$, $i = \overline{1, N + M}$, и множество ребер B . Каждая из вершин множества A соответствует узлам ретрансляции системы, источникам помех или средствам приема специальной информации, а множество ребер B соответствует радиоканалам между узлами НККИС и внешним мешающим факторам, которые воздействуют на узлы ретрансляции.

Неориентированный граф $G(A; B)$, представленный на рис. 1, включает в себя два частных графа $G'(L; J)$, $G''(Z + L; W)$. При этом граф $G'(L; J) \subset G(A; B)$ определяет структуру и состав системы управления КА с НККИС, граф $G''(Z + L; W) \subset G(A; B)$ определяет влияние источников помех на функционирование рассматриваемой системы управления КА, причем $L \cup Z = A$, а $J \cup W = B$.

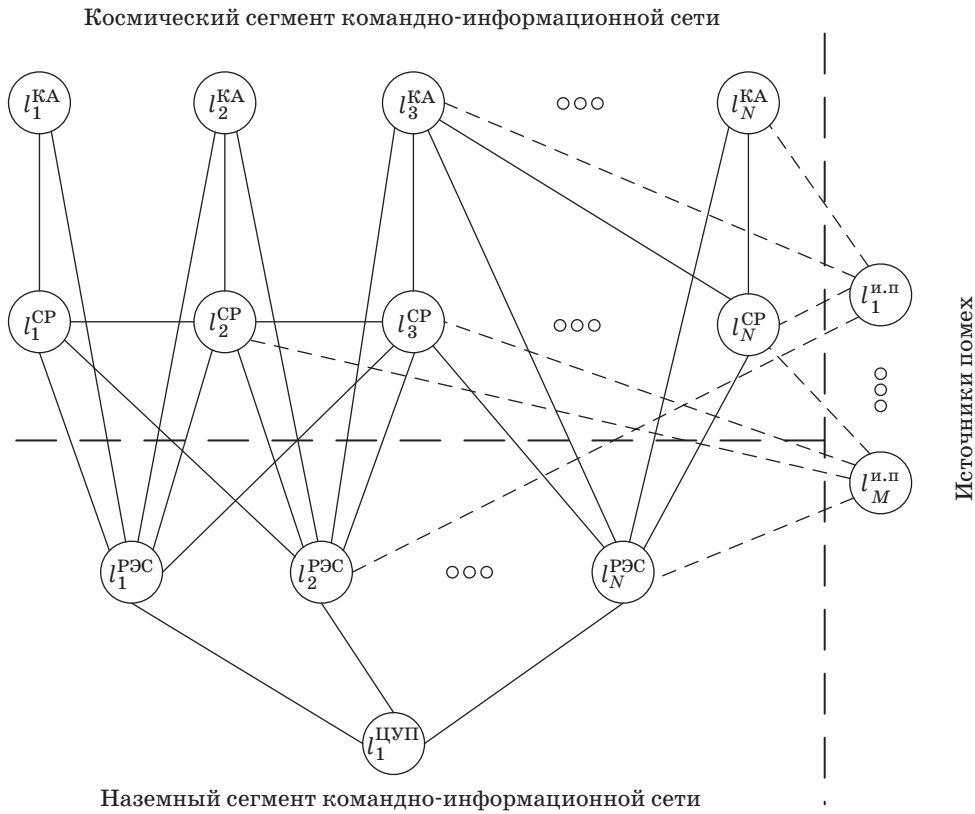
Вследствие движения КА и СР по орбитам их взаимное положение и, следовательно, взаимное положение узлов сети относительно зон радиовидимости других узлов непрерывно изменяется. Непрерывно изменяется во времени и состояние графа $G(A; B)$. В каждый текущий момент времени t каждому ребру j_i , входящему в состав множества $J = \{j_i\}$, $i = \overline{1, N^2}$, поставлена в соответствие пара

$$d_{ij}(t) = \{t_{ij}^{\text{ож}}(t), \Delta t_{ij}^{\text{в}}\}, \quad (2)$$

где $t_{ij}^{\text{ож}}(t)$ — время до момента начала очередной зоны взаимной радиовидимости между i -м (l_i) и j -м (l_j) узлами в момент времени t ; $\Delta t_{ij}^{\text{в}}$ — длительность очередной зоны взаимной радиовидимости между i -м (l_i) и j -м (l_j) узлами [4].

Пара $d_{ij}(t)$ однозначно определяет влияние баллистического положения i -го (l_i) и j -го (l_j) ($l_i, l_j \in L$; $i, j = \overline{1, N}$, $i \neq j$) узлов ретрансляции НККИС на возможность передачи информации между ними в момент времени t . Множество пар $d_{ij}(t)$ представим матрицей $\mathbf{D}(t) = \|d_{ij}(t)\|$, $i, j = \overline{1, N}$, причем при $i = j$ будем полагать $d_{ij} \langle \infty \rangle$, что физически означает невозможность ретрансляции сообщения узлом самому себе.

В связи с наличием в НККИС разных типов СР с различной бортовой ретрансляционной аппаратурой скорость передачи информации в радиоканалах между узлами НККИС может отличаться, что непосредственно влияет на время передачи



■ **Рис. 1.** Неориентированный взвешенный граф системы управления космическим аппаратом с НККИС

сообщения. Каждому радиоканалу НККИС l_i из множества $J = \{j_i\}, i = 1, N^2$ в соответствие поставлена пара

$$q_{ij} = \langle q_{ij}^{п.к}, q_{ij}^{о.к} \rangle,$$

где $q_{ij}^{п.к}$ — скорость передачи информации от i -го (l_i) к j -му (l_j) узлу; $q_{ij}^{о.к}$ — скорость передачи информации в обратном канале от j -го (l_j) к i -му (l_i) узлу.

Пара q_{ij} однозначно определяет скорость передачи информации между i -м (l_i) и j -м (l_j) ($l_i, l_j \in L; i, j = \overline{1, N}, i \neq j$) узлами ретрансляции НККИС. Полученное множество пар q_{ij} представлено матрицей $\mathbf{Q} = \|q_{ij}\|, i, j = \overline{1, N}$, причем при $i = j$ полагается $q_{ij} < \infty$ так же, как и для $d_{ij}(t)$, что означает невозможность ретрансляции сообщения узлом самому себе.

Каждому ребру w_i , входящему в состав множества $W = \{w_i\}, i = \overline{1, N \cdot M}$, сопоставлен в соответствие вес $u_{ij}(t)$, однозначно определяющий влияние i -го источника помех $z_i \in Z, i = \overline{1, M}$ на j -й узел ретрансляции $l_j \in L; j = \overline{1, N}$ в момент t . Полученное множество весов представим матрицей влияния

$$\mathbf{U}(t) = \{u_{ij}(t)\}, i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}.$$

Данные множества графа $G(A; B)$ в совокупности составляют множество взвешенных ребер и определяют влияние системы внешних воздействий и баллистического положения узлов системы управления КА на передачу в ней сообщений в момент времени t :

$$G(A, B \{ \mathbf{U}(t), \mathbf{Q} \langle q_{ij}^{п.к}, q_{ij}^{о.к} \rangle, \mathbf{D} \langle t^{ож}(t), \Delta t^B \rangle \}).$$

Возможные маршруты передачи сообщения между узлом-отправителем и узлом-получателем сообщения за допустимое время доведения сообщения $\Delta T_{\text{дов max}}$ представлены множеством $\Theta = \{\theta_i\}, i = \overline{1, \eta}$, где η определяет общее количество маршрутов. При этом под маршрутом передачи сообщения понимается множество

$$\theta_i = \langle l_j, \Omega_j^k, t_j \rangle, j = \overline{1, \xi}, \quad (3)$$

где $l_j \in L$ — узел НККИС, на который необходимо передать сообщение в момент времени t_j ; $\Omega_j^k \in \Omega$ — необходимый для передачи сообщения метод информационного обмена; ξ — количество узлов в i -м маршруте ($\xi \leq \xi_{\text{max}}$). Множество $\Omega = \{\Omega^НУ, \Omega^СМ, \Omega^ПП\}$ представляет собой совокупность используемых в НККИС трех методов информационного обмена с КА: непосредственного

управления (НУ), сетевого метода (СМ), ретрансляции с переносом (РП).

Таким образом, задача поиска оптимального маршрута по заданному критерию в системе управления КА с НККИС представлена в виде

$$\mathfrak{J}\left\langle S\langle l_s, l_{a\bar{6}}, t_0 \rangle, G(L, B\langle U(t), Q\langle q_{ij}^{п.к}, q_{ij}^{о.к} \rangle \rangle, D\langle t^{ожк}(t), \Delta t^B \rangle \rangle \right\rangle \Big|_{\zeta} \rightarrow \theta_i^{\zeta}, \quad (4)$$

где $\mathfrak{J}(\cdot)$ — функционал, определяющий из множества возможных маршрутов передачи $S\langle l_s, l_{a\bar{6}}, t_0 \rangle$ сообщения Θ маршрут θ_i^{ζ} , оптимальный по заданному критерию ζ ; $S\langle l_s, l_{a\bar{6}}, t_0 \rangle$ — сообщение, поступившее на передачу в момент времени t_0 на узел $l_s \in L$, предназначенное КА-абоненту; $l_{a\bar{6}} \in L$; $G(\cdot)$ — взвешенный граф системы управления КА с НККИС, однозначно определяющий условия передачи в ней сообщения S .

Для определения матриц влияния $U(t)$ в любой момент времени t каждому элементу $z_i, i = \overline{1, M}$ сопоставлено положение источника помех

$$I(t) = \left\| z_i(X_i(t), Y_i(t), Z_i(t), V_{xi}(t), V_{yi}(t), V_{zi}(t)) \right\|, i = \overline{1, M}.$$

Для определения матрицы передачи $D\langle t^{ожк}(t), \Delta t^B \rangle$ в любой момент времени t каждому элементу $l_i, i = \overline{1, N}$ из множества L сопоставлено его положение и вектор скорости: $l_i(x_i, y_i, z_i, v_{xi}, v_{yi}, v_{zi})$. Предполагается, что на каждом узле НККИС имеется альманах системы, и положение узлов

$$\Psi(t) = \left\| l_i(X_i(t), Y_i(t), Z_i(t), V_{xi}(t), V_{yi}(t), V_{zi}(t)) \right\|, i = \overline{1, N}.$$

Рассмотрим критерии оптимальности маршрутов передачи сообщений $S\langle l_s, l_{a\bar{6}}, t_0 \rangle$ в НККИС с динамической маршрутизацией информационных потоков с использованием различных режимов передачи сообщения. Эти критерии могут быть различными в различных условиях обстановки, характеризующихся отсутствием или наличием системы внешних воздействий.

При отсутствии системы внешних воздействий $Z=0, |A|=N$ на передачу сообщения в графе $G(\cdot)$ влияет только орбитальное положение узлов КРС в момент времени t и скорость передачи информации между узлами НККИС. В данном случае в качестве критерия оптимальности маршрута ζ целесообразно выбрать минимум времени доведения сообщения до КА-абонента, которое будет складываться из задержек сообщения между узлами маршрута, обусловленных временем передачи сообщения по радиоканалу между i -м (l_i) и j -м

(l_j) узлом. Тогда целевая функция, определяющая длину маршрута передачи сообщения, имеет вид

$$T_{\text{дов}}^i = \Phi(\theta_i) = \sum_{n=2}^{\xi} (t_n^i - t_{n-1}^i). \quad (5)$$

Маршрут, оптимальный по критерию минимума времени доведения сообщения, определяется исходя из условия

$$\min_i T_{\text{дов}}^i = \min_i \Phi(\theta_i) \rightarrow \theta_n^{\xi}, i = 1, \eta, \quad (6)$$

где $t_n^i - t_{n-1}^i$ определяет задержку информационного сообщения в маршруте при его передаче между текущим (l_n) и предыдущим (l_{n-1}) узлами.

При использовании критерия оптимальности (6) для передачи сообщений на КА-абонент будут выбираться маршруты с минимальным временем доведения сообщения. Данный подход обеспечивает максимальную оперативность информационного обмена в выбранной структуре системы управления КА с НККИС, но не обеспечивает максимальную устойчивость управления при воздействии на узлы ретрансляции НККИС. Так, радиоэлектронное подавление одного из узлов на маршруте соответствует минимуму времени доведения сообщения, что приведет к потере сообщения, которое не будет доведено до КА-абонента.

В случае воздействия на НККИС системы внешних воздействий целесообразно использовать минимум времени доведения сообщения с учетом ограничений на используемые методы информационного обмена и ограничений на узлы ретрансляции, находящиеся под воздействием, оказывающим влияние, не позволяющее выполнить передачу сообщения. Данные ограничения вводятся матрицами влияния $U(t)$. В случае невозможности выполнения ретрансляции через узел, находящийся под воздействием факторов, мешающих передаче сообщения, сообщение должно быть передано через другой узел ретрансляции по обходным «виртуальным» каналам, на которые система внешних воздействий не оказывает влияние или оказывает значительно меньшее влияние, позволяющее выполнить передачу сообщения.

Кроме того, если система внешних воздействий оказывает существенное влияние на систему управления КА с НККИС и не позволяет выполнять информационный обмен с КА-абонентом с приемлемой оперативностью (при $\Delta T_{\text{дов}}^i \text{ max}, \eta=0$), возможно использование комплексной целевой функции, позволяющей учитывать как вероятность подавления узлов ретрансляции КРС, так и время доведения сообщения:

$$R_{\text{дов}}^i = \frac{T_{\text{дов}}^i}{p^i}, \quad (7)$$

где $T_{\text{дов}}^i$ — суммарное время доведения сообщения по маршруту θ_i [7]; p^i — вероятность передачи сообщения по маршруту θ_i .

Поскольку в системе управления КА для увеличения устойчивости информационного обмена, как правило, используется обратная связь [2, 9], время передачи сообщения между узлами l_{n-1} и l_n на маршруте представлено в виде

$$t_{\Pi} = t_{\Pi n}, \quad (8)$$

где t_{Π} — время одного цикла передачи информации; n — количество циклов передачи сообщения до получения предыдущим узлом от текущего узла положительной квитанции, которое является случайной величиной.

Время одного цикла передачи информации

$$t_{\Pi} = \frac{V_S}{q_{ij}^{\text{п.к}}} + \frac{S_{ij}}{v_{\text{св}}} + \tau_S + \frac{V_{\text{кв}}}{q_{ij}^{\text{о.к}}} + \frac{S_{ji}}{v_{\text{св}}} + \tau_{\text{кв}},$$

где V_S — объем одного передаваемого пакета сообщения S ; $q_{ij}^{\text{п.к}}$ — скорость передачи информации от i -го (l_i) к j -му (l_j) узлу; S_{ij} — расстояние между i -м (l_i) и j -м (l_j) узлами; $v_{\text{св}}$ — скорость распространения радиоволн в пространстве; τ_S — аппаратная задержка при обработке пакета сообщения S ; $V_{\text{кв}}$ — объем передаваемой квитанции; $q_{ij}^{\text{о.к}}$ — скорость передачи информации в обратном канале от j -го (l_j) к i -му (l_i) узлу; S_{ji} — расстояние между j -м (l_j) и i -м (l_i) узлами; $\tau_{\text{кв}}$ — аппаратная задержка при обработке квитанции.

Для выполнения расчетов времени передачи сообщения принято, что расстояние между i -м (l_i) и j -м (l_j) узлами ретрансляции за время передачи сообщения не изменяется, аппаратная задержка при обработке пакета сообщения S и квитанции также одинаковы и равны τ . Тогда время одного цикла передачи информации рассчитывается как

$$t_{\Pi} = \frac{V_S}{q_{ij}^{\text{п.к}}} + \frac{V_{\text{кв}}}{q_{ij}^{\text{о.к}}} + 2 \left(\frac{S_{ij}}{v_{\text{св}}} + \tau \right).$$

Время передачи сообщения t_{Π} является непрерывной случайной величиной с плотностью распределения вероятности $f(t_{\Pi})$. В общем случае t_{Π} зависит от дальности между предыдущим и текущим узлами и характеристик радиоканалов КРС физического и канального уровней, к которым относятся отношение сигнал/помеха, определяемое дальностью связи и положением узла l_n относительно источников помех; вид используемой в радиоканале обратной связи; используемые методы помехоустойчивого кодирования и структура сигнала. Поскольку подавление узла l_n представляет собой событие, при котором время передачи сообщения t_{Π} между узлами l_{n-1} и l_n превысит время их взаимной радиовидимости

$\Delta t_{n-1,n}^B$, то вероятность передачи сообщения можно определить в виде

$$p_n = P(t_{\Pi} < \Delta t_{n-1,n}^B) = \int_0^{\Delta t_{n-1,n}^B} f_{n-1,n}(t_{\Pi}) dt_{\Pi}, \quad (9)$$

где $f_{n-1,n}(t_{\Pi})$ — плотность распределения вероятности времени передачи сообщения по радиоканалу между узлами l_{n-1} и l_n .

Тогда целевая функция (7) для комплексного критерия оптимальности маршрута сообщения в НККИС, функционирующей в условиях воздействия радиопомех, имеет вид

$$R_{\text{дов}}^i = \Phi_2(\theta_i) = \frac{\sum_{n=2}^{\xi} (t_n - t_{n-1})^i}{\prod_{n=2}^{\xi} p_n^i}. \quad (10)$$

Маршрут, оптимальный по критерию минимума комплексной целевой функции, определяется исходя из условия

$$\min_i R_{\text{дов}}^i = \min_i \Phi_2(\theta_i) \rightarrow \theta_n^{\xi}, \quad i = 1, \eta. \quad (11)$$

Критерий оптимальности (11) позволяет учесть потери при возможном недоставлении сообщения до КА-абонента.

Обобщенный алгоритм маршрутизации передаваемой информации в НККИС

Для реализации в НККИС рассмотренного метода информационного обмена, использующего различные режимы ретрансляции сообщений, узел l_s , на который поступило сообщение $S < l_s, l_{\text{аб}}, t_0 >$, должен выполнить определение его маршрута в соответствии с алгоритмом, блок-схема которого представлена на рис. 2. Определение оптимального маршрута включает следующие операции.

1. На основании альманаха системы $\Psi(t)$ спрогнозировать положение всех узлов космического ретрансляционного сегмента и определить матрицу передачи

$$\mathbf{D}(t) = \left\{ d_{ij} \left\langle t^{\text{ож}}(t), \Delta t^B \right\rangle \right\}, \quad i, j = \overline{1, N}.$$

2. На основании матрицы

$$\mathbf{Q} = \left\{ q_{ij} \left\langle q_{ij}^{\text{п.к}}, q_{ij}^{\text{о.к}} \right\rangle \right\}, \quad i, j = \overline{1, N}$$

выполнить расчет времени одного цикла передачи информации.

3. Из альманаха системы $\Psi(t)$, данных о положении источников помех $I(t)$ определить матрицу влияния $\mathbf{U}(t)$ на интервале времени, мак-

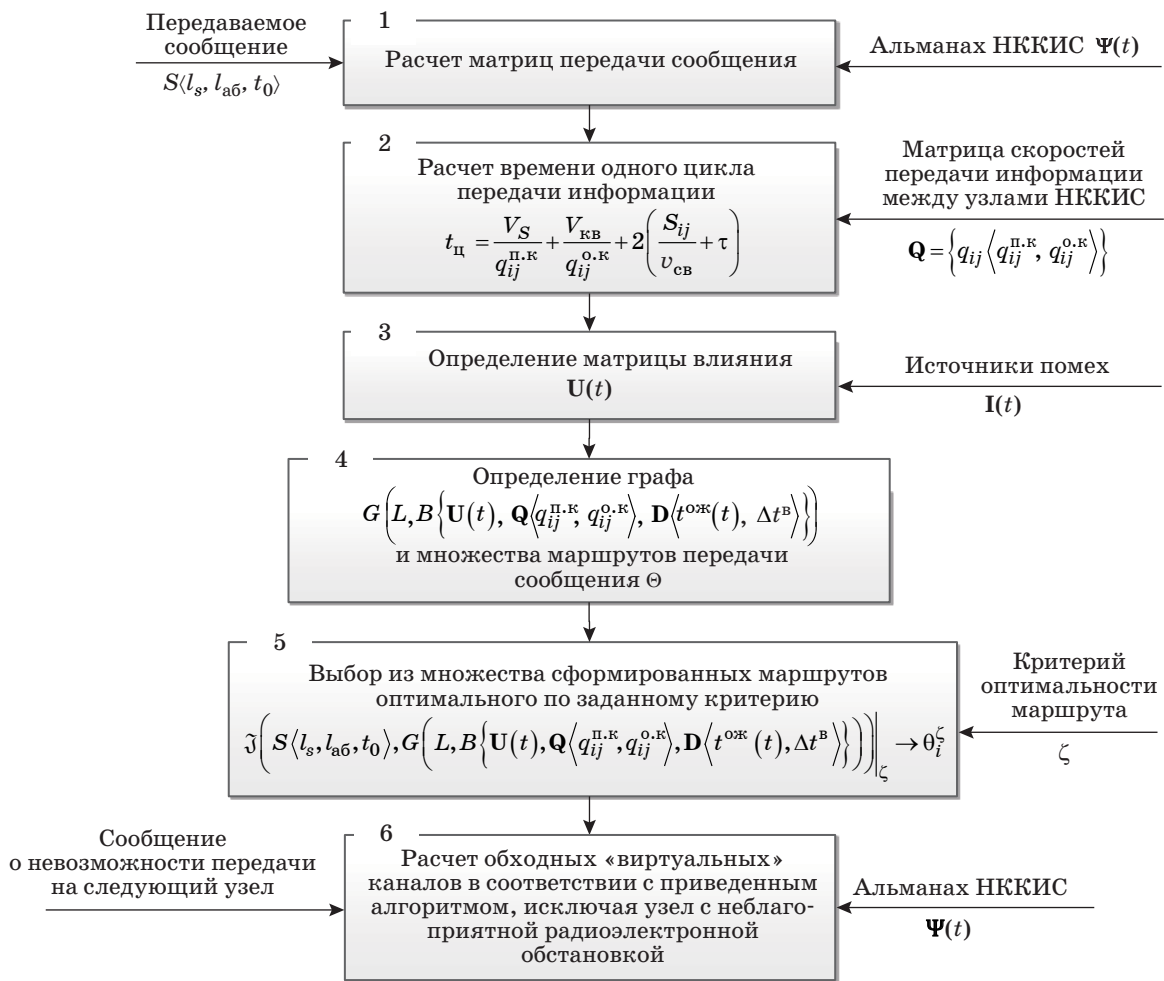


Рис. 2. Обобщенная схема алгоритма формирования маршрута сообщения

симально возможном для передачи сообщения $\Delta T_{\text{дов max}}$. Элементы $u_{ij}(t)$ матриц $U(t)$ в каждый момент времени t определяют воздействие системы внешних воздействий на все узлы НККИС.

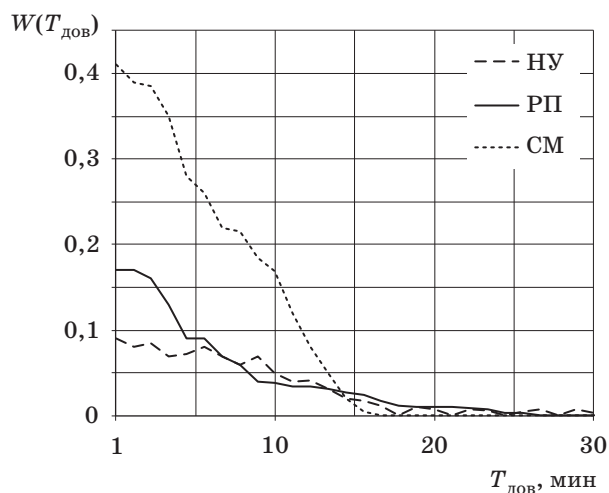
4. Используя полученную матрицу передачи $D(t)$ и матрицы влияния $U(t)$, однозначно определяющие состояние НККИС на интервале времени $\Delta T_{\text{дов max}}$, сформировать взвешенный граф $G(L, B)$, с помощью которого определить множество маршрутов Θ . Данное множество включает в себя маршруты со временем доведения, не превышающим $\Delta T_{\text{дов max}}$. Если получено пустое множество ($\eta=0$), то передать сообщение за время, меньшее $\Delta T_{\text{дов max}}$, невозможно.

5. Согласно выбранному критерию ζ из множества Θ определить оптимальный маршрут $\theta_i^\zeta = \langle l_j, \Omega_j^k, t_{ji}^\zeta \rangle, j = \overline{1, \xi}$, имеющий минимальный суммарный вес, который в общем случае может включать в себя различные методы информационного обмена между узлами в маршруте. Дополнить сообщение $S \langle l_s, l_{ab}, t_0 \rangle$ служебной ин-

формацией, определяющей его маршрут, и в момент времени t_2^ζ передать его на узел l_2^ζ , используя метод информационного обмена Ω_2^ζ . Таким образом, узел l_2^ζ , приняв сообщение и обработав его служебную информацию, располагает данными о следующем узле l_3^ζ в маршруте, времени передачи информации на него t_3^ζ , а также методе информационного обмена с ним Ω_3^ζ .

6. При определении на одном из узлов, входящих в выбранный маршрут передачи сообщения, невозможности дальнейшей передачи в связи с неудовлетворительной радиоэлектронной обстановкой на его борту, используя данные об альманахе системы $\Psi(t)$, произвести расчет обхода данного узла ретрансляции.

Имитационная модель НККИС была разработана и реализована в виде специального программного комплекса в соответствии с общим подходом к моделированию спутниковых радиосетей [10]. Модель позволяет определить время



■ **Рис. 3.** Плотность распределения вероятности доведения информации до КА-абонента через НККИС тремя методами

доставки сообщений в НККИС с заданной баллистической структурой орбитальной группировки. Для этого с привязкой к реальному времени моделируется динамическая топология орбиталь-

ной группировки сети, определяется положение СР и зон радиовидимости для РЭС. В дальнейшем результаты, полученные для интересующих интервалов времени и районов расположения абонентов, подвергаются статистической обработке. Одним из полученных результатов (рис. 3) является плотность вероятности времени доведения информации в НККИС.

Заключение

Рассмотренный сетевой алгоритм маршрутизации сообщений представляет собой алгоритм поиска кратчайшего пути в заданной метрике в графах с динамической структурой, который является базовым для управления передачей сообщений при информационном обмене с КА в НККИС. В основе алгоритма лежит определение оптимального маршрута доведения сообщения до КА-абонента при формировании в НККИС «виртуального» канала с возможностью использования принятых в НККИС различных методов ретрансляции. Алгоритм является масштабируемым и может использоваться как в полносвязной, так и в неполносвязной НККИС.

Литература

1. **Кравец В. Г.** Автоматизированные системы управления космическими полетами. — М.: Машиностроение, 1995. — 256 с.
2. **Галантерник Ю. М., Гориш А. В., Калинин А. Ф.** Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами. — М.: Изд-во МГУЛ, 2003. — 200 с.
3. **Мальцев Г. Н., Стогов Г. В., Терехов А. В.** Перспективы создания комплексов управления космическими аппаратами на базе ключевых технологий // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5. С. 2–5.
4. **Бартенев В. А.** и др. Спутниковая связь и вещание: справочник/ В. А. Бартенев, Г. В. Болотов, В. Л. Быков и др. / под ред. Л. Я. Кантора. — М.: Радио и связь, 1997. — 528 с.
5. **Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В.** Спутниковые сети связи. — М.: Альпина Паблицер, 2004. — 536 с.
6. **Мальцев Г. Н.** Сетевые информационные технологии в современных спутниковых системах связи // Информационно-управляющие системы. 2007. № 1. С. 33–39.
7. **Моторин Н. М.** Исследование вероятностно-временных характеристик передачи сообщений в низкоорбитальной спутниковой системе связи в режиме «электронная почта» // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5. С. 29–31.
8. **Галькевич А. И.** и др. Низкоорбитальная космическая система персональной спутниковой связи и передачи данных/ А. И. Галькевич, С. О. Владимиров, В. М. Дубровский и др. / под ред. А. И. Галькевича. — Тамбов: Юлис, 2011. — 169 с.
9. **Вейцель В. А.** и др. Радиосистемы управления/ В. А. Вейцель, А. С. Волковский, С. А. Волковский и др. / под ред. В. А. Вейцеля. — М.: Дрофа, 2005. — 416 с.
10. **Важенин Н. А.** и др. Имитационное моделирование спутниковых радиосетей/ Н. А. Важенин, Ю. М. Галантерник, А. А. Каплунов и др. / под ред. Н. А. Важенина. — М.: Изд-во НИИ ТП, 1993. — 80 с.

UDC 621.396.946

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.23

Model of Ground-Space Command Information Network with Data Path Formation under External Interference on Radio Channels

Kharchenko A. V.^a, Dr. Sc., Tech, Associate Professor, shoora1@ya.ru

Ushakov I. A.^a, Post-Graduate Student, kadet.ilia@yandex.ru

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

Introduction: When solving the problems of spacecraft control, networking technologies are implemented in ground-space command information networks, having significant advantages over the technologies currently in use, due to their globality and flexibility in using connected resources of a space relay segment under external interference affecting the radio channels of information exchange with the spacecrafts. **Purpose:** Our goal is to develop a model and algorithms for routing messages in ground-space command-information networks. **Results:** A mathematical model has been developed based on an undirected weighted graph. The model describes the operation of a prospective ground-space command information network under external interference effects on the radio channels of information exchange with the spacecrafts. The message routing algorithm in the network is based on the search for the shortest path in a given metric in graphs with a dynamic structure. The algorithm determines the optimal route of carrying the information to the spacecraft subscriber when a “virtual” channel is formed in the network. A peculiar feature of the model used in the message routing algorithm is its scalability. It can be used in either a full mesh or partial mesh network. **Practical relevance:** The developed model allows you to use simulation for studying the probabilistic and temporal characteristics of spacecraft control and data exchange on the base of network technology. The presented simulation results demonstrate the ways to achieve higher scores in the globality and speed of spacecraft control with networking under external interference on the radio channels of the space relay segment.

Keywords — Spacecraft Control, Relay Satellite, Networking Technology, Routing Algorithm.

References

1. Kravets V. G. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia kosmicheskimi poletami* [Automated Space Flight Control System]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 256 p. (In Russian).
2. Galanternik Iu. M., Gorish A. V., Kalinin A. F. *Komandno-izmeritel'nye sistemy i nazemnye kompleksy upravleniia kosmicheskimi apparatami* [Command and Measuring Systems and Ground-Based Spacecraft Control]. Moscow, Moskovskii gosudarstvennyi universitet lesa Publ., 2003. 200 p. (In Russian).
3. Mal'tsev G. N., Stogov G. V., Terekhov A. V. The Prospects of Spacecraft Control System Creation on the Basis of Key Technologies. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2006, no. 5, pp. 2–5 (In Russian).
4. Bartenev V. E., Bolotov G. V., Bykov V. L. *Sputnikovaia sviaz' i veshchanie* [Satellite Communications and Broadcasting]. Ed. by L. Ia. Kantor. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1997. 528 p. (In Russian).
5. Kamnev V. E., Cherkasov V. V., Chechin G. V. *Sputnikovye seti sviazi* [Satellite Communication Network]. Moscow, Al'pina Publ., 2004. 536 p. (In Russian).
6. Mal'tsev G. N. Network Information Technologies in Modern Satellite Communication Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2007, no. 1, pp. 33–39 (In Russian).
7. Motorin N. M. Investigation of Probability-Timing Features of Low Earth Orbit Satellite Message Exchange System in E-Mail Mode. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2006, no. 5, pp. 29–31 (In Russian).
8. Gal'kevich A. I., Vladimirov S. O., Dubrovskii V. M. *Nizkoorbital'naia kosmicheskaiia sistema perdonal'noi sputnikovoi sviazi i peredachi dannykh* [Low-Orbit Space System for Personal Satellite Communication and Data Transmission]. Ed. by A. I. Gal'kevich. Tambov, Iulis Publ., 2005. 169 p. (In Russian).
9. Veitsel' V. A., Volkovskii A. S., Volkovskii S. A. *Radiosistemy upravleniia* [Control Radio Systems]. Ed. by V. A. Veitsel'. Moscow, Drofa Publ., 2005. 416 p. (In Russian).
10. Vazhenin N. L., Galanternik Iu. M., Kaplunov A. A. *Imitatsionnoe modelirovanie sputnikovyykh radiosetei* [Simulation of Satellite Radio]. Ed. by N. L. Vazhenin. Moscow, Nauchno-issledovatel'skii institut tochnykh priborov Publ., 1998. 80 p. (In Russian).

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КВАЗИОПТИМАЛЬНОЙ ГИБКОЙ ПРОГРАММЫ АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА

Е. В. Копкин^а, доктор техн. наук, профессор

Д. Н. Бородько^а, канд. техн. наук, старший преподаватель

К. Е. Пастухова^а, курсант

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

Постановка проблемы: оптимизация процессов анализа технического состояния сложных объектов на основе использования метода динамического программирования требует значительных вычислительных затрат, особенно при большой размерности таблицы состояний таких объектов. **Цель:** разработка алгоритма построения гибкой программы анализа технического состояния объекта, позволяющего получать близкий к оптимальному результат с меньшими вычислительными затратами по сравнению с методом динамического программирования. **Методы:** метод ветвей и границ, модифицированный авторами применительно к процессу анализа технического состояния объекта, с использованием в качестве показателя оптимизации предложенной академиком А. А. Харкевичем меры семантической полезности информации, получаемой при выполнении проверок диагностических признаков, представленных в виде интервалов на вещественной числовой оси, имеющих равномерный закон распределения. **Результаты:** при построении квазиоптимального алгоритма на каждом шаге функционирования программы необходимо выбирать для проверки такой диагностический признак, которому соответствует максимальное значение верхней границы семантической полезности получаемой информации. Для вычисления верхней границы оптимизируемого показателя использовалось известное свойство меры Харкевича, заключающееся в том, что значение этой меры будет наибольшим при максимальном различии вероятностей исходов проверок диагностических признаков. Разработанный алгоритм представлен в виде последовательных шагов, позволяющих определить минимальную совокупность диагностических признаков, проверки которых обеспечивают распознавание каждого из заданных технических состояний объекта с максимальной в среднем семантической полезностью получаемой диагностической информации. Представлен пример реализации разработанного алгоритма, иллюстрирующий сущность предлагаемого подхода. **Практическая значимость:** разработанный алгоритм может быть использован при создании специального математического обеспечения автоматизированных комплексов анализа технического состояния сложных объектов.

Ключевые слова – техническое состояние объекта, гибкая программа анализа, метод ветвей и границ, семантическая полезность информации.

Введение

Задачи, возникающие при анализе технического состояния (ТС) объектов, в основном заключаются в том, чтобы достичь цели (распознать конкретное состояние объекта) наилучшим в смысле выбранного показателя качества образом.

Анализируемый объект может случайным образом оказаться в одном из множества искомым состояний. Существует ряд путей достижения цели, исходящих из начального состояния процесса анализа. При разных методах построения формируются разные варианты диагностических процедур для одного и того же объекта. Для выбора наилучшего из этих вариантов используются различные критерии.

Метод динамического программирования обеспечивает получение строго оптимальной в смысле выбранного критерия гибкой программы анализа ТС объекта. Однако при этом требуется выполнять значительный объем вычислений, который стремительно возрастает по мере увеличения числа распознаваемых ТС объекта и числа проверок в нем.

Таким образом, не всегда целесообразно, а иногда и просто невозможно получить строго оптимальную программу анализа, поскольку затраты на оптимизацию превосходят достигаемый при этом выигрыш. В этих условиях оказывается более выгодным построение достаточно «хороших» в определенном смысле программ анализа, в которых близкое к оптимальному решение получается при сравнительно меньших вычислительных затратах. Снижение затрат на синтез таких программ достигается в основном использованием более простых и более экономичных в вычислительном отношении критериев и методов оптимизации. Хотя при этом, возможно, и не достигается строгий оптимум, но в целом синтезированная программа оказывается «почти оптимальной» и обеспечивает заданное качество анализа. Такие программы, базирующиеся на использовании метода ветвей и границ, называются квазиоптимальными.

К настоящему времени на основе метода ветвей и границ разработан ряд алгоритмов построения квазиоптимальных гибких программ анализа (ГПА) ТС объектов [1–4], у которых в качестве целевой функции используются средние затраты

и средняя информативность, а диагностические признаки имеют дискретную и непрерывную форму представления. Между тем использование для построения ГПА предложенного академиком А. А. Харкевичем показателя полезности (ценности) информации позволяет существенно сократить ее семантическую избыточность, под которой понимается не избыток смыслового содержания получаемых сообщений, а бесполезность некоторых из них для раскрытия этого содержания. Однако алгоритм построения ГПА по данному показателю разработан только в рамках метода динамического программирования [5]. Поэтому разработка алгоритма построения квазиоптимальной ГПА по критерию максимума семантической полезности информации на основе использования метода ветвей и границ представляется актуальной и практически значимой задачей.

Математическая постановка задачи

Для решения задачи воспользуемся диагностической моделью [6] для важного и актуального случая использования при контроле непрерывных диагностических признаков. Эта модель представляется в виде двух упорядоченных множеств

$$\begin{aligned} M_o &= \langle S, \Pi, L, \Phi \rangle; \\ M_{\Pi} &= \langle S, \Omega, P, \hat{\Pi} \rangle, \end{aligned} \quad (1)$$

первое из которых является моделью объекта анализа, а второе — моделью процесса определения технического состояния объекта, т. е. процесса анализа.

Модель (1) содержит следующие элементы: $S = \{S_i | i = \overline{1, m}\}$ — множество ТС, в одном из которых может находиться проверяемый объект; $\hat{\Pi} = \{\hat{\pi}_j | j = \overline{1, n}\}$ — множество проверок, взаимно однозначно соответствующее множеству $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, n}\}$ диагностических признаков, на котором все ТС $S_i \in S$ попарно различимы, т. е. $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}$ есть проверка соответствующего признака $\pi_j \in \Pi$; $L = \{l_{ij} | i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}\}$ — множество равномерно распределенных на вещественной числовой оси интервалов l_{ij} , каждый из которых характеризует возможный разброс значений j -го признака в i -м ТС; $\Phi: S \times \Pi \rightarrow L$ — отображение, устанавливающее связь между элементами множеств L, S и Π , согласно которому $l_{ij} = \Phi(S_i, \pi_j)$, $S_i \in S$, $\pi_j \in \Pi$; $\Omega = \{R | R \subseteq S\}$ — алгебра событий, заданных на множестве S , в которой элементы R играют роль информационных состояний (ИС) моделируемого процесса анализа; $P = \{P(R) | R \in \Omega\}$ — вероятностная мера, заданная на множестве Ω . Физически каждое ИС $R \in \Omega$ означает подмноже-

ство «подозреваемых» ТС, в одном из которых находится объект. Различают начальное ИС $R = S$, промежуточные $R \subset S$ и конечные состояния $R = S_i (i = \overline{1, m})$. Каждое из конечных ИС содержит единственное «подозреваемое» состояние S_i , которое воспринимается как опознанное i -е ТС объекта. В дальнейшем конечные ИС будем обозначать $R_i = S_i (i = \overline{1, m})$, а все остальные (неконечные) — $R_k \subseteq S (k = m + 1, m + 2, \dots)$.

Функционирование гибкой диагностической процедуры заключается в получении и анализе информации о состоянии наблюдаемого (проверяемого) объекта. При этом процесс анализа последовательно переходит из одного ИС $R_k \in \Omega$ в другое, содержащее меньшее число элементов S_i . Процесс переходов завершается при достижении одного из конечных состояний $R_i (i = \overline{1, m})$, содержащих единственное состояние S_i , воспринимаемое как опознанное. Описанным процессом можно управлять, целенаправленно выбирая в каждом неконечном состоянии $R_k \subseteq S$ проверку $\hat{\pi}_j$, которая должна принадлежать множеству $\hat{\Pi}_k$ допустимых в данном состоянии R_k проверок, определяемому из условия

$$\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k, \text{ если } (\exists S_i, S_f \in R_k) : (l_{ij} \cap l_{fj} = \emptyset). \quad (2)$$

Переход от одного состояния R_k к другому осуществляется с помощью отображения

$$\hat{\pi}_j : R_k \rightarrow R_{kj}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}}), \quad (3)$$

где ω_{kj} — число исходов проверки $\hat{\pi}_j$, выполненной в ИС R_k ; v — порядковый номер исхода;

$$R_{kj}^v = \left\{ S_i \mid S_i \in R_k, y_j \in \Delta_{kj}^v \right\}; \Delta_{kj}^v = \bigcap_{\{i: S_i \in R_{kj}^v\}} l_{ij}.$$

Результатом выполнения отображения (3), т. е. исходом проверки $\hat{\pi}_j$, выполняемой в состоянии R_k , является событие, заключающееся в попадании измеренного значения y_j признака π_j в подынтервал Δ_{kj}^v с вероятностью $P(y_j \in \Delta_{kj}^v)$, которую можно определить по формуле

$$P(y_j \in \Delta_{kj}^v) = P_k(\hat{\pi}_j^v) = \frac{|\Delta_{kj}^v|}{|\nabla_{kj}|}, \quad (4)$$

где $|\Delta_{kj}^v|$ и $|\nabla_{kj}| = \left| \bigcup_{\{i: S_i \in R_k\}} l_{ij} \right|$ — длины соответствующих подынтервалов.

Составляемую программу будем представлять в виде ориентированного графа G , имеющего одну антитупиковую (начальную) вершину и m тупиковых (конечных) вершин, обозна-

чающих распознаваемые состояния объекта. Промежуточными вершинами графа являются ИС процесса анализа, а дугами — возможные исходы проверок признаков в этих состояниях. Граф G состоит из ветвей $G_r \in U$ (r — порядковый номер ветви, U — множество всех ветвей), каждая из которых приводит к распознаванию конкретного ТС S_i ($i = \overline{1, m}$).

Задача синтеза квазиоптимальной ГПА заключается в отыскании упорядоченных подмножеств $\Pi_r \in \Pi$ диагностических признаков, каждое из которых обеспечивает распознавание i -го ТС объекта. При этом на каждом шаге функционирования ГПА выбирается такая проверка из числа допустимых в рассматриваемом состоянии $R_k \subseteq S$, чтобы в совокупности выбранное конечное число проверок обеспечивало достижение каждого конечного состояния $R_i \in \Omega_i$ ($i: S_i \in R_k$) наилучшим в смысле выбранного критерия образом.

Алгоритм построения ГПА

В основу предлагаемого алгоритма положен принцип выбора наилучшего из возможных направлений поиска ТС, в котором находится объект, на основе метода ветвей и границ. В качестве критерия для выбора наилучшей проверки на каждом шаге ветвления используется максимум верхней границы полезности (ВГП) информации для любой части составляемой программы.

Сущность метода ветвей и границ при синтезе ГПА заключается в том, что в начальном ИС $R_k = S$ и в каждом из последующих состояний $R_k \subset S$ выбирается для проверки такой признак $\pi_j \in \Pi$, которому соответствует максимальное значение ВГП получаемой информации.

Верхнюю границу полезности, соответствующую выбираемому в ИС $R_k \subset S$ признаку π_j , обозначим через $J_k^B(\pi_j)$ и будем вычислять ее значение по формуле

$$J_k^B(\pi_j) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) \times \left[\omega_{kj} \log_2 P_k(\hat{\pi}_j^v) - \log_2 \prod_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) + \tilde{J}_{kj}^v \right], \quad (5)$$

где \tilde{J}_{kj}^v — оценка ВГП информации, связанная с реализацией R_{kj}^v -подпрограммы, под которой понимается часть G_{kj}^v графа G , получаемая выделением в нем любой вершины $R_{kj}^v \subset S$ вместе с выходящими из нее путями и множеством вершин, достижимых из состояния R_{kj}^v , в том числе и конечных вершин $R_i, i: S_i \in R_{kj}^v$. Вершина R_{kj}^v будет соответствовать начальному ИС, а выходящие из нее пути — ветвям R_{kj}^v -подпрограммы.

Следует отметить, что для конечных ИС $R_i = S_i$ ($i = \overline{1, m}$) значение $\tilde{J}_{kj}^v = 0$.

Формулу (5) можно представить и в другом виде, более удобном для расчетов, а именно:

$$J_k^B(\pi_j) = \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} \log_2 P_k(\hat{\pi}_j^v) \left[\omega_{kj} P_k(\hat{\pi}_j^v) - 1 \right] + \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) \tilde{J}_{kj}^v. \quad (6)$$

Условие для получения искомого подмножеств Π_r можно записать в следующем виде:

$$\pi_j \in \Pi_r, \text{ если } J_k^B(\pi_j) = \max_{\pi_s \in \Pi_k} \left\{ J_k^B(\pi_s) \right\}. \quad (7)$$

Построение ГПА заключается в выполнении ряда последовательных шагов.

Шаг 1. Выполним первую проверку $\hat{\pi}_j \in \hat{\Pi}_k$ в начальном ИС $R_k = S$ и согласно отображению (3) получим ее исходы $R_{kj}^v, v = \overline{1, \omega_{kj}}$ (в начальном ИС все проверки являются допустимыми). По формуле (4) определим вероятности $P_k(\hat{\pi}_j^v)$ этих исходов.

Шаг 2. Для каждого исхода R_{kj}^v ($v = \overline{1, \omega_{kj}}$) определим оценку \tilde{J}_{kj}^v ВГП информации, получаемой при выполнении дальнейших проверок.

2.1. Если ИС R_{kj}^v является конечным, т. е. $R_{kj}^v = R_i = S_i$ ($i = \overline{1, m}$), то $\tilde{J}_{kj}^v = 0$.

2.2. Если ИС R_{kj}^v состоит только из двух элементов, т. е. $R_{kj}^v = \{S_i, S_f | i, f = \overline{1, m}; i \neq f\}$, то сформируем для него из условия (2) подмножество $\hat{\Pi}_{kj}^v$ допустимых проверок и значение \tilde{J}_{kj}^v определим по формуле

$$\tilde{J}_{kj}^v = \max_{\hat{\pi}_s \in \hat{\Pi}_{kj}^v} \left\{ \left[P_{kj}^v(\hat{\pi}_s^1) - P_{kj}^v(\hat{\pi}_s^2) \right] \log_2 \frac{P_{kj}^v(\hat{\pi}_s^1)}{P_{kj}^v(\hat{\pi}_s^2)} \right\}, \quad (8)$$

где $P_{kj}^v(\hat{\pi}_s^1)$ и $P_{kj}^v(\hat{\pi}_s^2)$ — вероятности исходов проверки $\hat{\pi}_s \in \hat{\Pi}_{kj}^v$, выполненной в ИС R_{kj}^v , вычисляемые по формуле, аналогичной (4), а именно:

$$P_{kj}^v(\hat{\pi}_s^u) = \frac{\left| \left(\Delta_{kj}^v \right)_s^u \right|}{\left| \left(\nabla_{kj}^v \right)_s \right|}, \quad (9)$$

где $\left| \left(\Delta_{kj}^v \right)_s^u \right| = \left| \bigcap_{\{i: S_i \in (R_{kj}^v)_s^u\}} I_{is} \right|$; $\left| \left(\nabla_{kj}^v \right)_s \right| = \left| \bigcup_{\{i: S_i \in R_{kj}^v\}} I_{is} \right|$.

2.3. Если ИС R_{kj}^v состоит из трех и более элементов, тогда:

2.3.1) определим для ИС R_{kj}^v по условию (2) множество допустимых проверок $\hat{\Pi}_{kj}^v \subset \hat{\Pi}$;

2.3.2) выполним проверки $\hat{\pi}_s \in \hat{\Pi}_{kj}^v$ в ИС R_{kj}^v и получим их исходы $\left(R_{kj}^v\right)_s^u$ в соответствии с отображением (3), т. е. $\hat{\pi}_s : R_{kj}^v \rightarrow \left(R_{kj}^v\right)_s^u, u = \overline{1, \omega_{kjs}}$;

2.3.3) по формуле (9) вычислим вероятности $P_{kj}^v(\hat{\pi}_s^u)$ исходов проверок $\hat{\pi}_s$, выполненных в ИС R_{kj}^v ;

2.3.4) основываясь на известном свойстве меры Харкевича, заключающемся в том, что ее значение будет тем больше, чем сильнее отличаются между собой вероятности исходов проверки, введем в рассмотрение вспомогательную переменную γ_s , значение которой будем определять по формуле

$$\gamma_s = \sum_{u=1}^{\omega_{kjs}} \left(P_{kj}^v(\hat{\pi}_s^u) - \frac{1}{\omega_{kjs}} \right)^2. \quad (10)$$

Выберем проверку $\hat{\pi}_w$, для которой выполняется условие

$$\hat{\pi}_w = \arg \max_{s: \hat{\pi}_s \in \hat{\Pi}_{kj}^v} \{ \gamma_s \}; \quad (11)$$

2.3.5) для проверки $\hat{\pi}_w \in \hat{\Pi}_{kj}^v$, выбранной по условию (11), определим приближенные вероятности $P_{kj}^v(S_i)$ технических состояний $S_i \in R_{kj}^v$, являющихся конечными элементами R_{kj}^v -подпрограммы, по формуле

$$P_{kj}^v(S_i) = \sum_{u=1}^{\omega_{kju}} \frac{1}{\tau_w^u} P_{kj}^v(\hat{\pi}_w^u), i: S_i \in \left(R_{kj}^v\right)_w^u, \quad (12)$$

где $\tau_w^u = \text{card} \left(R_{kj}^v\right)_w^u$ — мощность множества $\left(R_{kj}^v\right)_w^u$, т. е. число входящих в его состав ТС S_i ;

2.3.6) определим оценку ВГП информации для R_{kj}^v -подпрограммы, получающейся при выполнении в ИС R_{kj}^v проверки $\hat{\pi}_w \in \hat{\Pi}_{kj}^v$, используя формулу

$$\tilde{J}_{kj}^v = \sum_{i: S_i \in R_{kj}^v} \log_2 P_{kj}^v(S_i) \left[\tau_{kj}^v P_{kj}^v(S_i) - 1 \right], \quad (13)$$

где $\tau_{kj}^v = \text{card} R_{kj}^v$.

Шаг 3. Выполним операции, описанные на шаге 2, для оставшихся нерассмотренными конечных исходов R_{kj}^v и для каждого из них определим оценку ВГП \tilde{J}_{kj}^v .

Шаг 4. По формуле (6) определим ВГП $J_k^B(\pi_j)$ проверки $\hat{\pi}_j$, выполненной в начальном ИС $R_k = S$.

Шаг 5. Выполним шаги 2, 3 и 4 для оставшихся нерассмотренными проверок $\hat{\pi}_j$ и определим для них значения ВГП $J_k^B(\pi_j)$.

Шаг 6. По условию (7) выберем оптимальную проверку.

Шаг 7. Применим выбранную оптимальную проверку $\hat{\pi}_j$ к начальному ИС $R_k = S$ и получим ее исходы $R_{kj}^v (v = \overline{1, \omega_{kj}})$.

Шаг 8. Для каждого из конечных ИС R_{kj}^v выполним шаги 1–6 и определим оптимальные проверки в этих состояниях.

Выполнение алгоритма продолжается до получения всех конечных состояний. После этого можно построить ГПА ТС объекта в виде ориентированного графа G .

Чтобы рассчитать среднюю полезность синтезированной программы, воспользуемся формулой [5]

$$\bar{J}(G) = \sum_{R_k \in \Omega_k} P(R_k) \sum_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) \times \left[\omega_{kj} \log_2 P_k(\hat{\pi}_j^v) - \log_2 \prod_{v=1}^{\omega_{kj}} P_k(\hat{\pi}_j^v) \right], \quad (14)$$

где $P(R_k)$ — вероятности ИС R_k , входящих в состав ГПА.

Для определения вероятностей $P(R_k)$, фигурирующих в формуле (14), обозначим через G_r^k ветвь, переводящую процесс анализа из начального состояния в некоторое промежуточное ИС R_k , а через Π_r^k — упорядоченное по очередности их проверки подмножество признаков, проверяемых при реализации этой ветви. Тогда вероятность $P(G_r^k)$ реализации этой ветви можно вычислить по формуле

$$P(G_r^k) = \prod_{\pi_j \in \Pi_r^k} P_k(\hat{\pi}_j^v), v = \overline{1, \omega_{kj}}, \quad (15)$$

а значения вероятностей $P(R_k)$ — по формуле

$$P(R_k) = \sum_r P(G_r^k). \quad (16)$$

Вычислительные затраты на реализацию предложенного алгоритма получаются значительно меньше, чем у алгоритма, описанного в работе [5], который составлен на основе метода динамического программирования.

Пример реализации алгоритма

Пусть в виде табл. 1 заданы множества $S = \{S_i | i = \overline{1, 5}\}$, $\Pi = \{\pi_j | j = \overline{1, 5}\}$ и $L = \{l_{ij} | i = \overline{1, 5}; j = \overline{1, 5}\}$ (табл. 1). По этим исходным данным методом ветвей и границ составим квазиоптимальную по критерию максимума семантической полезности получаемой информации ГПА.

Решение: Определим верхнюю границу полезности для каждой из проверок, выполняемых в начальном состоянии $R_{1-5} = S$, и выберем из них

■ Таблица 1. Таблица состояний объекта анализа

TC	Диагностические признаки π_j				
	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5
S_1	(-1,5; 0,5)	(-0,5; 0,2)	(-0,6; -0,2)	(0,0; 5,0)	(3,0; 4,0)
S_2	(-0,5; 1,5)	(0,0; 0,3)	(-0,2; 0,8)	(2,0; 6,0)	(2,0; 2,8)
S_3	(1,0; 2,5)	(-0,7; -0,3)	(0,4; 1,2)	(4,0; 6,0)	(3,2; 3,6)
S_4	(1,5; 3,5)	(-0,5; 0,0)	(0,0; 0,8)	(7,0; 10,0)	(2,6; 3,0)

оптимальную. В начальном ИС допустимы все проверки $\hat{\pi}_1, \dots, \hat{\pi}_5$. Например, проверка $\hat{\pi}_5$, согласно отображению (3), дает следующие исходы:

$$\hat{\pi}_5 : R_{1-5} \rightarrow \begin{cases} R_{1-5;5}^1 = \{S_2\} = R_2, \\ \text{если } y_5 \in (2,0; 2,6) = \Delta_{1-5;5}^1; \\ R_{1-5;5}^2 = \{S_2, S_4, S_5\} = R_{2,4,5}, \\ \text{если } y_5 \in (2,6; 2,8) = \Delta_{1-5;5}^2; \\ R_{1-5;5}^3 = \{S_4, S_5\} = R_{4,5}, \\ \text{если } y_5 \in (2,8; 3,0) = \Delta_{1-5;5}^3; \\ R_{1-5;5}^4 = \{S_1, S_5\} = R_{1,5}, \\ \text{если } y_5 \in (3,0; 3,2) = \Delta_{1-5;5}^4; \\ R_{1-5;5}^5 = \{S_1, S_3, S_5\} = R_{1,3,5}, \\ \text{если } y_5 \in (3,2; 3,4) = \Delta_{1-5;5}^5; \\ R_{1-5;5}^6 = \{S_1, S_3\} = R_{1,3}, \\ \text{если } y_5 \in (3,4; 3,6) = \Delta_{1-5;5}^6; \\ R_{1-5;5}^7 = \{S_1\} = R_1, \\ \text{если } y_5 \in (3,6; 4,0) = \Delta_{1-5;5}^7. \end{cases}$$

По формуле (4) определим вероятности этих исходов:

$$|\nabla_{1-5;5}| = \left| \bigcup_{v=1}^7 \Delta_{1-5;5}^v \right| = 2;$$

$$P_{1-5}(\hat{\pi}_5^v) = \frac{|\Delta_{1-5;5}^v|}{|\nabla_{1-5;5}|} = \begin{cases} \frac{0,6}{2} = 0,3 (v=1); \\ \frac{0,2}{2} = 0,1 (v=2,6); \\ \frac{0,4}{2} = 0,2 (v=7). \end{cases}$$

Для каждого неконечного исхода $R_{1-5;5}^v (v=2,6)$ определим оценку $\tilde{J}_{1-5;5}^v$ ВПИ информации, получаемой при реализации $R_{1-5;5}^v$ подпрограмм. Поскольку ИС $R_{1-5;5}^1$ и $R_{1-5;5}^7$ являются конечными, то $\tilde{J}_{1-5;5}^1 = \tilde{J}_{1-5;5}^7 = 0$.

Состояния $R_{1-5;5}^v (v=3, 4, 6)$ содержат по два элемента, поэтому для вычисления значений $\tilde{J}_{1-5;5}^v (v=3, 4, 6)$ будем использовать формулу (8).

Например, в ИС $R_{1-5;5}^6 = \{S_1, S_3\}$ допустимые проверки составляют множество $\hat{\Pi}_{1-5;5}^6 = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_3\}$. Определим исходы этих проверок и их вероятности.

Проверка $\hat{\pi}_1$ имеет следующие исходы:

$$\hat{\pi}_1 : R_{1-5;5}^6 \rightarrow \begin{cases} (R_{1-5;5}^6)_1^1 = \{S_1\}, \\ \text{если } y_1 \in (-1,5; 0,5) = (\Delta_{1-5;5}^6)_1^1; \\ (R_{1-5;5}^6)_1^2 = \{S_3\}, \\ \text{если } y_1 \in (1,0; 2,5) = (\Delta_{1-5;5}^6)_1^2. \end{cases}$$

Используя формулу (9), определим

$$\left| (\nabla_{1-5;5}^6)_1 \right| = \left| (\Delta_{1-5;5}^6)_1^1 \cup (\Delta_{1-5;5}^6)_1^2 \right| = 3,5;$$

$$P_{1-5;5}^6(\hat{\pi}_1^1) = \frac{\left| (\Delta_{1-5;5}^6)_1^1 \right|}{\left| (\nabla_{1-5;5}^6)_1 \right|} = \frac{2,0}{3,5} = 0,571;$$

$$P_{1-5;5}^6(\hat{\pi}_1^2) = \frac{\left| (\Delta_{1-5;5}^6)_1^2 \right|}{\left| (\nabla_{1-5;5}^6)_1 \right|} = \frac{1,5}{3,5} = 0,429.$$

Выполним аналогичные расчеты для проверки $\hat{\pi}_3$:

$$P_{1-5;5}^6(\hat{\pi}_3^1) = 0,333; \quad P_{1-5;5}^6(\hat{\pi}_3^2) = 0,667.$$

Подставим полученные значения в формулу (8) и вычислим

$$\tilde{J}_{1-5;5}^6 = \max_{\hat{\pi}_s \in \hat{\Pi}_{1-5;5}^6 = \{\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_3\}} \left\{ P_{1-5;5}^6(\hat{\pi}_s^1) - P_{1-5;5}^6(\hat{\pi}_s^2) \right\} \times \log_2 \frac{P_{1-5;5}^6(\hat{\pi}_s^1)}{P_{1-5;5}^6(\hat{\pi}_s^2)} = \max \left\{ \begin{matrix} 0,059 \\ 0,333 \end{matrix} \right\} = 0,333.$$

Аналогичным образом определим, что $\tilde{J}_{1-5;5}^3 = 0,333$; $\tilde{J}_{1-5;5}^4 = 0,567$.

Рассмотрим теперь ИС $R_{1-5;5}^2$ и $R_{1-5;5}^5$, состоящие из трех элементов, и определим для них величины $\tilde{J}_{1-5;5}^2$ и $\tilde{J}_{1-5;5}^5$.

Для ИС $R_{1-5;5}^2 = \{S_2, S_4, S_5\}$ допустимые проверки составляют подмножество $\hat{\Pi}_{1-5;5}^2 = \{\hat{\pi}_1,$

$\hat{\pi}_2, \hat{\pi}_3, \hat{\pi}_4$. Выполним проверку $\hat{\pi}_2$ и определим ее исходы и их вероятности:

$$\hat{\pi}_2 : R_{1-5}^2 \rightarrow \begin{cases} (R_{1-5;5}^2)_2^1 = \{S_4\}, \\ \text{если } y_2 \in (-0,5; -0,1) = (\Delta_{1-5;5}^2)_2^1; \\ (R_{1-5;5}^2)_2^2 = \{S_4, S_5\}, \\ \text{если } y_2 \in (-0,1; 0,0) = (\Delta_{1-5;5}^2)_2^2; \\ (R_{1-5;5}^2)_2^3 = \{S_2, S_5\}, \\ \text{если } y_2 \in (0,0; 0,1) = (\Delta_{1-5;5}^2)_2^3; \\ (R_{1-5;5}^2)_2^4 = \{S_2\}, \\ \text{если } y_2 \in (0,1; 0,3) = (\Delta_{1-5;5}^2)_2^4; \end{cases}$$

$$P_{1-5;5}^2(\hat{\pi}_2^1) = 0,5; \quad P_{1-5;5}^2(\hat{\pi}_2^2) = 0,125;$$

$$P_{1-5;5}^2(\hat{\pi}_2^3) = 0,125; \quad P_{1-5;5}^2(\hat{\pi}_2^4) = 0,25.$$

По формуле (10) вычислим вспомогательную переменную γ_2 , характеризующую разброс этих вероятностей от среднего значения:

$$\gamma_2 = \sum_{u=1}^4 \left(P_{1-5;5}^2(\hat{\pi}_2^u) - \frac{1}{4} \right)^2 = 0,094.$$

Выполнив аналогичные вычисления для проверок $\hat{\pi}_1, \hat{\pi}_3$ и $\hat{\pi}_4$, рассчитаем значения соответствующих вспомогательных переменных: $\gamma_1=0,042$; $\gamma_3=0,073$; $\gamma_4=0,028$.

В соответствии с условием (11) выберем проверку $\hat{\pi}_2$. По формуле (12) вычислим приближенные вероятности ТС S_i ($i=2, 4, 5$), являющихся конечными элементами $R_{1-5;5}^2$ -подпрограммы, начинающейся с проверки $\hat{\pi}_2$:

$$P_{1-5;5}^2(S_2) = P_{1-5;5}^2(\hat{\pi}_2^4) + \frac{1}{2} P_{1-5;5}^2(\hat{\pi}_2^3) = 0,3125;$$

$$P_{1-5;5}^2(S_4) = P_{1-5;5}^2(\hat{\pi}_2^1) + \frac{1}{2} P_{1-5;5}^2(\hat{\pi}_2^2) = 0,5625;$$

$$P_{1-5;5}^2(S_5) = \frac{1}{2} P_{1-5;5}^2(\hat{\pi}_2^2) + \frac{1}{2} P_{1-5;5}^2(\hat{\pi}_2^3) = 0,125.$$

Теперь вычислим оценку ВГП информации, получаемой при реализации $R_{1-5;5}^2$ -подпрограммы, начинающейся с проверки $\hat{\pi}_2$, используя формулу (13):

$$\tilde{J}_{1-5;5}^2 = \sum_{i=2,4,5} \log_2 P_{1-5;5}^2(S_i) [3P_{1-5;5}^2(S_i) - 1] = 1,409.$$

Аналогичным образом рассчитаем значение оценки ВГП информации для $R_{1-5;5}^5$ -подпрограммы: $\tilde{J}_{1-5;5}^5 = 1,806$.

Подставим полученные значения $\tilde{J}_{1-5;5}^v$ ($v=1,7$) в формулу (6) и рассчитаем ВГП информации, получаемой при выполнении в начальном состоянии R_{1-5} проверки $\hat{\pi}_5$:

$$J_{1-5}^B(\pi_5) = \sum_{v=1}^7 \log_2 P_{1-5}(\hat{\pi}_5^v) [7P_{1-5}(\hat{\pi}_5^v) - 1] + \sum_{v=1}^7 P_{1-5}(\hat{\pi}_5^v) \tilde{J}_{1-5;5}^v = 2,588.$$

Выполнив аналогичные вычисления для проверок $\hat{\pi}_j$ ($j=1,4$), определим соответствующие значения $J_{1-5}^B(\pi_j)$:

$$J_{1-5}^B(\pi_1) = 1,51; \quad J_{1-5}^B(\pi_2) = 1,835;$$

$$J_{1-5}^B(\pi_3) = 1,061; \quad J_{1-5}^B(\pi_4) = 1,981.$$

По условию (7) для проверки в начальном ИС R_{1-5} выберем признак π_5 .

Для каждого из неконечных исходов проверки $\hat{\pi}_5$, выполненной в ИС R_{1-5} , определим наиболее полезные диагностические признаки, действуя аналогичным образом.

Процесс построения ГПА завершим после достижения всех конечных состояний. Основываясь на полученных результатах, построим ГПА в виде ориентированного графа (рисунок).

Упорядоченные по очередности проверки подмножества Π_r ($r=1,16$), каждое из которых обеспечивает распознавание i -го ТС объекта, приведены в табл. 2.

Рассчитаем среднюю полезность построенной ГПА, используя формулу (14). Сначала определим вероятности неконечных ИС R_k , являющихся элементами данной программы, используя формулы (15) и (16):

$$P(R_{1-5}) = 1,0; \quad P(R_{2,4,5}) = P_{1-5}(\hat{\pi}_5^2) = 0,1;$$

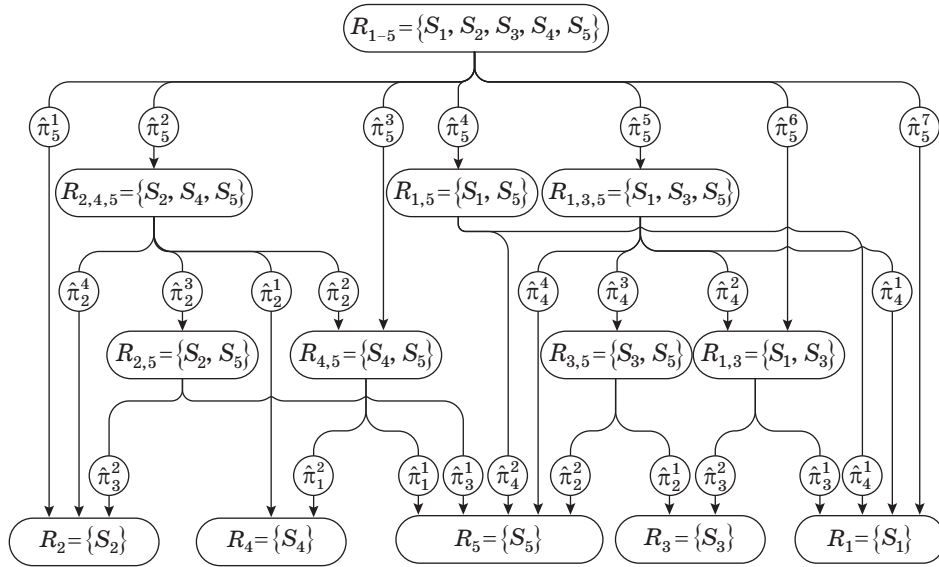
$$P(R_{4,5}) = P_{1-5}(\hat{\pi}_5^3) + P_{1-5}(\hat{\pi}_5^2) \cdot P_{2,4,5}(\hat{\pi}_2^2) = 0,1125;$$

$$P(R_{1,5}) = P_{1-5}(\hat{\pi}_5^4) = 0,1; \quad P(R_{1,3,5}) = P_{1-5}(\hat{\pi}_5^5) = 0,1;$$

$$P(R_{2,5}) = P_{1-5}(\hat{\pi}_5^2) \cdot P_{2,4,5}(\hat{\pi}_2^3) = 0,0125;$$

$$P(R_{3,5}) = P_{1-5}(\hat{\pi}_5^5) \cdot P_{1,3,5}(\hat{\pi}_4^3) = 0,0143;$$

$$P(R_{1,3}) = P_{1-5}(\hat{\pi}_5^6) + P_{1-5}(\hat{\pi}_5^5) \cdot P_{1,3,5}(\hat{\pi}_4^2) = 0,1143.$$



■ Квазиоптимальная по критерию максимума полезности получаемой информации ГПА ТС объекта

■ Таблица 2. Наборы признаков, необходимых для распознавания ТС объекта

П _r для ТС				
S ₂	S ₄	S ₅	S ₃	S ₁
Π ₁ = {π ₅ }	Π ₄ = {π ₅ , π ₂ }	Π ₆ = {π ₅ , π ₂ , π ₁ }	Π ₁₁ = {π ₅ , π ₄ , π ₂ }	Π ₁₃ = {π ₅ , π ₄ , π ₃ }
Π ₂ = {π ₅ , π ₂ }	Π ₅ = {π ₅ , π ₁ }	Π ₇ = {π ₅ , π ₂ , π ₃ }	Π ₁₂ = {π ₅ , π ₄ , π ₃ }	Π ₁₄ = {π ₅ , π ₄ }
Π ₃ = {π ₅ , π ₂ , π ₃ }		Π ₈ = {π ₅ , π ₄ }		Π ₁₅ = {π ₅ , π ₄ }
		Π ₉ = {π ₅ , π ₄ }		Π ₁₆ = {π ₅ }
		Π ₁₀ = {π ₅ , π ₄ , π ₂ }		

Теперь подставим полученные значения в формулу (14) и вычислим

$$\begin{aligned} \bar{J}(G) = & 1,0 \sum_{v=1}^7 P_{1-5}(\hat{\pi}_5^v) \left[7 \log_2 P_{1-5}(\hat{\pi}_5^v) - \right. \\ & \left. - \log_2 \prod_{v=1}^7 P_{1-5}(\hat{\pi}_5^v) \right] + \\ & + 0,1 \sum_{v=1}^4 P_{2,4,5}(\hat{\pi}_2^v) \left[4 \log_2 P_{2,4,5}(\hat{\pi}_2^v) - \log_2 \prod_{v=1}^4 P_{2,4,5}(\hat{\pi}_2^v) \right] + \\ & + 0,1125 \sum_{v=1}^2 P_{4,5}(\hat{\pi}_1^v) \left[2 \log_2 P_{4,5}(\hat{\pi}_1^v) - \log_2 \prod_{v=1}^2 P_{4,5}(\hat{\pi}_1^v) \right] + \\ & + 0,1 \sum_{v=1}^2 P_{1,5}(\hat{\pi}_4^v) \left[2 \log_2 P_{1,5}(\hat{\pi}_4^v) - \log_2 \prod_{v=1}^2 P_{1,5}(\hat{\pi}_4^v) \right] + \\ & + 0,1 \sum_{v=1}^4 P_{1,3,5}(\hat{\pi}_4^v) \left[4 \log_2 P_{1,3,5}(\hat{\pi}_4^v) - \log_2 \prod_{v=1}^4 P_{1,3,5}(\hat{\pi}_4^v) \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + 0,0125 \sum_{v=1}^2 P_{2,5}(\hat{\pi}_3^v) \left[2 \log_2 P_{2,5}(\hat{\pi}_3^v) - \log_2 \prod_{v=1}^2 P_{2,5}(\hat{\pi}_3^v) \right] + \\ & + 0,0143 \sum_{v=1}^2 P_{3,5}(\hat{\pi}_2^v) \left[2 \log_2 P_{3,5}(\hat{\pi}_2^v) - \log_2 \prod_{v=1}^2 P_{3,5}(\hat{\pi}_2^v) \right] + \\ & + 0,1143 \sum_{v=1}^2 P_{1,3}(\hat{\pi}_3^v) \left[2 \log_2 P_{1,3}(\hat{\pi}_3^v) - \right. \\ & \left. - \log_2 \prod_{v=1}^2 P_{1,3}(\hat{\pi}_3^v) \right] = 2,7399. \end{aligned}$$

Данное значение средней полезности информации, получаемой при функционировании составленной программы, можно сравнить с аналогичным значением, рассчитанным для программы, синтезированной методом динамического программирования.

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет распознавать все заданные технические состояния объекта, используя при этом наиболее эффективные в смысле выбранного критерия диагностические признаки.

Для проверки эффективности разработанного алгоритма на основе тех же исходных данных была синтезирована оптимальная программа анализа ТС объекта методом динамического программирования. Она оказалась идентичной программе, представленной на рисунке. При этом вычислительные затраты на синтез программы

методом ветвей и границ оказались на 28 % меньше, чем при использовании метода динамического программирования. Таким образом, можно сделать вывод о том, что представленный в статье научно-методический аппарат можно использовать при разработке специального математического обеспечения программно-аппаратных комплексов автоматизированной обработки и анализа измерительной информации, используемых для мониторинга состояния сложных организационно-технических систем как для решения задач контроля правильности их функционирования, так и при поиске дефектов в них с заданной глубиной.

Литература

1. Дмитриев А. К., Мальцев П. А. Основы теории построения и контроля сложных систем. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 192 с.
2. Дмитриев А. К., Мышко В. В. Синтез гибкой программы контроля технического состояния объекта по информационному показателю // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. Т. 41. № 5. С. 36–46.
3. Дмитриев А. К., Копкин Е. В. Синтез гибкой квазиоптимальной программы диагностирования технического объекта при использовании непрерывных диагностических признаков // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42. № 7. С. 3–12.
4. Дмитриев А. К., Копкин Е. В., Павлов С. Б. Алгоритм построения квазиоптимальной программы диагностирования технического объекта по информационному критерию // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. Т. 44. № 9. С. 3–11.
5. Дмитриев А. К., Копкин Е. В. Построение информационно-поисковой системы по критерию максимума полезности получаемой информации // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 6. С. 46–51.
6. Дмитриев А. К., Копкин Е. В. Оптимизация сетевых структур диагностирования технических объектов на основе принципа максимума Понтрягина // Автоматика и вычислительная техника. 2004. № 5. С. 3–18.

UDC 681.326.74.06

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.31

Algorithm for Constructing a Quasi-Optimal Flexible Program for Analysis of Technical State of an Object

Kopkin E. V.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, kopkins@mail.ru

Borod'ko D. N.^a, PhD, Tech., Senior Lecturer, borodkodenis@yandex.ru

Pastukhova K. E.^a, Cadet, shapowa.cristina@yandex.ru

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

Introduction: The optimization of analyzing the technical state of complex objects using dynamic programming requires considerable computational expenditure, especially when the state table of such objects is large. **Purpose:** We develop an algorithm for constructing a flexible program which would analyze the technical state of an object. This algorithm should allow you to obtain a result close to the optimum, with smaller computational expenditure as compared to dynamic programming. **Methods:** We use the branch-and-bound method, having modified it for the object state analysis. As an optimization criterion, we use the measure of semantic usefulness of information (proposed by A.A.Kharkevich) obtained when you check diagnostic signs presented as intervals on a real numerical axis with a uniform distribution law. **Results:** When developing a quasi-optimal algorithm, on each step of the program operation you have to choose a diagnostic sign for checking, which would be corresponded by the maximum value of the upper bound of semantic usefulness of the obtained information. To calculate the upper bound of an optimized index, we used the well known property of Kharkevich's measure: it reaches its highest value when the probabilities of the diagnostic sign check results are maximally different. The developed algorithm is presented in the form of sequential steps allowing you to define the minimum set of diagnostic signs whose checks provide the recognition of each of the given technical states of the object with the highest average semantic usefulness of the obtained diagnostic information. We provide an example of implementing the developed algorithm, illustrating the gist of the proposed approach. **Practical relevance:** The proposed algorithm can be used in the development of special software for automated systems of analyzing the technical state of complex objects.

Keywords — Technical State of an Object, Flexible Analysis Program, Branch-and-Bound Method, Semantic Usefulness of Information.

References

1. Dmitriev A. K., Mal'tsev P. A. *Osnovy teorii postroeniia i kontrolya slozhnykh sistem* [Basic Theory of Construction and Control of Complex Systems]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1988. 120 p. (In Russian).
2. Dmitriev A. K., Mishko V. V. The Synthesis of Flexible Control Program of Object Product Availability by Information Index. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 1998, vol. 41, no. 5, pp. 36–46 (In Russian).
3. Dmitriev A. K., Kopkin E. V. The Synthesis of Flexible Quasi-Optimal Programm for Technical Object Diagnosing Using the Continuous Diagnostic Signs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 1999, vol. 42, no. 7, pp. 3–12 (In Russian).
4. Dmitriev A. K., Kopkin E. V., Pavlov S. B. Construction Algorithm of Quasi-Optimal Program for Technical Object Diagnosing by Information Criterion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2001, vol. 44, no. 9, pp. 3–11 (In Russian).
5. Dmitriev A. K., Kopkin E. V. The Construction of an Information Retrieval System According to the Criterion of Maximum Usefulness of the Information Obtained. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2003, no. 6, pp. 46–51 (In Russian).
6. Dmitriev A. K., Kopkin E. V. Optimization of Network Structures for Technical Object Diagnostics on the Basis of Pontryagin's Maximum Principle. *Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika*, 2004, no. 5, pp. 3–18 (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>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: informnauka3@yandex.ru,

сайт: <http://www.informnauka.com>

«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 2002–2015 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-upravlyayuschiesistemy).

УДК 681.518

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.40

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ МОДУЛЕЙ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ XML-ОПИСАНИЯ

А. А. Молев^{а, 1}, адъюнкт

^аНИИИ РЭБ, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, РФ

Постановка проблемы: в ходе проектирования, разработки и эксплуатации сложных автоматизированных систем, в том числе военного назначения, нередко возникают задачи, когда элементы сложной системы разделяются на две группы: часть представляется реальными аппаратными средствами, а недостающая часть должна быть воспроизведена имитационно. **Цель:** разработка метода автоматического формирования телекоммуникационных модулей, имитирующих недостающие информационные связи структурных элементов автоматизированных систем, гибко конфигурируемых в зависимости от условий применения и формата обмена данными. **Результаты:** предложен метод имитации информационных связей структурных элементов; описана структура унифицированного программного модуля имитации; выделены общие модули, участвующие в процессе обмена информацией и вводе/отображении данных. Приведены требования к унифицированному описанию протокола информационного обмена в формате XML; разработаны алгоритмы обработки входных и выходных данных, основанные на рекурсивном выполнении операций обработки в соответствии с форматом описания; представлены обобщенные диаграммы приема и обработки данных. Программная реализация выполнена на языке C++ в среде Borland Developer Studio. **Практическая значимость:** разработанный метод может быть использован для имитации недостающих информационных связей элементов автоматизированных систем в ходе проведения испытаний на эффективность по основному назначению или пуско-наладочных работ, а также в случаях, когда необходимо получить предельные или трудно сочетаемые значения отдельных характеристик автоматизированной системы или ее элементов.

Ключевые слова — полунатурное моделирование, автоматизированные системы, имитация структурных элементов, информационные связи, формат XML.

Введение

Появление новых видов вооружения и военной техники, рост значений их тактико-технических характеристик повышает требования к экспериментальной базе по обеспечению возможностей проведения проверок опытных образцов с требуемой точностью, достоверностью и оперативностью. Перспективным направлением развития является разработка комплексов средств автоматизации полигонных испытаний, включающих средства телекоммуникационного обмена данными между источниками измерительной информации, испытываемыми образцами вооружения и военной техники и средствами автоматизации полигонных испытаний [1]. Кроме того, при проектировании, разработке и эксплуатации сложных автоматизированных систем (АС), в том числе военного назначения, нередко возникают задачи полунатурного моделирования, когда элементы сложной системы разделяются на две группы: часть структурных элементов сложной системы представлена реальными аппаратными

средствами, а недостающая часть должна быть воспроизведена имитационно [2]. Частичная замена составных частей сложной АС имитационными элементами может применяться:

— при проведении испытаний системы на эффективность по основному назначению, когда натурный эксперимент не может быть реализован в полном объеме из-за отсутствия отдельных элементов;

— для отладки программного обеспечения (ПО) опытных образцов АС, при необходимости оценки функционирования при предельных или трудно сочетаемых значениях отдельных характеристик;

— при замене (изъятии) структурных элементов в процессе функционирования АС для ремонта, доукомплектования или модернизации;

— при модернизации функций системы, требующей уточнения содержания и структуры протоколов обмена информацией.

В этой ситуации существенно упрощаются операции по отладке подсистемы управления, сопряжению составных элементов как на этапе пуско-наладочных работ, так и в ходе испытаний, а также сокращаются затраты на их проведение. Данный подход положен в основу метода полунатурных испытаний [2] и опытно-теоретического метода оценки эффективности сложных систем вооруже-

¹ Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент, начальник отдела — заместитель начальника управления НИИИ РЭБ Военно-воздушной академии им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина И. В. Зайцев.

ния [3], теоретические положения которого описаны в работах [4, 5]. Ключевым фактором, определяющим их применимость, является знание структуры исследуемой автоматизированной системы [6], т. е. состава элементов (подсистем), их функций, внутренних и внешних связей, их характера, а также степени влияния операций, выполняемых элементами и подсистемами, на функционирование системы в целом. Преимуществом данных методов является возможность оценки как отдельных характеристик элементов испытываемой системы, так и характеристик системы в целом с одновременным решением задачи рационального планирования натуральных экспериментов [1].

Во многих случаях ПО имитации структурных элементов АС реализуется, как правило, разработчиками тех же структурных элементов. Также возможны ситуации, когда разработка основного ПО и имитаторов может осуществляться независимо друг от друга с использованием имеющихся протоколов, определяющих структуру, правила и способы обмена информацией в автоматизированной системе [3]. Все это повышает материальные затраты при разработке, а также снижает эффективность работы различных коллективов разработчиков, поскольку требует дополнительного этапа стыковки и отладки ПО имитаторов.

Целью данной работы является разработка метода автоматического формирования телекоммуникационных модулей, имитирующих недостающие информационные связи структурных элементов АС, гибко конфигурируемых в зависимости от условий применения и формата обмена данными. В результате его применения повышается уровень автоматизации процесса испытаний или пуско-наладочных работ АС, а также упрощается оценка значений характеристик АС.

Имитация структурных элементов АС

Взаимосвязи структурных элементов в АС формируются путем сопряжения взаимодействующих объектов друг с другом. Технической основой этого процесса является использование единых требований по обеспечению организационной, технической, программной и информационно-лингвистической совместимости при организации взаимодействия между сопрягаемыми объектами с применением протоколов, определяющих структуру, правила и способы обмена информацией в АС.

При отсутствии отдельных структурных элементов их информационные потоки могут быть воспроизведены с использованием имитатора, реализованного на ЭВМ и имитирующего структуру и процесс функционирования недостающего элемента. Наличие такого имитатора повышает

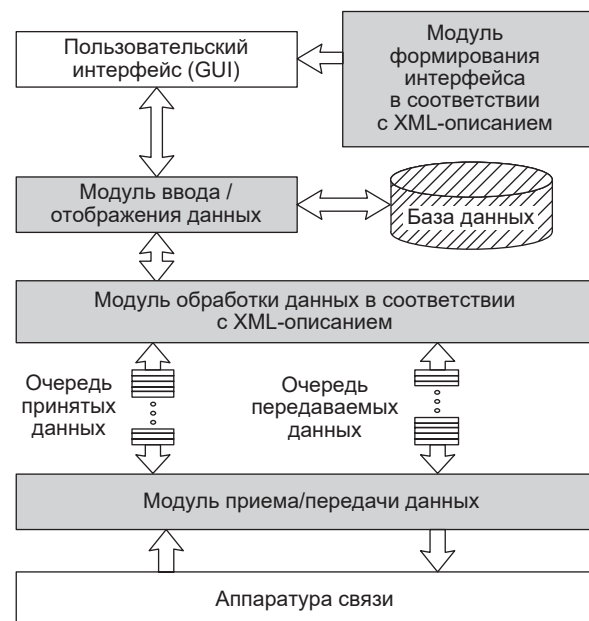
гибкость в выборе условий проведения испытаний, упрощает ограничения в наборе статистического материала. При моделировании появляется возможность многократно повторять реализацию при близких значениях входных данных, что трудно осуществить при проведении сложных натуральных экспериментов.

Для эффективного функционирования имитатора важным фактором является воспроизведение недостающих информационных связей, как правило, формируемых вручную для каждого вновь разрабатываемого ПО имитатора, что при наличии объемного и высокоструктурированного протокола информационно-технического сопряжения является трудоемкой задачей и требует выполнения отдельных операций по отладке и стыковке взаимодействующих элементов.

Для повышения эффективности разработки ПО имитаторов может применяться метод, позволяющий автоматически формировать модули имитации структурных элементов АС.

Необходимо учитывать, что особенности программной реализации имитатора зависят от функций, выполняемых АС, и для систем различного функционального назначения существенно отличаются друг от друга, при этом независимо от назначения можно выделить в них общие модули, участвующие в процессе обмена информацией и вводе/отображении данных (рис. 1).

Сущность предлагаемого метода заключается в автоматическом формировании телекоммуникационных модулей, воспроизводящих функционирование недостающих структурных элемен-



■ **Рис. 1.** Телекоммуникационный модуль имитации недостающих информационных связей структурного элемента АС

тов АС. Для их автоматического формирования используется унифицированный программный модуль и XML-описание, соответствующее заданному формату обмена данными.

В соответствии с приведенной структурой программы при ее функционировании должно обеспечиваться:

- формирование интерфейса ввода и отображения данных;
- подготовка исходных данных для отправки путем заполнения соответствующих полей базы данных как в ручном, так и в автоматизированном режимах;
- передача сообщений информационного обмена вручную и (или) автоматически в соответствии с алгоритмом функционирования;
- автоматический прием и отображение поступающей информации;
- настройка параметров канала связи и характеристик сетевого (транспортного) уровня.

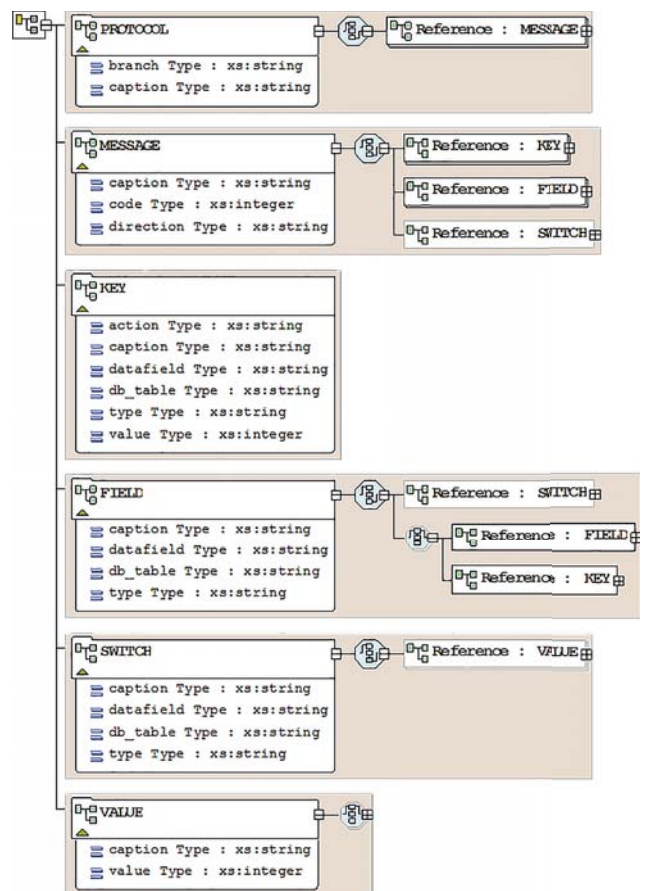
Программная реализация предлагаемого метода формирования модулей имитации структурных элементов АС выполнена в интегрированной среде разработки Borland Developer Studio [7]. Дальнейшим развитием данного метода является создание программного компонента, позволяющего автоматически формировать интерфейс коммуникационного модуля в соответствии с имеющимся описанием.

Данный подход наиболее эффективно реализуется при использовании среды разработки Eclipse на языке Java, в которой возможно в ходе исполнения программы гибко формировать [8] структурированный интерфейс с различными элементами управления: полями ввода данных, радиокнопками, кнопками-флажками, таблицами и др. Однако в данном случае требуется изменить исходный код с языка C++ на язык Java, что, с одной стороны, является трудоемкой операцией, с другой стороны, расширяет гибкость использования разработанной программы и позволяет воспользоваться кроссплатформенностью языка Java и не ограничиваться рамками операционной системы Windows, а иметь возможность запускать разработанную программу в любой современной операционной системе, поддерживающей работу в виртуальной машине Java.

Основой для формирования модулей является использование унифицированного описания протоколов обмена данными в формате XML (eXtensible Markup Language). С помощью XML-описания автоматически генерируется интерфейс ввода/отображения принимаемой и передаваемой информации, а также чтение и запись в базу данных. Использование XML-формата обуславливается его удобством для описания информации, имеющей заранее определенную структуру. Унифицированное описание данных

в формате XML также используется в технологии сериализации данных [9], которая в настоящем случае не может быть применима, поскольку предусматривает хранение данных в полях классов, описывающих форматы, типы и структуру данных. Однако данные классы разрабатываются на этапе написания программного кода и не позволяют гибко изменять форматы и типы данных во время эксплуатации имитационных модулей, требуя перекомпиляции программы. В качестве альтернативы предлагается метод, основанный на описании структуры и формата передаваемых данных без учета особенностей программной реализации конкретных объектов.

Для задания форматов и содержания сообщений протокола информационного обмена используется XML-описание, структура которого в виде диаграммы XSD представлена на рис. 2. На верхнем уровне располагается элемент *protocol*, включающий в себя совокупность элементов *message*, каждый из которых соответствует отдельному информационному сообщению. В состав каждого сообщения входят элементы двух видов — *key* и *field*, соответствующие ключевым и информационным полям таблиц базы данных. Элементы



■ Рис. 2. XSD-диаграмма обобщенного описания протокола информационного обмена

Элемент	Атрибуты и их значение
<i>protocol</i>	<i>branch</i> — наименование автоматизированной системы <i>caption</i> — наименование протокола обмена
<i>message</i>	<i>caption</i> — наименование сообщения <i>code</i> — код/идентификатор сообщения <i>direction</i> — вид сообщения (входящее, исходящее, двунаправленное)
<i>key/field</i>	<i>caption</i> — наименование поля <i>db_table</i> — наименование таблицы базы данных <i>datafield</i> — наименование поля в таблице базы данных <i>type</i> — тип поля (целое, вещественное, дата и время, строка, составной тип, счетчик) <i>value</i> — значение, указанное в XML-описании (используется в сочетании с атрибутом <i>action</i> , равным <i>default_value</i>)
Только для элемента <i>key</i>	<i>action</i> — действие при чтении/записи значения поля: <i>increment</i> — увеличение счетчика <i>read_from_data</i> — чтение из принятых данных <i>get_DT</i> — запись даты, времени создания сообщения <i>default_value</i> — запись значения, заданного в XML-описании
<i>switch</i>	Селектор выбора элемента XML-описания в зависимости от значения дочернего элемента <i>value</i> , аналог поля <i>field</i> , содержащего целое значение <i>caption</i> — наименование поля <i>db_table</i> — наименование таблицы базы данных <i>datafield</i> — наименование поля в таблице базы данных <i>type</i> — тип поля (для элемента <i>switch</i> используются только целочисленные поля — 1, 2, 4 байта и т. д.)
<i>value</i>	<i>caption</i> — наименование поля <i>value</i> — значение, соответствующее сохраненному в поле <i>datafield</i> таблицы <i>db_table</i> элемента <i>switch</i> и определяющее использование последующих элементов XML-описания

field имеют структуру, определяемую форматом передаваемых данных, и в случае вложенных сообщений включают те же элементы — *key* и *field*. Информационный обмен ведется сообщениями, законченными в смысловом отношении и имеющими произвольную длину. Структура сообщений определяется соответствующими протоколами информационного сопряжения.

Значение атрибутов каждого элемента приведено в таблице.

При формировании XML необходимо учитывать следующее:

- структура описания должна строго соответствовать формату протокола обмена;

- наименования таблиц и полей должны совпадать с соответствующими таблицами и полями базы данных;

- первоначально приводится информация о ключевых полях таблицы базы данных, далее — поля данных;

- при записи принимаемой информации в базу данных сначала пишутся ключевые поля, далее для той же записи сохраняются все оставшиеся поля значений;

- при наличии вложенных данных запись значений ключевых полей осуществляется поэтапно в соответствии с иерархией в порядке: ключевые поля и поля данных (при наличии)

главной таблицы, ключевые поля и поля данных (при наличии) подчиненной таблицы и т. д.;

— значения ключевых полей таблиц могут формироваться как автоматически, так и считываться из принимаемых данных.

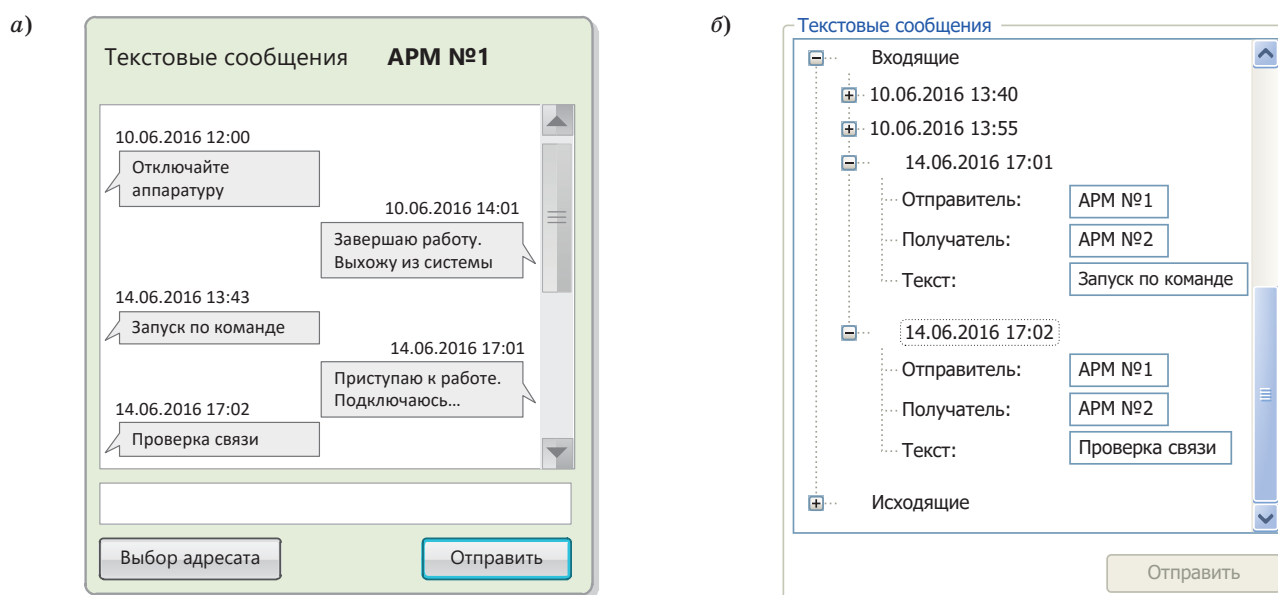
В качестве примера приведено XML-описание текстового сообщения, передаваемого по каналу связи в формате:

Отправитель	Получатель	Текст

имеющее вид

```
<message caption="Текстовое сообщение" code="30">
  <key action="get_DT" caption="" datafield="DT" db_
table="messages" type="DT"/>
  <key caption="Вид сообщения" datafield="type" type="int"
action="default_value" db_table="messages" value="0"/>
  <field caption="Отправитель" datafield="from" db_
table="messages" type="text"/>
  <field caption="Текст" datafield="text" db_table="messages"
type="text"/>
</message>
```

Помимо описания непосредственно информационных полей, здесь также применяются дополнительные элементы *key* для задания ключевых полей «дата, время» и «вид сообщения».



■ **Рис. 3.** Пример интерфейса ввода/просмотра текстовых сообщений: *а* — спроектированного на этапе разработки программы; *б* — автоматически сформированного в процессе функционирования

Для обозначения элементов XML-описания протокола далее будут применяться следующие наименования:

Message — элемент (узел дерева XML), соответствующий отдельному сообщению;

Node — текущий элемент;

ChildField — дочерний элемент, подчиненный текущему.

Ввод и отображение данных могут быть реализованы с использованием как заранее подготовленного интерфейса, так и динамически формируемого при открытии соответствующего окна. Первый вариант предпочтителен, если разрабатываются имитаторы для имеющегося формата данных либо возможные изменения будут минимальными. Интерфейс в данном случае является более эргономичным и проработанным в деталях, что повышает удобство применения и улучшает внешний вид, а также упрощает работу, поскольку ряд информационных полей может быть скрыт от ввода, и значения для них будут формироваться автоматически. Второй вариант может реализовываться на этапе отладки взаимодействия элементов АС, проведении стыковочных работ. Здесь применяются наиболее общие элементы управления и простая структура построения окон, вопросы удобства и эргономичности учитываются в минимальном объеме. Возможные варианты реализации интерфейса с применением указанных подходов показаны на рис. 3. Видно, что необходимый функционал обеспечивается в обоих случаях, однако во втором варианте интерфейс перегружен однотипными элементами, добавляющими избыточность, а также требуется ввод всех

полей информационного сообщения, в том числе тех, которые могут заполняться автоматически.

Формирование выходных данных

Конкретное содержание и принцип формирования значений информационных полей зависит от задачи, для решения которой используется имитатор. Возможные варианты значений полей могут быть:

- введены оператором вручную;
- загружены из базы данных в соответствии с заранее заданным контрольным примером;
- сгенерированы случайно, в пределах допустимых значений.

Для первых двух вариантов значения полей должны обеспечивать конкретное смысловое содержание передаваемых сообщений для программной совместимости при взаимодействии между объектами в штатном режиме. Третий вариант наполнения может быть использован при передаче потока требуемой информации с высокой интенсивностью для тестирования производительности канала связи или обработчика входных данных на приемной стороне.

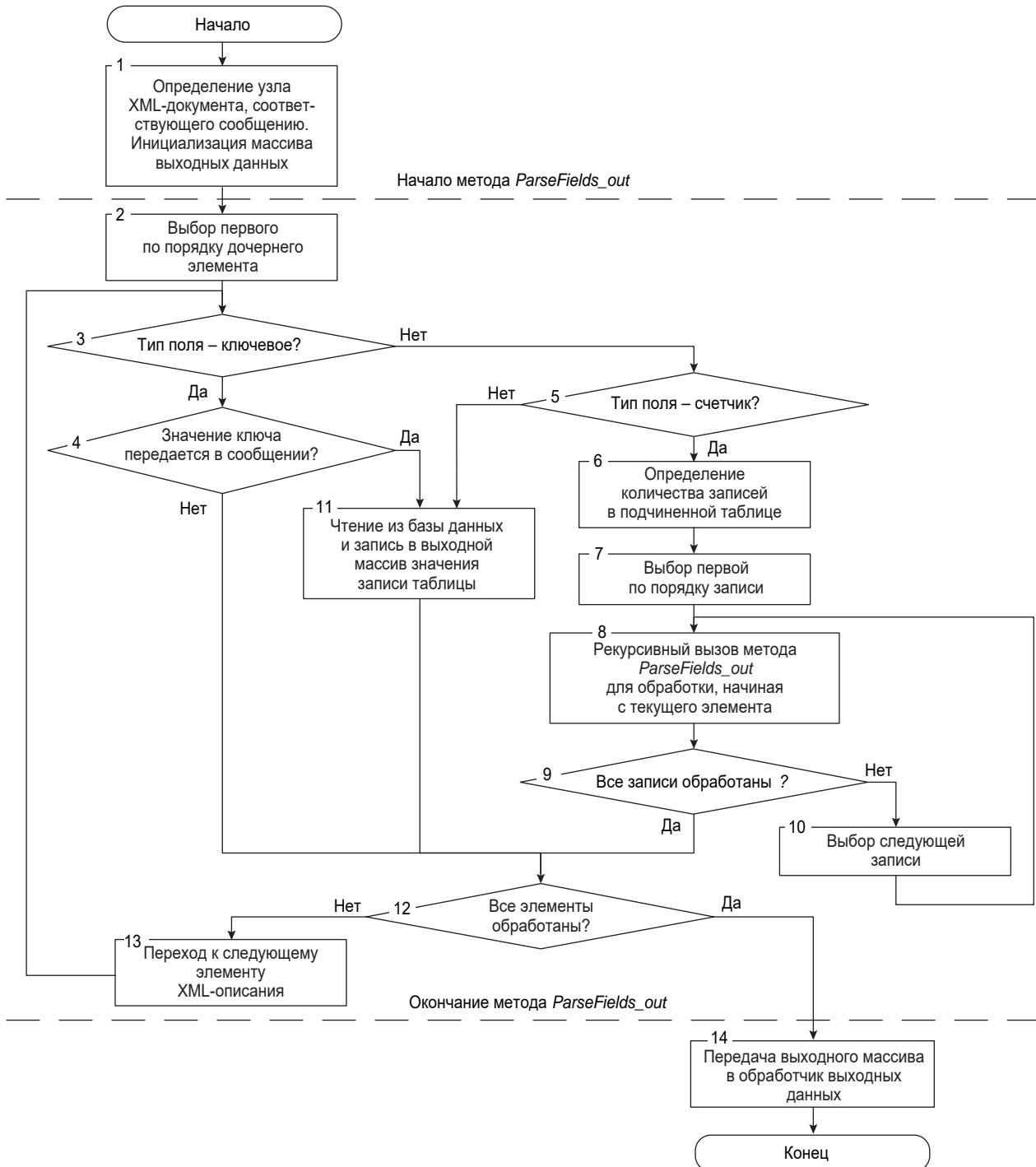
Информационные сообщения формируются путем преобразования записей базы данных в соответствии с форматом протокола. На основе XML-описания путем последовательного чтения записей из таблиц базы данных формируется выходной массив байтов, далее передаваемый в модуль обработки выходных данных для «упаковки» в формат транспортного и сетевого протоколов и последующей передачи по каналу связи.

Поскольку в самом общем случае сообщения имеют структуру произвольной степени вложенности, для обработки XML-описания используются рекурсивные вызовы соответствующих методов, позволяющие автоматически сформировать (обрабатывать при приеме) линейный набор данных в заданном формате.

Блок-схема алгоритма формирования выходного массива приведена на рис. 4. Фрагмент ал-

горитма, начиная с п. 2 и до п. 13 включительно, относится к методу *ParseFields_out*, формирующему массив выходных данных *byte* data*, описание которых соответствует заданному узлу *Node*. Алгоритм формирования массива передаваемых данных заключается в выполнении следующих операций.

1. Определяется узел XML-документа *MessageNode*, соответствующий отправляемому со-



■ Рис. 4. Алгоритм формирования массива выходных данных перед отправкой

общению. Инициализация массива выходных данных.

2. Выбор первого по порядку дочернего элемента *ChildField*.

3. Проверка вида элемента *ChildField* — ключевое поле (*key*) или поле данных (*field*). Если поле данных, переход к п. 6.

4. Проверка действия для ключевого поля — необходимо передавать в сообщении (для действия «чтение из данных» *read_from_data*) или нет (действия *increment*, *get_DT*, *default_value*). Если значение ключа не передается в сообщении, то переход к п. 11.

5. Проверка принадлежности поля данных к типу «счетчик». Если условие не выполняется, то переход к п. 11.

6. Определение количества записей *child_count* в подчиненной таблице.

7. Выбор первой по порядку записи.

8. Вызов метода *ParseFields_out* для обработки записей, начиная с текущего элемента *Node*.

9. Проверка завершения обработки всех записей подчиненной таблицы. Если условие выполняется, то переход к п. 12.

10. Выбор следующей записи в таблице, переход к п. 8.

11. Чтение значения поля *datafield* из соответствующей таблицы *db_table*, запись значения в массив выходных данных *data*.

12. Проверка условия обработки всех элементов XML-описания. Если условие выполняется, то переход к п. 14.

13. Выбор следующего элемента, переход к п. 2.

14. Передача выходного массива *data* в обработчик исходящих данных для последующей отправки, завершение работы алгоритма.

Сформированный массив *data* помещается в очередь на передачу данных, откуда извлекается непосредственно перед отправкой. Формирование пакетов для передачи по каналу связи в случае сети Ethernet осуществляется автоматически с использованием стандартных компонентов типа *TCPServer*, *TCPClient* и т. п.

В зависимости от специфики задач, решаемых имитатором, и выполняемых им функций, информационные сообщения могут передаваться:

- оператором вручную;
- автоматически, в ответ на сообщения, требующие реакции, либо немедленно, либо через заданный интервал времени;
- по заранее заданному расписанию либо в соответствии с алгоритмом функционирования;
- в случайном порядке для обеспечения загрузки канала связи.

Для заполнения информационных полей сообщений может использоваться информация, введенная заранее в базу данных либо сгенерированная случайным образом перед отправкой. При

имитации элементов системы, когда не требуется или невозможно обеспечить присутствие оператора, предпочтительно использовать автоматические варианты подготовки и отправки сообщений. При наличии оператора ручной или автоматический вариант выбирается по ситуации в соответствии с алгоритмами функционирования.

Обработка входных данных

При установленном соединении между объектами сообщения принимаются автоматически и поступают на обработку в очередь входящих данных. Принятая информация в соответствии с XML-описанием подвергается разбору по процедуре, схожей с выполняемой при отправке данных. Основным отличием является запись в базу данных в первую очередь ключевых полей для сохранения целостности записей, в последующем — запись значений недостающих полей записи, в отличие от поочередной обработки каждого поля, реализуемой при отправке. Блок-схема алгоритма обработки массива входных данных приведена на рис. 5. Фрагмент алгоритма, начиная с п. 2 и до п. 13 включительно, относится к методу *ParseFields_in*, формирующему массив принятых данных, описание которых соответствует заданному узлу *Node*.

Алгоритм обработки входных данных заключается в выполнении следующих операций.

1. Определение узла XML-документа *Message Node*, соответствующего принятому сообщению.

2. Выбор первого по порядку дочернего элемента *ChildField*.

3. Инициализация массива значений ключевых полей переменной длины *Variant* keys*.

4. Проверка вида элемента *ChildField* — ключевое поле (*key*) или поле данных (*field*). Если условие не выполняется, то переход к п. 11.

5. Проверка действия для ключевого поля — передается в сообщении (для действия «чтение из данных» *read_from_data*) или нет (действия *increment*, *get_DT*, *default_value*). Если значение ключа не передается в сообщении, то переход к п. 7.

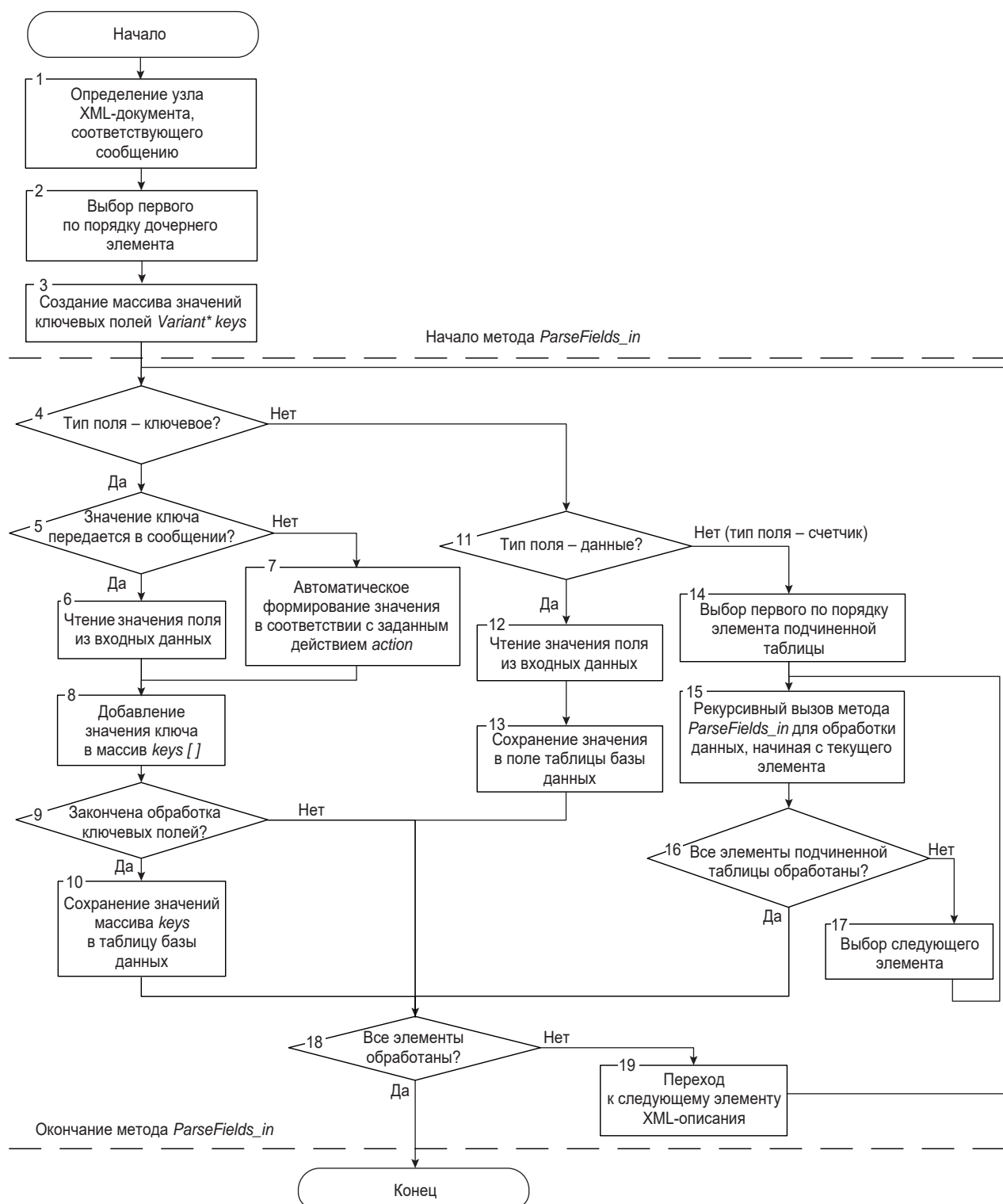
6. Чтение значения ключевого поля из принятых данных в соответствии с его типом *type*.

7. Автоматическое формирование значения ключевого поля в соответствии с заданным действием *action* (см. таблицу значений атрибутов XML-описания).

8. Добавление значения ключевого поля в массив *keys*.

9. Проверка условия окончания обработки всех ключевых полей. Если условие не выполняется, то переход к п. 18.

10. Добавление новой записи в таблицу *db_table*, сохранение значений массива *keys[]*.



■ Рис. 5. Алгоритм обработки входных данных

11. Проверка принадлежности поля *datafield* к типу «данные». Если условие не выполняется, то переход к п. 14.

12. Чтение значения из входных данных в соответствии с его типом.

13. Сохранение значения в поле *datafield* таблицы базы данных *db_table*, затем переход к п. 18.

14. Выбор первого по порядку элемента подчиненной таблицы.

Литература

1. Буренок В. М., Найденов В. Г. Требуется модернизация полигонов // Воздушно-космическая оборона. 2009. № 4. С. 32–39.
2. Молев А. А., Зайцев И. В. Применение агрегативного подхода к моделированию элементов радиоэлектронных систем при проведении опытно-теоретических исследований их эффективности // Имитационное моделирование. Теория и практика: сб. докл. Второй Всерос. науч.-практ. конф. ИММОД-2005. Т. 1. СПб.: ЦНИИТС, 2005. С. 143–147.
3. Шестихин В. И., Салтанов П. Я., Якубовский С. В. Опытнo-теоретический метод испытаний системы предупреждения о ракетном нападении // Военная мысль. 2015. № 6. С. 37–41.
4. Шаракшанэ А. С., Железнов И. Г., Ивницкий В. А. Сложные системы. — М.: Высш. шк., 1977. — 247 с.
5. Бусленко В. Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. — М.: Наука, 1977. — 240 с.
6. Савин Г. И. Системное моделирование сложных процессов. — М.: ФАЗИС; ВЦ РАН, 2000. — 276 с.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016617747 от 14.07.2016. Унифицированный модуль имитации структурных элементов автоматизированных систем / Молев А. А., заявл. 24.05.2016 г.; опубл. 20.08.2016 г., Бюл. № 8. — 1 с.
8. Хемрадхани А. Гибкая разработка приложений на Java с помощью Spring, Hibernate и Eclipse: пер. с англ. — М.: Вильямс, 2008. — 352 с.
9. Хорстманн К., Корнелл Г. Java 2. Библиотека профессионала. 9-е изд. Т. 1. — М.: Вильямс, 2015. — 864 с.

UDC 681.518

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.40

XML-based Method for Automatic Formation of Telecommunication Modules of Structural Elements in Automated System

Molev A. A.^a, Post-Graduate Student, aadm@mail.ru^aMilitary Education-Science Center of Military Air Forces «Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Military Air Academy», 54A, Staryh Bolshevnikov St., 394064, Voronezh, Russian Federation

Introduction: During the design, development and operation of complex automated systems, including military ones, certain problems often arise when the elements of a complex system are split into two groups. One part is represented by real hardware, and the missing part should be reproduced by simulation. **Purpose:** We develop a method to automatically generate telecommunication modules which simulate the missing informational links between the structural elements of automated systems, flexibly configurable depending on the application and the data exchange format. **Results:** A method is proposed for the simulation of informational links between structural elements. The structure of a unified simulation software units is discussed. The common modules are specified which take part in the communication and data input/output. The requirements are formulated for the XML unified description of the information exchange. The algorithms for processing the input and output data are developed, based on the recursive implementation of the processing operations in accordance with the description format. General charts are provided for data reception and processing. The software was made in Borland Developer Studio IDE using C++ language. **Practical relevance:** The developed method can be used to simulate missing informational links of automated systems in the course of testing the main-purpose efficiency or commissioning work, as well as in cases when it is necessary to obtain extreme or difficult to combine values of individual characteristics of an automated system or its components.

Keywords — Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulation, Automated Systems, Simulation of Structural Elements, Informational Links, XML Format.

References

1. Burenok V. M., Naidenov V. G. Modernization of Polygons is Required. *Vozdushno-kosmicheskaja oborona*, 2009, no. 6, pp. 32–39 (In Russian).
2. Molev A. A., Zaitsev I. V. Application of Aggregative Approach to Modeling Elements of Electronic Systems During the Development of Theoretical Studies of Their Effectiveness. *Sbornik dokladov Vtoroi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii IMMOD-2005* [Proc. 2nd Rus. Conf. "Simulation Modeling. Theory and Practice IMMOD-2005"]. Saint-Petersburg, 2005, vol. 1, pp. 143–147 (In Russian).
3. Shestikhin V. I., Saltanov P. Ia., Iakubovskii S. V. Experimental and Theoretical Warning System Test Method of Missile Attack. *Voennaia mysl'*, 2015, no. 6, pp. 37–41 (In Russian).
4. Sharakshane A. S., Zheleznov I. G., Ivnickii V. A. *Slozhnye sistemy* [Complex Systems]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1977. 247 p. (In Russian).
5. Buslenko V. N. *Avtomatizatsiia imitatsionnogo modelirovaniia slozhnykh sistem* [Automation Simulation of Complex Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 240 p. (In Russian).
6. Savin G. I. *Sistemnoe modelirovanie slozhnykh protsessov* [System Modeling of Complex Processes]. Moscow, FAZIS; VTs RAN Publ., 2000. 276 p. (In Russian).
7. Molev A. A. *Unifitsirovannyi modul' imitatsii strukturnykh elementov avtomatizirovannykh sistem* [Unified Simulation Module of the Structural Elements of the Automated Systems]. Program RF, no. 2016617747, 14.07.2016.
8. Hemrajani A. *Agile Java Development with Spring, Hibernate and Eclipse*. Sams Publishing, 2006. 360 p.
9. Horstmann C. S., Cornell G. *Core Java*. Vol. I. *Fundamentals*. 9th Ed. Prentice Hall, 2012. 1008 p.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ НЕЗАВИСИМЫХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ СУБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ КВАДРАТИЧНЫХ ФОРМ, ПЕРСЕПТРОНОВ И МЕРЫ ХИ-МОДУЛЬ

А. Е. Сулавко^а, канд. техн. наук, старший преподаватель

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

Е. В. Толкачева^б, канд. техн. наук, доцент

Р. В. Борисов^в, аспирант

^аОмский государственный технический университет, Омск, РФ

^бОмский государственный университет путей сообщения, Омск, РФ

^вСибирская государственная автомобильно-дорожная академия, Омск, РФ

Постановка проблемы: статические биометрические образы не являются секретными и могут быть скопированы для изготовления физического или электронного муляжа незаметно для владельца, поэтому идет процесс поиска эффективных решений для аутентификации субъектов по динамическим биометрическим признакам. **Цель исследования:** разработать более надежные способы однофакторной и многофакторной биометрической аутентификации в пространстве малоинформативных признаков. **Результаты:** проведена серия вычислительных экспериментов на основе биометрических данных подписи, клавиатурного почерка, лица и голоса субъектов с использованием сетей персептронов, квадратичных форм и функционалов хи-модуль. Предложено адаптировать алгоритм обучения персептронов из ГОСТ Р 52633.5-2011 для настройки сетей квадратичных форм. Удалось достичь количества ошибок верификации образа субъекта по подписи около 1 %, клавиатурному почерку и подписи — 0,31 %, лицу — менее 0,5 %, лицу совместно с клавиатурным почерком — менее 0,1 %, а также трех- и четырехфакторной верификации образов субъектов порядка 0,54–0,01 %. **Практическая значимость:** методы двух- (без образов голоса), трех- и четырехфакторной верификации образов субъектов, рассмотренные в работе, можно использовать на практике при реализации контрольно-пропускной функции или удаленной аутентификации. Подделку признаков более двух видов образов на практике можно считать неосуществимой.

Ключевые слова — параметры подписи, клавиатурный почерк, характеристики голоса, физиологические особенности лица, биометрия, искусственные нейронные сети, квадратичные формы, алгоритмы распознавания образов.

Введение

Мы переживаем период глобальной технологической революции. Происходит формирование новых инновационных рынков и их активное освоение: человеко-машинные коммуникации, новые методы получения энергии, беспилотные наземные и летательные аппараты и другие, среди которых одним из ключевых становится рынок информационной безопасности. В соответствии с Национальной технологической инициативой (НТИ) — долгосрочной комплексной программой по созданию условий для обеспечения лидерства российских компаний на новых высокотехнологичных рынках — важное место в мировом масштабе занимают защищенные компьютерные технологии и решения в области безопасности информационных и киберфизических систем. К основным проектам НТИ в сфере информационной безопасности относятся:

— мультимодальная биометрия для системы управления персональными данными;

— система биометрического контроля и аутентификации;

— национальная биометрическая платформа;

— биометрическая аутентификация и цифровая подпись в доверенной среде.

Важность биометрических технологий подтверждается тенденцией их широкомасштабного внедрения. По данным глобального исследования рынков информационной безопасности, проведенного PricewaterhouseCoopers, на октябрь 2016 года 57 % руководителей предприятий установили биометрические системы аутентификации для защиты корпоративных ресурсов [1].

Поиск новых эффективных методик биометрической аутентификации обусловлен недостатками разработанных решений: статически биометрические признаки (отпечатки пальца, сетчатки, радужки; геометрия руки) допускают возможность изготовления муляжа, не являются секретными и не позволяют реализовать процедуру скрытой идентификации субъекта. Поэтому усилия многих исследователей сконцентрированы на развитии других биометрических технологий, в частности на базе динамических признаков рукописных, голосовых образов, лица и клавиатурного почерка. Основным их недостаток заключается в более низкой надежности, которая определяется вероятностью ошибок

1-го и 2-го рода — ложного отказа в доступе «Своему» (FRR — False Reject Rate) и ложного доступа «Чужого» (FAR — False Acceptance Rate).

Цель проведенного в настоящей работе исследования — разработка более надежных способов однофакторной и многофакторной биометрической аутентификации в пространстве малоинформативных признаков.

Биометрические признаки

Перспективным направлением повышения надежности процедур биометрической аутентификации является комплексирование биометрических признаков, получаемых по независимым каналам. В работе рассматриваются следующие независимые группы признаков:

- 1) особенности воспроизведения и внешнего вида подписей;
- 2) физиологические особенности лица;
- 3) характеристики клавиатурного почерка;
- 4) параметры голоса диктора.

Для этой цели использовалась база следующих биометрических образцов, полученных от каждого из 60 испытуемых: не менее 50 образцов подписи (автографа), не менее 50 образцов парольной фразы «авторизация пользователя компьютерной системы», 10-минутная аудиозапись голоса при произношении произвольного текста (стихотворения, чтение новостных лент), видеозапись диалога с испытуемым длительностью 30–60 с. Образцы подвергались статистической обработке, в результате которой из каждого образца вычислялся вектор значений признаков, краткое описание которых приводится в табл. 1 и далее по тексту.

Особенности воспроизведения и внешнего вида подписей

Перед вычислением вектора значений признаков подпись нормируется по алгоритму на основе прямого и последующего обратного преобразования Фурье [2]. В качестве биометрических признаков решено использовать характеристики

■ Таблица 1. Биометрические признаки субъектов

№	Краткое описание группы признаков	Количество
1.1	Нормированные по энергии амплитуды 16 самых низкочастотных гармоник функций давления $p(t)$ и скорости пера $v_{xy}(t)$	32
1.2	Коэффициенты корреляции между функциями $x(t)$, $y(t)$, $p(t)$	15
1.3	Расстояния между некоторыми точками подписи в трехмерном пространстве (точки выбираются равномерно с некоторым шагом, далее находятся расстояния между всеми парами этих точек, третье измерение — давление пера на планшет)	120
1.4	Значения функций $x(t)$, $y(t)$, $p(t)$ и $v_{xy}(t)$ в некоторых точках	64
1.5	Некоторые характеристики изображения подписи: отношение длины подписи к ее ширине, центр подписи, угол наклона подписи, угол наклона между центрами половин подписи	5
1.6	Коэффициенты вейвлет-преобразований Добеши по базису D6 функций $v_{xy}(t)$ и $p(t)$	134
2.1	Расстояния между глазами, правым (левым) глазом и центром лица, правым (левым) глазом и кончиком носа, правым (левым) глазом и центром рта, центром рта и лица, кончиком носа и центром рта, центром рта и кончиком носа (в пикселях, значения нормировались по длине диагонали области лица в кадре)	10
2.2	Площади глаз, носа, рта (в пикселях, значения нормировались по площади лица)	4
2.3	Коэффициенты корреляции яркости и цветовых составляющих пикселей (в соответствии с моделью RGB) между всеми парами следующих областей лица: глаз, носа, рта	24
2.4	Цветовые составляющие в модели RGB и яркость глаз и кожи	8
3.1	Временные задержки удержания клавиш	L
3.2	Временные задержки между нажатием клавиш	$L - 1$
4.1	Характеристики интегральной частоты фрагментов речевого сигнала (нулевой форманты)	20
4.2	Характеристики интегральной частоты переходов речевого сигнала через огибающую энергии	20
4.3	Частотные характеристики уровня положительного давления	20
4.4	Частотные характеристики уровня отрицательного давления	20
4.5	Коэффициенты корреляции характеристик интегральной частоты сигнала и переходов речевого сигнала через огибающую энергии	20
4.6	Коэффициенты корреляции частотных характеристик уровня положительного и уровня отрицательного давления	20

[2], дополненные коэффициентами вейвлет-преобразования Добеши D6 (см. табл. 1), получаемыми при анализе подписей из нормированных по длительности функций скорости и давления пера на устройство ввода на уровнях разложения с 4-го по 6-й из работы [3]. В проведенных исследованиях [3] рассматривались различные базисы вейвлетов Добеши (от D4 до D10 [4]), при использовании вейвлета D6 получен достаточный по точности результат при приемлемой скорости преобразования. Основная доля мощности сигнала сосредоточена в коэффициентах, вычисляемых на уровнях разложения с 4-го по 6-й (частотный диапазон 1,5625÷12,5), так как они почти соответствуют диапазону частот колебаний руки подписанта (0,1÷10 Гц) [5] и, следовательно, являются информативными. Физический смысл коэффициентов вейвлет-преобразования, полученных в результате многомасштабного анализа, можно трактовать как характеристики гармоник сигнала, принадлежащих определенному частотному диапазону и возникающих в сигнале в определенный момент времени [3].

Физиологические особенности лица

В результате анализа видеозаписей с испытуемыми (длительность каждой записи составляла 30–60 с, частота 15–25 кадров в секунду, разрешение 480×360 пикселей, субъект обращен лицом к камере, расстояние до камеры 1–2 м, повороты головы не более 40 град) были получены изображения лиц (не менее 450 изображений на каждого субъекта). Далее каждое изображение преобразовывалось в вектор значений признаков, многие из которых использовались в работе [6] (площади глаз, носа, рта, расстояния между ними, коэффициенты корреляции между цветами пикселей в модели RGB для перечисленных выше участков), а также признаки, характеризующие цвет глаз и кожи в модели RGB (см. табл. 1). Для выделения признаков использовался метод Виолы — Джонса [7] и алгоритм обнаружения окружностей на основе преобразования Хафа [8].

Характеристики клавиатурного почерка

Методы распознавания по клавиатурному почерку основаны на том, что оператор запоминает удачные решения задачи набора текста на клавиатуре путем их многократных повторений [5, 9]. Программа управления мышцами откладывается в подсознательной сфере и реализуется автоматически [5, 9].

В настоящей работе вектор значений признаков клавиатурного почерка формировался непосредственно из регистрируемых временных задержек между нажатием клавиш и длительностей их удержания. Информативность парольной фразы в данном случае напрямую зависела от ее

длины L , т. е. количества содержащихся в ней символов. При выборе парольной фразы и отборе испытуемых учитывались следующие принципы:

- признаки характеризуют оператора (т. е. информативны), если субъект имеет выработанный клавиатурный почерк;

- длинные парольные фразы сложно запомнить (велика вероятность ошибки при наборе фразы на клавиатуре).

По некоторым оценкам, время становления почерка работы с клавиатурой составляет около 6 месяцев [9] (желательно, чтобы скорость набора текста на клавиатуре была не менее 100 символов в минуту [9]), а парольная фраза должна содержать от 21 до 42 нажатий на клавиши [5].

Параметры голоса диктора

Из работы [10] следует, что, используя признаки, получаемые из фрагментов произвольной непрерывной речи, удалось добиться меньшей вероятности ошибок генерации ключевых последовательностей, чем из признаков, вычисляемых по фиксированным коротким фразам (или словам). Поэтому в данной работе применен подход к выделению признаков на основе анализа непрерывной речи.

Аудиозаписи голосов субъектов дискретизированы со следующими параметрами: размер аудиообразца 8 бит (256 уровней квантования), частота дискретизации ν_d 8000 Гц. Выбор значения первого параметра обусловлен стремлением минимизировать объем аудиообразца и субъективными оценками аудитории, которыми распознавались записанные голоса: распознавание было однозначно удовлетворительным, не отличалось от записей аудиообразца размером 16 бит (65 536 уровней квантования). Второй параметр задавался исходя из диапазона частот, занимаемых речевым сигналом (до 4000 Гц), в соответствии с теоремой Котельникова о дискретизации сигнала: дискретное кодирование без потерь для непрерывного сигнала из диапазона до определенной частоты возможно при его дискретизации с удвоенной частотой. Каждая аудиозапись делилась на фрагменты Z_k , которые преобразовывались в векторы значений признаков. Помимо признаков из работы [10], описывающих нулевую форманту, вычислялись характеристики интегральной частоты переходов сигнала через огибающую энергии, частотные характеристики уровня положительного и отрицательного давления, коэффициенты корреляции характеристик интегральной частоты сигнала (нулевой форманты) и переходов речевого сигнала через огибающую энергии, а также частотные характеристики уровня положительного и отрицательного давления. Опишем данный процесс подробнее.

Для вычисления векторов значений признаков исходный дискретный сигнал Y был разбит на интервалы Y_i по $0,025$ с со сдвигом $\tau_{OT}=0,0125$ с. Значение $0,025$ с объясняется частотой основного тона (ОТ), обусловленной частотой вибраций голосовых связок (80 Гц). Частота ОТ ν_{OT} является наименьшей значимой частотой спектра голосового сигнала $\min(OT)$. Длина интервала выбрана в два раза больше периода $\min(OT)$, чтобы в отдельный интервал поместился минимум один период ОТ. Длина сдвига была равной периоду $\min(OT)$ для более точной локализации во времени изменений обрабатываемого сигнала.

Для каждого сигнала Y_i вычислено количество переходов через нулевой уровень. Для этого от значений отсчетов Y_i был вычтен уровень квантования 128, соответствующий нахождению мембраны микрофона в спокойном состоянии, — сформирован сигнал Y_i^{128} , имеющий положительные и отрицательные значения, сумма которых на интервале близка к нулю (не равна строго, так как интервал не содержит точного количества периодов ОТ). Возможно отклонение суммы получаемых отсчетов Y_i^{128} от нуля из-за активного выходящего воздушного давления, отклоняющего мембрану микрофона от спокойного состояния (звуковые колебания записываются уже на напряженную мембрану). На этот случай сделана поправка: определено его среднее $Y_i^{cp} = \sum_{j=0}^n (Y_{ij}^{128})$, где $n = \tau_{OT} \nu_d$, которое затем было вычтено (если $Y_i^{cp} > 0$) или добавлено (если $Y_i^{128} < 0$) к значению каждого отсчета сигнала Y_i^{128} . Таким образом, получены центрированные сигналы Y_i^0 . Каждому интервалу Y_i ставилось в соответствие количество переходов сигнала Y_i^0 через ноль — $T0(Y_i)$, вычисляемое по формуле

$$T0(Y_i) = \sum_{x=1}^n \left(y(x) = \begin{cases} 1, & Y_i^0(x-1) \cdot Y_i^0(x) < 0 \\ 0, & Y_i^0(x-1) \cdot Y_i^0(x) \geq 0 \end{cases} \right), \quad (1)$$

где $n = \tau_{OT} \nu_d$. Интервалы Y_i были сгруппированы в массивы, соответствующие фрагментам Z_k исходного 10-минутного сигнала. Каждому Z_k в соответствие ставится гистограмма относительных частот $G_k(T0(Y_i))$ значений $T0(Y_i)$, принадлежащих Z_k . Длительность Z_k подобрана исходя из влияния количества интервалов на сумму $\text{Sum}(G_k(T0(Y_i)))$ квадратов разниц столбцов гистограмм в соответствии с правилом $\text{Sum}(G_k(T0(Y_{i+1}))) - \text{Sum}(G_k(T0(Y_i))) < z$, где z — эмпирически определенный коэффициент. Чем выше длительность фрагмента речевого сигнала Z_k , тем точнее вычислялись значения признаков. Однако длительная процедура записи голосового сообщения неудобна для практики, поэтому решено взять $z = 0,03$, при этом длина фрагмента Z_k составляет 9–12 с. Совокупность значений столбцов

$G_k(T0(Y_i))$ является признаком k -го голосового образца Z_k .

Следующие использованные признаки — переходы сигнала Y_i^0 через уровень среднего значения модуля уровня сигнала U , характеризующего уровень энергии сигнала. Для каждого Y_i^0 вычислено $U_i^p = \sum_{x=0}^n (|Y_i^0(x)|)$, где n — количество отсчетов интервала Y_i^0 . Далее для каждого Y_i выполняется преобразование

$$TU^p(Y_i) = \sum_{x=1}^n \left(y(x) = \begin{cases} 1, & (Y_i^0(x-1) - U_i^p)(Y_i^0(x) - U_i^p) < 0 \\ 0, & (Y_i^0(x-1) - U_i^p)(Y_i^0(x) - U_i^p) \geq 0 \end{cases} \right). \quad (2)$$

Каждому Z_k аналогичным образом ставилась в соответствие гистограмма относительных частот $G_k(TU^p(Y_i))$. Отдельно строились гистограммы $G_k(TU^m(Y_i))$ для переходов сигнала Y_i^0 через отрицательную функцию $U_i^m = -U_i^p$, а также гистограммы $G_k(TU^{pm}(Y_i))$ относительных частот переходов через $+U$ и $-U$, вычисляемых как $TU^{pm}(Y_i) = TU^p(Y_i) + TU^m(Y_i)$.

Количество столбцов гистограмм $G_k(T0(Y_i))$, $G_k(TU^p(Y_i))$, $G_k(TU^m(Y_i))$ и $G_k(TU^{pm}(Y_i))$ влияет на количество признаков, эмпирически было определено и решено использовать по 20 столбцов для каждой гистограммы. Множество значений столбцов гистограмм вместе с коэффициентами корреляции между функциями $T0(Y_i)$ и $TU^p(Y_i)$, а также $TU^{pm}(Y_i)$ и $TU^m(Y_i)$ принималось за вектор значений признаков, характеризующих образ диктора. При непопадании вычисляемых величин в интервал гистограммы, что происходит по причине недостаточной длины фрагмента (образца) Z_k , значение соответствующего признака игнорировалось (исключалось из вектора значений признаков), так как в данном случае приравнивать относительную частоту к нулю некорректно.

Подходы к формированию решений

В работе [2] проведено сравнение подходов к генерации ключей (кодов), используемых для аутентификации, на основе биометрических данных подписей. Установлено, что нечеткие экстракторы [11–13] существенно уступают искусственным нейронным сетям перцептронов, квадратичных форм (сети Пирсона — Хемминга, Евклида — Хемминга) и функционалов, оценивающих близость к корреляционным связям образа (сеть Байеса — Пирсона — Хемминга) по надежности генерации ключа и другим параметрам. Поэтому в настоящей работе решено не применять технологии нечетких экстракторов и сконцентрировать усилия исключительно на сетях перцептронов и иных функционалов.

В ГОСТ Р 52633.5-2011 [14] рекомендовано использовать однослойные или двухслойные сети персептронов. Первый слой необходим для обогащения входных биометрических данных. Параметры законов распределения признаков не хранятся в исходном виде, вместо них хранятся веса входов нейронов, каждый вход связан с определенным признаком. Второй слой обычно используется для корректировки ошибок [2, 14, 15] и в настоящем исследовании не применялся. Значение функционала нейрона вычислялось по формуле

$$y = \sum_{i=1}^m \mu_i v_i + \mu_0, \quad (3)$$

где m — число входов; v_i — i -й вход нейрона; μ_i — весовой коэффициент i -го входа; μ_0 — нулевой вес, отвечающий за переключатель квантования (порог срабатывания), и далее сравнивалось с нулем. Каждый нейрон способен выдавать одно бинарное значение в зависимости от результата сравнения.

Веса нейронов считались детерминированно по формуле

$$\mu_i = |E_q(x_i) - E_c(x_i)| / \sigma_q(x_i) \sigma_c(x_i), \quad (4)$$

где $E_q(x_i)$ — математическое ожидание значений признака для образа «Чужой»; $\sigma_q(x_i)$ — их среднеквадратическое отклонение; $E_c(x_i)$ и $\sigma_c(x_i)$ — аналогичные показатели для образа «Свой». Операции по обучению сети персептронов по ГОСТ Р 52633.5 [14] более подробно описаны в стандарте, а также в работах [2, 15].

Вместо второго слоя нейронов для исправления ошибочных битов в настоящей работе применялись специальные коды, исправляющие ошибки, предложенные для биометрии [16]. Они позволяют безопасно хранить синдромы ошибок в виде усеченной хеш-функции вместе с параметрами сети. Коды [16] можно использовать для учета неравномерного распределения единичных ошибок (в отличие от классических самокорректирующихся кодов) и исправлять заданное количество бит, что удобней, чем использование второго слоя нейронов, и эффективнее классических кодов. В настоящей работе применялись однослойные сети с последующей корректировкой нестабильных битов кодами [16].

Другой способ распознавания субъектов может быть построен на использовании сетей квадратичных форм

$$y = (E(\bar{x}) - \bar{x})^T [\mathbf{R}]^{-1} (E(\bar{x}) - \bar{x}), \quad (5)$$

каждая из которых выдает бинарное значение. Здесь $E(\bar{x})$ — математическое ожидание вектора контролируемых биометрических параметров

в нормированной системе координат; $[\mathbf{R}]^{-1}$ — корреляционная матрица контролируемых биометрических параметров. Обращать корреляционные матрицы $[\mathbf{R}]^{-1}$ высокой размерности не удается (это плохо обусловленная задача) [17, 18]. Поэтому приходится вместо квадратичных форм использовать сети персептронов. Без учета корреляционной зависимости признаков классическая квадратичная форма равна метрике Пирсона [2, 18], тем не менее при построении сетей из этих метрик удается получить более высокие результаты по сравнению с сетями персептронов в задаче верификации автографов [2]. Классическую квадратичную форму можно выразить через взвешенную меру Евклида

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^m \mu_i (E(v_i) - v_i)^2}, \quad (6)$$

где $E(v_i)$ — математическое ожидание (среднее значение) i -го входа нейрона.

Для настройки весов функционалов (6) могут использоваться аналогичные алгоритмы, применяемые для настройки нейронных сетей. Итерационные алгоритмы обучения нейронных сетей не подходят для биометрии [2, 17], так как они не устойчивы. Поэтому для настройки сетей мер (6) использовался абсолютно устойчивый детерминированный алгоритм обучения из ГОСТ Р 52633.5 [14]. Если μ_i является равным соответствующему коэффициенту обратной корреляционной матрицы $[\mathbf{R}]^{-1}$, деленному на среднеквадратическое отклонение $\sigma(v_i)$ i -го входа нейрона, то взвешенная мера Евклида станет равной классической квадратичной форме (5). При $\mu_i = 1$ взвешенная мера становится обычной евклидовой мерой. В любом случае взвешенная мера Евклида работает гораздо лучше, в чем можно убедиться из результатов проведенного эксперимента.

Чтобы адаптировать алгоритм обучения ГОСТ Р 52633.5 [14] для настройки весовых коэффициентов сетей Евклида — Хемминга, перейдем к схожей мере, которая дает аналогичные результаты, но ее пороговое значение сложнее балансировать:

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^m \mu_i (E(v_i) - v_i)^2. \quad (7)$$

Выполнив замену квадрата отклонений признака от его математического ожидания на ξ , перейдем к классическому персептрон

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^m \mu_i \xi_i + \mu_0, \quad (8)$$

где $\xi_i = (E(v_i) - v_i)^2$; μ_0 — переключатель квантования.

Классический перцептрон можно обучить по ГОСТ Р 52633.5, вычислив весовые коэффициенты в соответствии с формулой

$$\mu_i = |E_q(\xi_i) - E_c(\xi_i)| / \sigma_q(\xi_i)\sigma_c(\xi_i), \quad (9)$$

где $E_q(\xi_i)$ — математическое ожидание квадрата отклонений значений признака от его математического ожидания для образа «Чужой»; $\sigma_q(\xi_i)$ — среднеквадратическое отклонение данных величин для образа «Чужой»; $E_c(\xi_i)$ и $\sigma_c(\xi_i)$ — аналогичные показатели для образа «Свой».

Выбор метода распознавания образов зависит от корреляционной зависимости между признаками, значения которых поступают на входы функционалов. Метрика Пирсона лучше работает с признаками, взаимная корреляционная зависимость которых незначительна (модуль коэффициента корреляции менее 0,3 [19]). Для перцептронов коэффициент корреляции между признаками не должен превышать 0,7 [17], так как в противном случае эффект накопления ошибок будет многократно усиливаться. В работе [20] показано, что на малых выборках биометрических данных погрешность оценки корреляции между признаками очень значительна. На практике нельзя требовать от пользователя вводить слишком много обучающих примеров (более 30–40) для настройки биометрической системы, так как это сделает процедуру обучения неприемлемо долгой (по требованиям ГОСТ Р 52633.5 [14] для обучения перцептронов достаточно 21 образца данных «Свой», при таком количестве наблюдаются погрешности при вычислении коэффициентов корреляции $\pm 0,65$ [20]). Поэтому подобрать признаки, коэффициент корреляции между которыми не превысит критических значений для определенного функционала, часто не удается и приходится использовать все признаки.

Результаты верификации образов сетями перцептронов, Евклида — Хемминга и сетями квадратичных форм (8) (взвешенных мер Евклида — Хемминга с обучением по ГОСТ Р 52633.5) решено также сравнить с получаемыми сетью метрик хи-модуль [18]:

$$\chi = \sum_{i=1}^m \frac{|E(v_i) - v_i|}{\sigma(v_i)}, \quad (10)$$

которая ведет себя схожим образом с мерой Пирсона [18], но при отсутствии признака в векторе значений проявляются существенные различия. Нейроны на основе функционалов (3) и (8) имеют нулевые пороговые значения, для нейронов на базе мер Евклида и хи-модуль оптимальные пороговые значения настраиваются эмпирически, исходя из откликов на обучающие примеры «Свой» при обучении и откликов на образы «Чужой»

в процессе проведения последующего вычислительного эксперимента (по аналогии с [2]). Независимо от функционала если во входном векторе отсутствуют какие-либо признаки (этому подвержены используемые в настоящем исследовании параметры голоса), то соответствующие входы нейрона игнорируются.

Экспериментальное сравнение рассматриваемых подходов при построении однофакторных и многофакторных биометрических систем

Проведен вычислительный эксперимент на основе имеющейся базы биометрических образов с использованием сетей перцептронов, Евклида — Хемминга, Евклида — Хемминга с обучением по ГОСТ Р 52633.5 и хи-модуль-сетей. Для формирования эталонов использовалось по 21 образу каждого субъекта (и по одному образу всех субъектов в качестве данных «Чужой» для обучения перцептронов). Остальные образы использовались для распознавания (генерации ключей). Вероятности ошибок 1-го и 2-го рода подсчитывались в следующем виде: $FRR = er_1/ex_1$, $FAR = er_2/ex_2$, где er — количество ошибок соответствующего рода; ex — количество опытов для выявления ошибки соответствующего рода. Проведена оценка взаимной корреляционной зависимости используемых признаков, исходя из которой различные сети могут работать по-разному (рис. 1 и 2). Конечный результат зависит также от количества и информативности признаков, которая определяется схожестью распределений значений признаков для одного субъекта и их различием для разных субъектов.

Результаты эксперимента представлены на рис. 3–6 и в табл. 2.

Отметим, что при увеличении числа нейронов сети N можно повышать надежность верификации, пока нейроны допускают различные ошибки (если их выходы не слишком коррелированы). При этом увеличивается длина генерируемого сетью ключа. Повышать длину ключа имеет смысл, пока его энтропия не перестанет возрастать [15].

Из рис. 3 видно, что вероятности ошибок верификации сетями квадратичных форм были значительны ($> 0,3$) для случая, когда на входы сети поступали признаки речи. Это обусловлено отсутствием некоторых голосовых признаков в векторе их значений. Сети перцептронов и метрик хи-модуль ведут себя иным образом. Для перцептрона (3) отсутствие признака эквивалентно поступлению его нулевого значения. Величина ошибки метрик (6) и (10) меньше в $(E(v_i) - v_i)/\sigma_c(v_i)$ раз. Вследствие чего зарегистрированы существенно более низкие вероятности ошибок распознавания

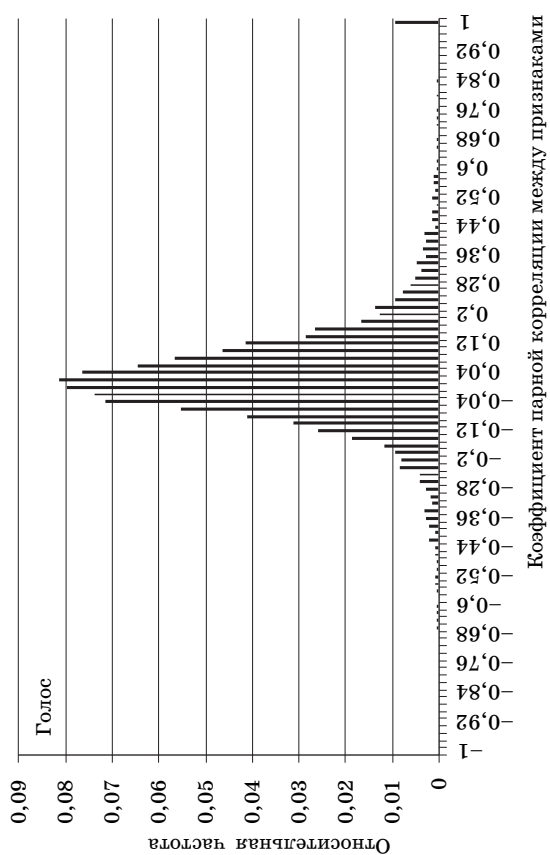
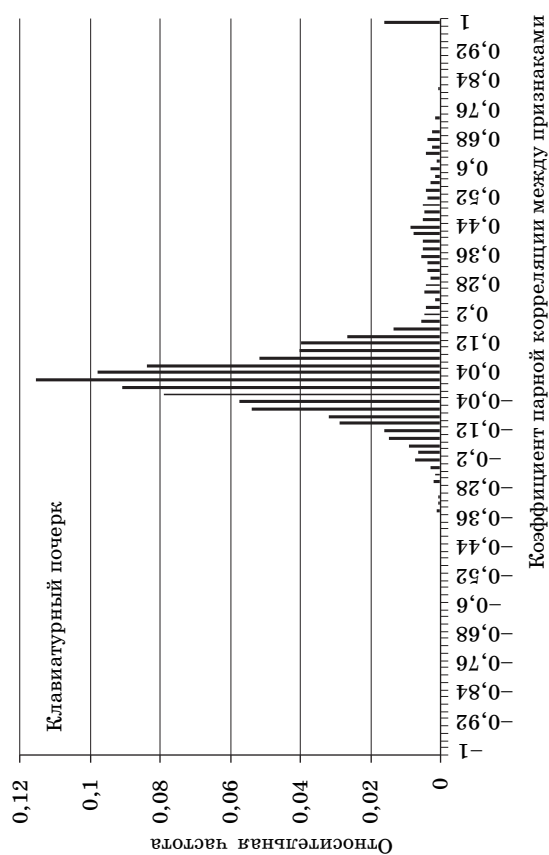
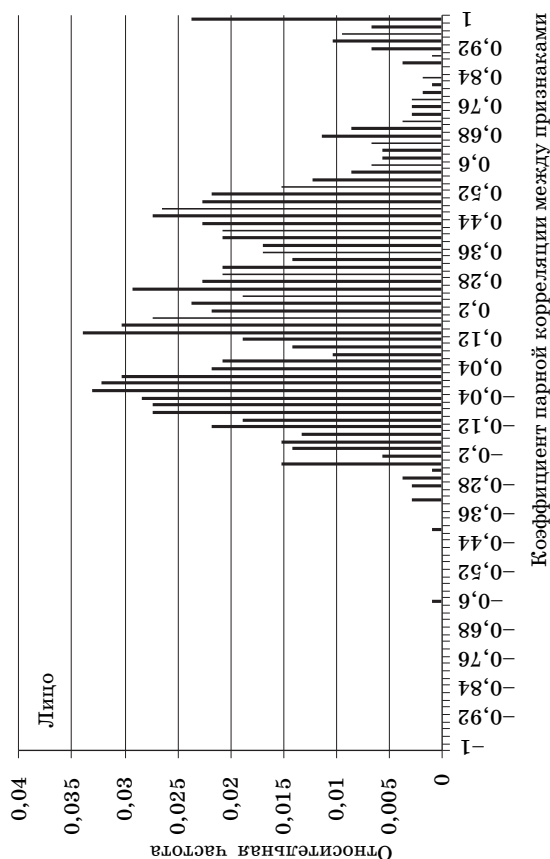
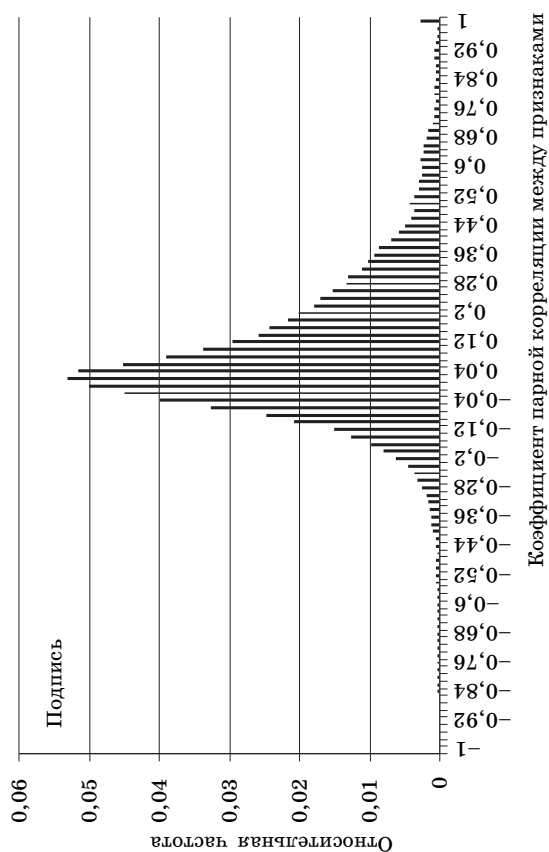
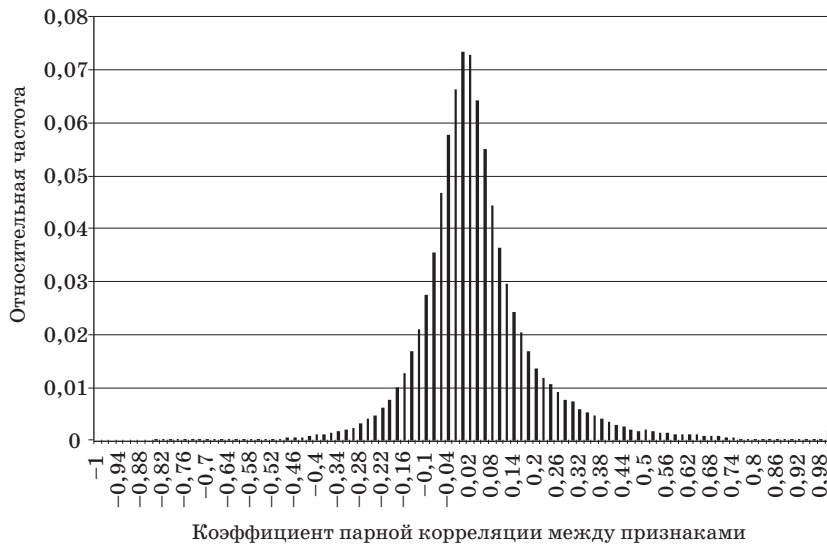
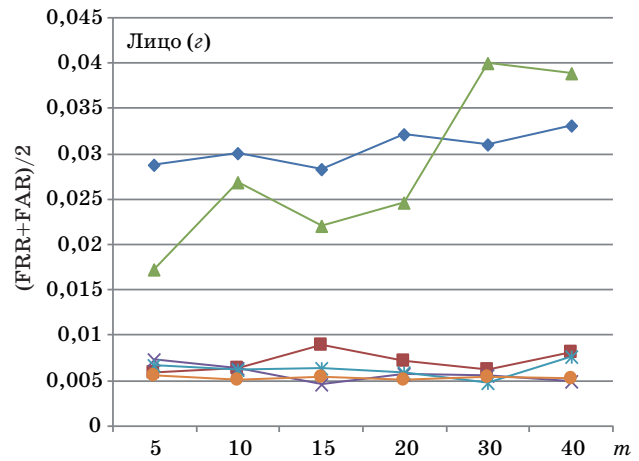
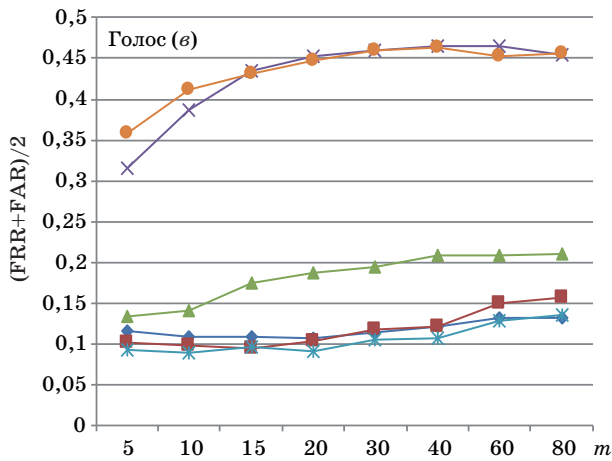
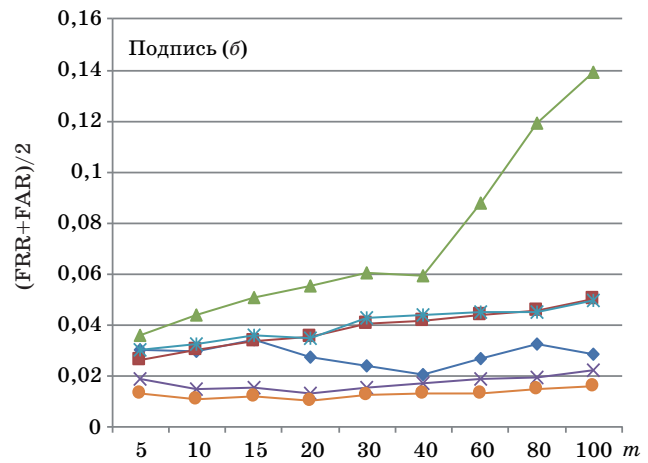
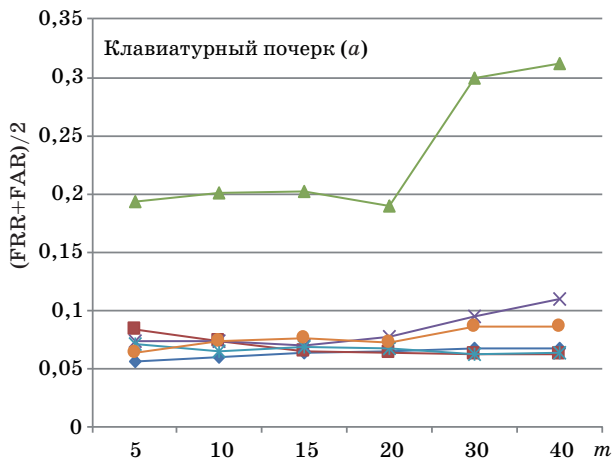


Рис. 1. Взаимная корреляционная зависимость признаков

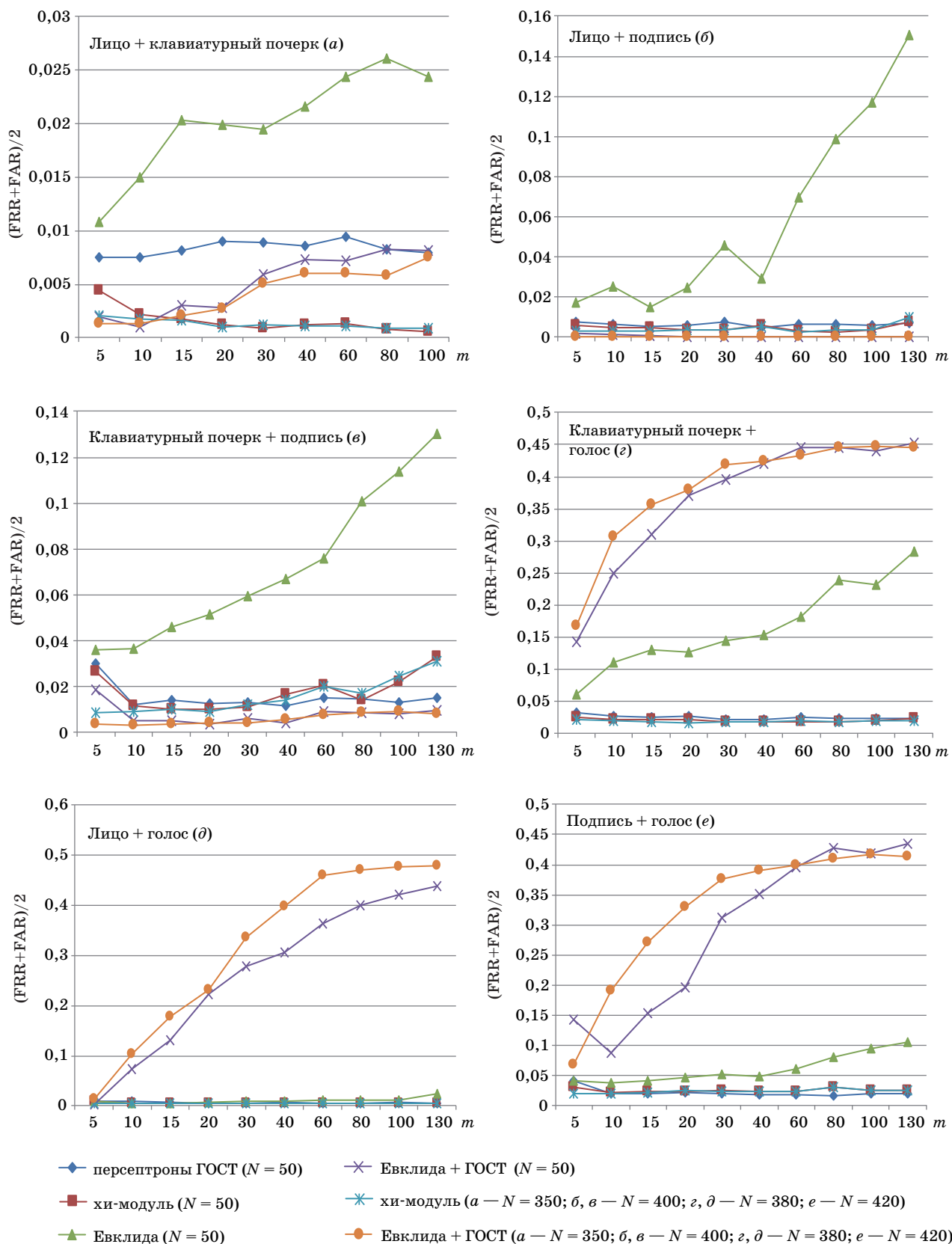


■ Рис. 2. Взаимная корреляционная зависимость всех рассмотренных признаков при их совместном использовании (комплексировании)

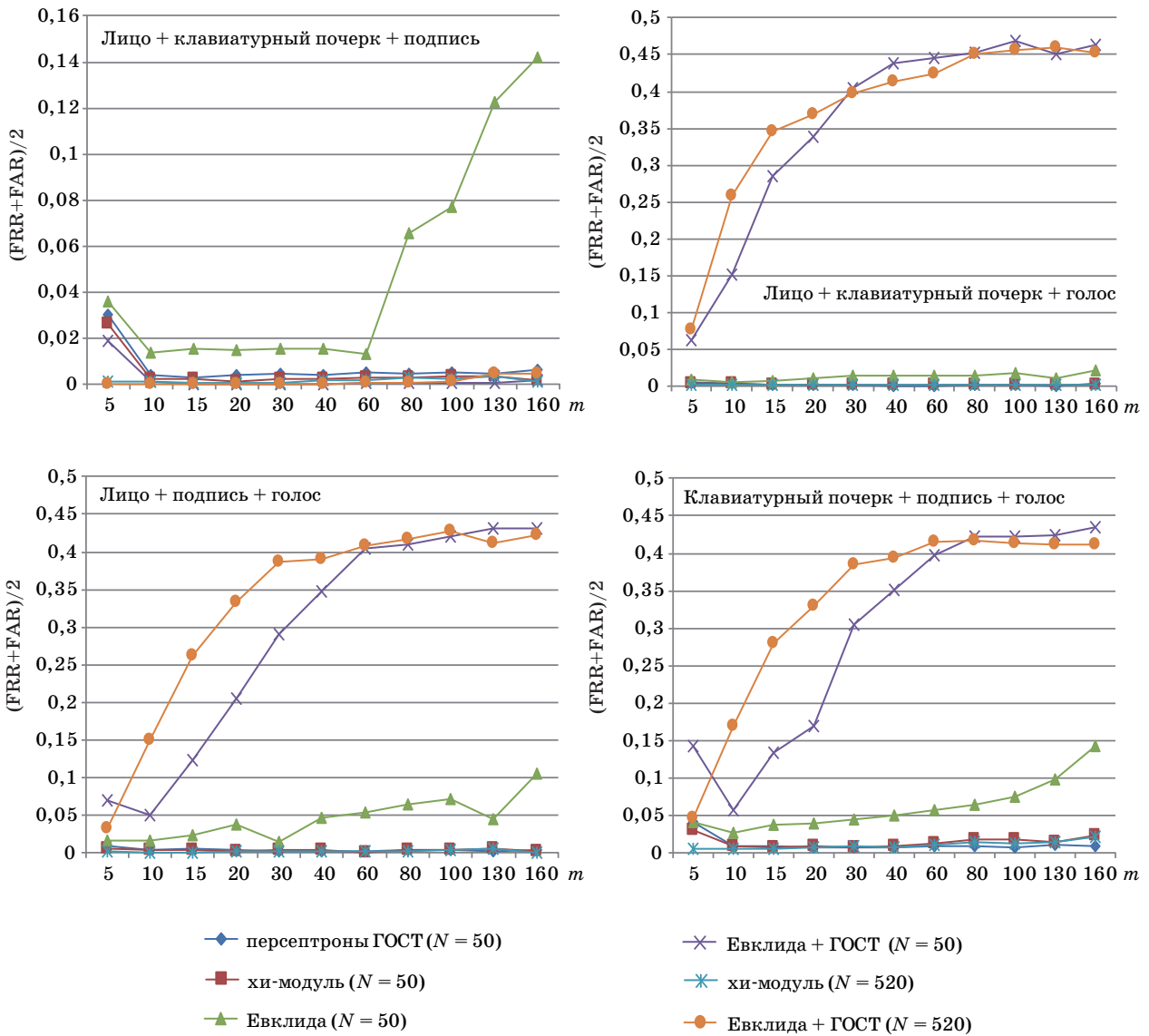


- ◆ перцептроны ГОСТ ($N = 50$)
- ◆ Евклида + ГОСТ ($N = 50$)
- хи-модуль ($N = 50$)
- ◆ хи-модуль ($a - N = 240; б - N = 320; в - N = 290; г - N = 200$)
- ▲ Евклида ($N = 50$)
- Евклида + ГОСТ ($a - N = 240; б - N = 320; в - N = 290; г - N = 200$)

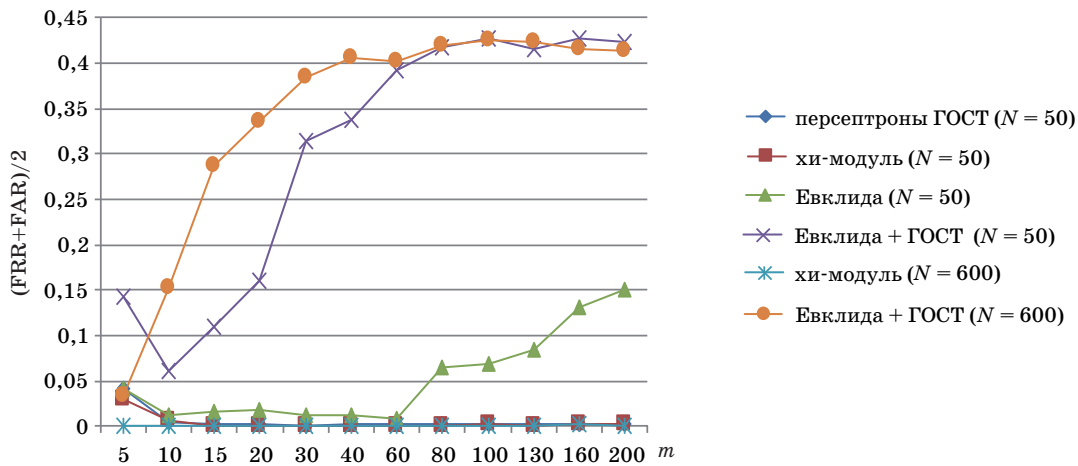
■ Рис. 3. Результаты распознавания субъектов однофакторными системами



■ Рис. 4. Результаты распознавания субъектов двухфакторными системами



■ Рис. 5. Результаты распознавания субъектов трехфакторными системами



■ Рис. 6. Результаты распознавания субъектов четырехфакторными системами

■ Таблица 2. Наилучшие показатели ошибок генерации и длины кодов

Признаки	Тип сети	FRR	FAR	Длина кода, бит
Клавиатурный почерк	хи-модуль	0,055	0,0694	240
Подпись	Евклида + ГОСТ	0,0126	0,0083	320
Голос	хи-модуль	0,118	0,062	290
Лицо	хи-модуль	0,0033	0,0061	200
Лицо + клавиатурный почерк	хи-модуль	≈0	0,0018	350
Лицо + подпись	Евклида + ГОСТ	≈0	≈0	400
Клавиатурный почерк + подпись	Евклида + ГОСТ	0,0057	0,0005	400
Клавиатурный почерк + голос	хи-модуль	0,0184	0,0155	380
Лицо + голос	хи-модуль	0,0057	0,0029	380
Подпись + голос	хи-модуль	0,023	0,0189	420
Лицо + клавиатурный почерк + подпись	Евклида + ГОСТ	≈0	≈0	520
Лицо + клавиатурный почерк + голос	хи-модуль	0,0034	0,0006	520
Лицо + подпись + голос	хи-модуль	0,0023	0,0004	520
Клавиатурный почерк + голос + подпись	хи-модуль	0,0057	0,0051	520
Все признаки	хи-модуль	≈0	0,0005	600

(генерации ключа) сетями этих метрик. Однако в большинстве других случаев (без использования признаков голоса) сеть взвешенных мер Евклида показала наилучшие результаты.

Положительный эффект от комплексирования независимых групп признаков (см. рис. 4–6) заключается не только в увеличении их количества, но и в появлении большого числа новых пар параметров с низкой корреляцией (см. рис. 2). Последнее сказалось на улучшении работы всех сетей, особенно квадратичных форм.

Заключение

Применение адаптированного алгоритма обучения сетей перцептронов, описанного в ГОСТ Р 52633.5-2011 [14], по отношению к сетям квадратичных форм (взвешенных мер Евклида) позволило получить высокие результаты в ряде задач биометрической аутентификации. В частности, удалось достичь вероятностей ошибочных решений по верификации образов субъекта в пространстве признаков подписи около 1 %, клавиатурного почерка и подписи — 0,31 %, признаков лица и подписи — с процентом ошибочных решений, близким к нулю. Использование сетей хи-

модуль также позволило получить очень высокий результат во многих случаях: при распознавании субъектов по лицу зарегистрирован процент ошибок менее 0,5 %, лицу совместно с клавиатурным почерком — менее 0,1 % ошибок, лицу, подписи и голосу — около 0,13 %. Полученные результаты превосходят аналоги [21, 22]. Исходя из результатов, можно заключить: методы двух- (без образов голоса), трех- и четырехфакторной верификации образов субъектов, рассмотренные в работе (на основе сетей хи-модуль и сетей квадратичных форм, обученных по адаптированному алгоритму из ГОСТ Р 52633.5), можно использовать на практике при реализации контрольно-пропускной функции или удаленной аутентификации. Однако для этого требуется обеспечить защиту биометрических эталонов (этого требует ГОСТ Р 52633.0-2006 [23]). Подделка все признаки на практике крайне затруднительно, изготовление муляжа более двух видов образов одновременно можно считать неосуществимым. Пространство признаков голоса субъектов требует дополнительной проработки, так как в рассмотренном в работе виде не дает желаемого результата.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-07-09053).

Литература

1. Moving Forward with Cybersecurity and Privacy. http://www.pwc.ru/ru/riskassurance/publications/assets/gsiss-report_2017_eng.pdf (дата обращения: 11.12.2016).
2. Ложников П. С. и др. Экспериментальная оценка надежности верификации подписи сетями квадра-

тичных форм, нечеткими экстракторами и перцептронами / П. С. Ложников, А. Е. Сулавко, А. В. Еременко, Д. А. Волков // Информационно-управляющие системы. 2016. № 5. С. 73–85. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.73

3. Lozhnikov P. S., et al. Methods of Generating Key Sequences based on Parameters of Handwritten Passwords and Signatures / P. S. Lozhnikov, A. E. Su-

- lavko, A. V. Eremenko, D. A. Volkov // Information. 2016. N 7. P. 59. doi:10.3390/info7040059
4. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. — Philadelphia: S.I.A.M., 1992. — 357 p.
 5. Иванов А. И. Биометрическая идентификация личности по динамике подсознательных движений. — Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. — 188 с.
 6. Васильев В. И. и др. Оценка идентификационных возможностей биометрических признаков от стандартного периферийного оборудования / В. И. Васильев, П. С. Ложников, А. Е. Сулавко, С. С. Жумажанова // Вопросы защиты информации. 2016. № 1. С. 12–20.
 7. Viola P. and Jones M. Rapid Object Detection Using a Boosted Cascade of Simple Features // Computer Vision and Pattern Recognition CVPR: Proc. of the 2001 IEEE Computer Society Conf. 2001. Vol. 1. P. 511–518.
 8. Hough P. V. C. A Method and Means for Recognizing Complex Patterns. Patent U. S., no. 3.069.654, 1962.
 9. Ворона В. А., Тихонов В. А. Системы контроля и управления доступом. — М.: Горячая линия-Телеком, 2010. — 272 с.
 10. Сулавко А. Е., Еременко А. В., Борисов Р. В. Генерация криптографических ключей на основе голосовых сообщений // Прикладная информатика. 2016. № 5. С. 76–89.
 11. Dodis Y., Reyzin L. A. Smith Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy // EUROCRYPT. April 2004. P. 523–540.
 12. Juels A., Sudan M. A Fuzzy Vault Scheme // IEEE International Symposium on Information Theory. 2002. P. 408–425.
 13. Juels A., Wattenberg M. A Fuzzy Commitment Scheme // Proc. ACM Conf. Computer and Communications Security. 1999. P. 28–36.
 14. ГОСТ Р 52633.5-2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа. — М.: Стандартинформ, 2011. — 20 с.
 15. Ахметов Б. С. и др. Технология использования больших нейронных сетей для преобразования нечетких биометрических данных в код ключа доступа: монография / Б. С. Ахметов, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, А. В. Безяев, Е. А. Малыгина. — Алматы: Издательство ЛЕМ, 2014. — 144 с.
 16. Безяев А. В., Иванов А. И., Фунтикова Ю. В. Оптимизация структуры самокорректирующегося биокда, хранящего синдромы ошибок в виде фрагментов хеш-функций // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2014. № 3. С. 4–13.
 17. Иванов А. И. Нейросетевые алгоритмы биометрической идентификации личности. — М.: Радиотехника, 2004. — 144 с.
 18. Ложников П. С. и др. Биометрическая идентификация рукописных образов с использованием корреляционного аналога правила Байеса / П. С. Ложников, А. И. Иванов, Е. И. Качайкин, А. Е. Сулавко // Вопросы защиты информации. 2015. № 3. С. 48–54.
 19. Иванов А. И., Ложников П. С., Качайкин Е. И. Идентификация подлинности рукописных автографов сетями Байеса–Хэмминга и сетями квадратичных форм // Вопросы защиты информации. 2015. № 2. С. 28–34.
 20. Иванов А. И., Ложников П. С., Серикова Ю. И. Снижение размеров достаточной для обучения выборки за счет симметризации корреляционных связей биометрических данных // Кибернетика и системный анализ. 2016. № 3. С. 49–56.
 21. Еременко А. В., Сулавко А. Е., Волков Д. А. Современное состояние и пути модернизации преобразователей биометрия-код // Информационные технологии. 2016. № 3. С. 203–210.
 22. Васильев В. И. и др. Технологии скрытой биометрической идентификации пользователей компьютерных систем / В. И. Васильев, П. С. Ложников, А. Е. Сулавко, А. В. Еременко // Вопросы защиты информации. 2015. № 3. С. 37–47.
 23. ГОСТ Р 52633.0-2006. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации. — М.: Стандартинформ, 2006. — 24 с.

UDC 004.93'1

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.50

Complexation of Independent Biometric Features in People Recognition with Quadratic Forms, Perceptrons and Functional Hee-module

Sulavko A. E.^a, PhD, Tech., Senior Lecturer, sulavich@mail.ruEremenko A. V.^b, PhD, Tech., Associate Professor, nexus-@mail.ruTolkacheva E. V.^b, PhD, Tech., Associate Professor, tolkacheva_ev@mail.ruBorisov R. V.^c, Post-Graduate Student, brv1986@yandex.ru^aOmsk State Technical University, 11, Mira Pr., 644050, Omsk, Russian Federation^bOmsk State Transport University, 35, Karl Marx Pr., 644046, Omsk, Russian Federation^cSiberian State Automobile and Highway Academy, 5, Mira Pr., Omsk, 644080, Russian Federation

Introduction: Static biometric features are not a secret and can be falsified, so the search for effective methods of authenticating people by their dynamic biometric characteristics is a very important problem. **Purpose:** The aim is to develop more reliable methods for one- and multi-factor biometric authentication using uninformative features. **Results:** A series of numerical experiments were

conducted on the basis of biometric data of a signature, keyboard handwriting, faces and voices of people using perceptrons networks, quadratic forms and functional Hee-module. An error level for the user verification by handwriting dynamics is about 1%, an error for the user verification by keyboard signature and handwriting dynamics is about 0.31%, face image gives an error level less than 0.5%, face and keyboard signature gives an error level less than 0.1%, using 3- and 4-factor verification gives 0,54–0,01% error level. **Practical relevance:** Methods of two- (without voice features), three- and four-factor user verification discussed in the paper can be used in practice for the implementation of a remote authentication function. Forging features of more than two kinds of images can be considered practically impossible.

Keywords — Parameters of Signature, Keyboard Signature, Voice Characteristics, Personal Physiological Characteristics, Biometrics, Artificial Neural Network, Quadratic Forms, Pattern Recognition Algorithms.

References

- Moving Forward with Cybersecurity and Privacy. Available at: http://www.pwc.ru/ru/riskassurance/publications/assets/gssiss-report_2017_eng.pdf (accessed 11 December 2016).
- Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Eremenko A. V., Volkov D. A. Experimental Evaluation of Reliability of Signature Verification by Quadratic Form Networks, Fuzzy Extractors and Perceptrons. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 5, pp. 73–85 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.73
- Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Eremenko A. V., Volkov D. A. Methods of Generating Key Sequences based on Parameters of Handwritten Passwords and Signatures. *Information*, 2016, no. 7, p. 59. doi:10.3390/info7040059
- Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, S.I.A.M., 1992. 357 p.
- Ivanov A. I. *Biometricheskaia identifikatsiia lichnosti po dinamike podsoznatel'nykh dvizhenii* [Biometric Identification of the Person on the Dynamics of Subconscious Movements]. Penza, Penzenskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2000. 188 p. (In Russian).
- Vasil'ev V. I., Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Zhumazhanova S. S. Evaluation of Identification Capability of Biometric Features from a Standard Peripheral Equipment. *Voprosy zashchity informatsii*, 2016, no. 1, pp. 12–20 (In Russian).
- Viola P. and Jones M. Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features. *Proc. of the 2001 IEEE Computer Society Conf. "Computer Vision and Pattern Recognition", CVPR*, 2001, vol. 1, pp. 511–518.
- Hough P. V. C. A Method and Means for Recognizing Complex Patterns. Patent U. S., no. 3.069.654, 1962.
- Vorona V. A., Tikhonov V. A. *Sistemy kontrolya i upravleniia dostupom* [Access Control Systems]. Moscow, Goriachaia liniia-Telekom Publ., 2010. 272 p. (In Russian).
- Sulavko A. E., Eremenko A. V., Borisov R. V. Cryptographic Keys Generated on the Basis of Voice Messages. *Prikladnaia informatika*, 2016, no. 5, pp. 76–89 (In Russian).
- Dodis Y., Reyzin L. A. Smith Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy. *EUROCRYPT*, April 2004, pp. 523–540.
- Juels A., Sudan M. A Fuzzy Vault Scheme. *IEEE Intern. Symp. on Information Theory*, 2002, pp. 408–425.
- Juels A., Wattenberg M. A Fuzzy Commitment Scheme. *Proc. ACM Conf. Computer and Communications Security*, 1999, pp. 28–36.
- State Standard R 52633.5-2011. Data Protection. Information Protection Technique. Automatic Learning Neural Network Converters Biometry-Code Access. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 20 p. (In Russian).
- Akhmetov B. S., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Beziaev A. V., Malygina E. A. *Tekhnologiya ispol'zovaniia bol'shikh neironnykh setei dlia preobrazovaniia nechetkikh biometricheskikh dannykh v kod kliucha dostupa* [Technology is the Use of Large Neural Networks for Fuzzy Transformation of Biometric Data in the Access Code Key]. Almaty, Izdatel'stvo LEM Publ., 2014. 144 p. (In Russian).
- Beziaev A. V., Ivanov A. I., Funtikova Iu. V. Optimization of the Structure of Bio-Self-Correcting Code Storing Error Syndromes as Fragments Hash Functions. *Vestnik UrFO. Bezopasnost' v informatsionnoi sfere*, 2014, no. 3, pp. 4–13 (In Russian).
- Ivanov A. I. *Neirosetevye algoritmy biometricheskoj identifikatsii lichnosti* [Neural Network Algorithms for Biometric Identification]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 144 p. (In Russian).
- Lozhnikov P. S., Ivanov A. I., Kachaikin E. I., Sulavko A. E. Biometric Identification of Manuscript Images Using Analog Correlation Bayes Rule. *Voprosy zashchity informatsii*, 2015, no. 3, pp. 48–54 (In Russian).
- Ivanov A. I., Lozhnikov P. S., Kachaikin E. I. Identification of the Authenticity of the Manuscript Autographs Networks Bayesian Networks and Hamming Quadratic Forms. *Voprosy zashchity informatsii*, 2015, no. 2, pp. 28–34 (In Russian).
- Ivanov A. I., Lozhnikov P. S., Serikova Iu. I. Reducing the Size of the Sample Sufficient for Training by Symmetrization Correlations Biometric Data. *Kibernetika i sistemnyi analiz*, 2016, no. 3, pp. 49–56 (In Russian).
- Eremenko A. V., Sulavko A. E., Volkov D. A. Current Status and the Modernization Converters Biometrics-Code. *Informatsionnye tekhnologii*, 2016, no. 3, pp. 203–210 (In Russian).
- Vasil'ev V. I., Lozhnikov P. S., Sulavko A. E., Eremenko A. V. Technology Hidden Biometric Identification of Users of Computer Systems. *Voprosy zashchity informatsii*, 2015, no. 3, pp. 37–47 (In Russian).
- State Standard R 52633.0-2006. Data Protection. Information Protection Technique. Requirements for Highly Reliable Means of Biometric Authentication. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 24 p. (In Russian).

УДК 621.391

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.63

ОБЗОР СЦЕНАРИЕВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ В СЕТЯХ LTE

С. А. Митрофанов^{а, 1}, аспирант^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: стандартом сетей 4G предусмотрена возможность доставлять одинаковый контент пользователям сети ширококвещательным способом, что открывает новые возможности для предоставления различных услуг в рамках сетей беспроводной передачи данных. Однако ширококвещательная передача данных подходит не для всех сценариев, а стандарт не описывает условия, при которых ее можно использовать. **Цель исследования:** описание возможных способов применения механизма ширококвещательной передачи, введение критериев эффективности использования радиоресурса для сравнения ширококвещательного и выделенного режимов передачи. **Результаты:** показано, что для работы ширококвещательной передачи стандарт предполагает добавление новых логических элементов как в опорную сеть, так и в сеть радиодоступа. Описаны двенадцать возможных сценариев, когда данные пользователям может быть выгодно доставлять ширококвещательным способом. Сформулированы и решены две задачи для определения условий, когда пользователям лучше доставлять данные не индивидуально, а всем сразу по ширококвещательному каналу. Приведена актуальная информация о разворачивании данной технологии в мире. **Практическая значимость:** предложены приемы, позволяющие оператору сотовой сети или производителю оборудования сотовых сетей разработать подходы для грамотного использования ширококвещательной передачи данных.

Ключевые слова — LTE, 4G, eMBMS, ширококвещательная передача.

Введение

Совместное развитие мобильных технологий и устройств дало людям возможность смотреть видео на мобильных устройствах, не жертвуя качеством картинки. Каждый день через сети мобильных операторов проходит огромное количество данных миллионам абонентов. И этот объем данных будет продолжать расти. Согласно прогнозам [1], общий ежемесячный объем данных, передаваемых по мобильным сетям, вырастет в 10 раз к 2020 г. по сравнению с 2014 г. При этом 80 % от всего ежемесячного объема данных будет занимать видео.

В настоящее время в большинстве случаев, когда множество пользователей обслуживается одной базовой станцией и принимает одинаковые данные, передача происходит в режиме «точка-точка» (выделенный (unicast) режим передачи). Это относится к трансляции прямых телевизионных эфиров или, например, скачиванию популярных данных. Очевидно, что в таких условиях ресурсы сети используются неэффективно, поскольку выделенный метод передачи не масштабируется с ростом числа пользователей. По этой причине 3GPP (3rd Generation Partnership Project) комитетом была стандартизована технология ширококвещательной передачи данных

¹ Научный руководитель — доктор технических наук, заведующий кафедрой инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения А. М. Тюрликов.

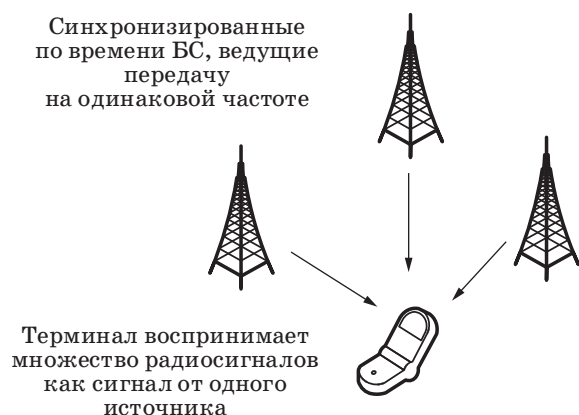
в сетях LTE (Long-Term Evolution) — eMBMS (evolved Multimedia Broadcast Multicast Service). Стандарт описывает саму технологию, но не указывает, в каком случае и каким образом ее использовать.

Эффективность использования данной технологии сильно зависит от того, для какого сценария она применяется, и общих условий, в которых находятся абоненты. В настоящей статье рассматриваются возможные сценарии использования ширококвещательной передачи данных и то, какие задачи возникают при ее использовании. Показаны возможные сценарии использования технологии ширококвещательной передачи данных в сетях LTE. На основании рассмотренных сценариев формируются новые задачи, которые необходимо решить для внедрения технологии eMBMS.

Описание ширококвещательной передачи в сетях LTE

Особенности функционирования eMBMS на уровне сети радиодоступа

Особенностью технологии eMBMS является возможность вести одновременную передачу одних и тех же потоков данных в нескольких сотах, синхронизированных по времени и использующих одну несущую частоту. Так как для нескольких одновременных передач используются одни и те же одинаковые радиоресурсы, то мобильная станция (МС) воспринимает это как одну передачу. Базовые станции (БС), осуществляющие пере-



■ Рис. 1. Концепция одночастотной групповой вещательной сети

дачу данных таким образом, организуют одночастотную групповую вещательную сеть (SFN — Single Frequency Network) (рис. 1).

Использование широковещательной передачи позволяет улучшить соотношение сигнал/шум на границе сот, что в свою очередь ведет к повышению пропускной способности сети. Улучшение условий на границе сот позволяет использовать сервисы, требующие большей пропускной способности.

Работа широковещательной передачи поддерживается как в FDD (Frequency-division Duplexing, т. е. передача может вестись одновременно от БС к МС и обратно на разных частотах), так и в TDD (Time-division Duplexing, на передаче от БС к МС и обратно отводятся отдельные временные слоты) LTE.

Один кадр в сетях LTE делится на 10 субкадров (1 мс каждый). Для широковещательной передачи может быть отведено только некоторое количество субкадров (до 60 % от всего ресурса [2]).

В отличие от случая выделенной передачи данных, при использовании eMBMS нет возможности применять механизм гибридной повторной передачи (HARQ — Hybrid Automatic Repeat Request), так как отсутствует обратная связь от пользователей к БС.

Для работы eMBMS стандарт предусматривает несколько новых каналов¹. К новым логическим каналам относятся MССН (Multicast Control Channel) и МТСН (Multicast Traffic Channel). По MССН-каналу передается информация управления, например, в каких субкадрах какая сессия передается. МТСН-канал фактически представляет собой отдельную eMBMS-сессию. Информация, передающаяся по этим логическим

¹ Здесь и далее используется терминология на английском языке, поскольку данные общепринятые названия используются в стандартах и других работах.

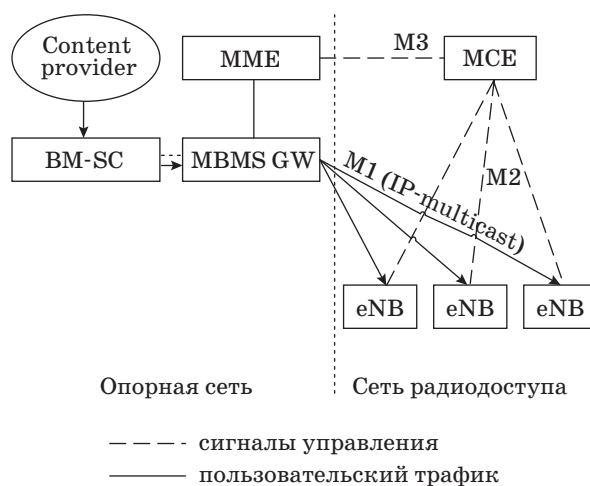
каналам, переносится транспортным (МСН — Multicast Channel) каналом, который в свою очередь использует ресурсы канала РМСН (Physical Multicast Channel).

Также для поддержки eMBMS необходимы некоторые изменения, касающиеся блоков системной информации (SIB — System Information Block) (эта информация с определенной периодичностью постоянно отправляется БС в канал и необходима для функционирования связи с МС). Во-первых, в SIB2 добавляется информация о том, какие субкадры зарезервированы для широковещательной передачи, а SIB13 содержит информацию о том, в каких конкретно субкадрах ведется передача MССН-канала (МС должна его считать, чтобы получить информацию о передающихся в данный момент eMBMS-сессиях).

Архитектура сети

Структура сети LTE, поддерживающей eMBMS (рис. 2), разработана в соответствии с необходимостью эффективного использования доступных ресурсов.

Центр широковещательной передачи (BM-SC — Broadcast Multicast Service Center) — новый элемент в опорной сети. Он служит входной точкой для данных, которые затем подразумевается передавать с использованием eMBMS. Однако при передаче BM-SC может использовать помехоустойчивое кодирование (AL-FEC — Application Layer Forward Error Correction), чтобы на стороне получателя можно было исправить ошибки. Также BM-SC обеспечивает работу процедур восстановления данных, позволяющих повторно отправить данные одному или нескольким пользователям. Для обеспечения синхронной передачи данных всеми БС BM-SC использует SYNC-протокол [3]. При старте какой-либо сессии BM-SC задает для нее определенный показатель ка-



■ Рис. 2. Архитектура LTE-сети с поддержкой eMBMS

чества обслуживания (QoS — Quality of Service), который затем используется для определения кодомодуляционной схемы (MCS — Modulation and Coding Scheme), по которой БС будет передавать данные этой сессии по радиоканалу.

Широковещательный шлюз (MBMS Gateway) — это логический узел в опорной сети. Он может быть реализован как отдельный элемент сети, так и быть встроенным в другой элемент, например, интегрирован с BM-SC. MBMS-GW является шлюзом для широковещательных данных между опорной и радиосетями. Он передает данные, полученные от BM-SC, всем БС, участвующим в eMBMS-передаче. Для передачи данных по M1-интерфейсу используется IP-multicast, что позволяет эффективно использовать ресурсы транспортной сети. MBMS-GW перенаправляет команды управления к MME (Mobility Management Entity), находящимся в обслуживаемой области, которые в свою очередь обмениваются контрольной информацией с узлами управления широковещательной передачей.

Узел управления широковещательной передачей (MCE — Multicast Coordination Entity) — это логический узел в сети радиодоступа. Он может существовать как отдельный узел, который используют несколько БС, так и быть встроенным в каждую БС. Он обеспечивает управление радиоресурсами, назначение кодомодуляционной схемы согласно QoS-параметрам, контроль доступа и процедуры подсчета слушателей.

Сценарии использования eMBMS

Мобильное телевидение. Согласно исследованиям OMVC, в США около 90 % владельцев мобильных устройств заинтересованы в просмотре прямых эфиров телевизионных новостей и прогнозов погоды со своих мобильных устройств [4].

Благодаря мобильному телевидению пользователи могут получить доступ к множеству TV-каналов и программ премиум, распространяющихся в HD-качестве и защищенных средствами DRM-систем.

Для оператора появляется новая возможность получать прибыль посредством введения подписной модели доступа к сервисам. Немаловажным фактором является то, что нагрузка на сеть почти не изменяется с ростом числа пользователей.

Абонент может совершить оплату услуги и получить доступ к данным через специальное приложение. Также возможно, к примеру, сделать бесплатным просмотр местных новостей. С точки зрения потребителя важно, что независимо от нагрузки на сеть у него всегда есть доступ к данным.

Цифровое радио. Согласно докладу Citrix, ко второй четверти 2013 г. в Северной Америке мобильное аудио (музыка в частности) составило

12 % от всех данных, переданных с помощью мобильного Интернета [5].

Технология широковещательной передачи в LTE может постепенно заменить традиционное FM-радио и предоставить высококачественное цифровое аудио вместе с новым мультимедиа-контентом, таким как обложки альбомов, подробная информация об исполнителях, расписание выступлений, даже в местах большого скопления людей.

Пользователи получают возможность наслаждаться музыкой в хорошем качестве, а оператор — дополнительный источник дохода.

Просмотр популярного видеоконтента. В данном сценарии предполагается, что видео с новыми программами, фильмами или последними новостями периодически загружается и хранится у пользователя до востребования. Например, видеосюжеты, в которых заинтересовано наибольшее количество пользователей, можно передавать широковещательным образом в течение ночи (когда нагрузка на сеть не такая большая, как днем). Абонент может подписаться на получение любимых шоу или других видео на указанную тему. Новые видео будут загружаться автоматически, а старые удаляться по необходимости.

С точки зрения пользователя важно, что у него появляется постоянный доступ к актуальному видеоряду в хорошем качестве независимо от загруженности сотовой сети, при этом у оператора появляется возможность продавать такую услугу, относительно не увеличивая нагрузку на сеть.

Автомобили с доступом в Интернет. Согласно Arbitron In-Car Study, уже в 2009 г. люди проводили от двух до трех часов в день в машинах и принимали 22 % решений о покупках, находясь за рулем [6]. В 2013 г. Atos Origin прогнозировало, что в течение следующих трех лет практически каждый автомобиль в той или иной степени будет подключен к сети [7]. Сегодня большинство водителей при посадке в автомобиль запускает на телефоне навигатор или музыкальный плеер. В дальнейшем можно ожидать, что личные мобильные телефоны пользователей и автомобили будут теснее интегрироваться друг с другом.

С использованием eMBMS могут предоставляться услуги для всей семьи:

- телевидение для пассажиров заднего ряда сидений;

- сервисы реального времени, основанные на местоположении пользователя (например, информация о ситуации на дороге, цены на топливо, обновления карт, расположение ресторанов);

- умная реклама на основе близости места предоставления услуг и данных о наличии топлива в баке;

- данные о свободных парковочных местах в зоне, что уменьшает время на поиск места в переполненном городе.

Реклама в зависимости от местоположения пользователя. В зависимости от того, где в данный момент находится пользователь и какие услуги предоставляются в непосредственной близости от него (кино, магазины, рестораны и т. д.), приложение на его мобильном телефоне может оповещать владельца о скидках и специальных предложениях. Такой подход выгоден как тем, кто предоставляет услуги, так и операторам, которые получают дополнительный источник дохода, не перегружая при этом собственные сети.

Похожий подход может работать не только для рекламы, но и для различной полезной информации, в передаче которой могут быть заинтересованы, к примеру, музеи или различные городские службы.

Предупреждения о чрезвычайных ситуациях. В критической ситуации телекоммуникационные системы могут не справиться с нагрузкой. Это является проблемой как для людей, столкнувшихся с чрезвычайной ситуацией, так и для групп быстрого реагирования, которым необходим доступ к важной информации для взятия ситуации под контроль.

Long-Term Evolution поддерживает как минимум два механизма оповещения о чрезвычайных ситуациях: ETWS (Earthquake and Tsunami Warning System) и CMAS (Commercial Mobile Alert System). Оба механизма предполагают периодическую передачу оповещений посредством блоков системной информации, однако с их помощью нельзя передать большой объем информации.

eMBMS может быть отличным способом передачи чувствительной к задержкам информации огромному числу пользователей. В данном сценарии технологию eMBMS со всеми ее плюсами в виде SFN и возможность передачи мультимедиа-сообщений можно рассматривать как расширение уже существующей технологии широкополосного оповещения в экстренных ситуациях.

Приложения для стадиона. Множество спортивных соревнований, проходящих по всему миру, собирают огромное число болельщиков на стадионах. Можно предположить, что на стадионе во время матча найдется достаточно много людей, желающих посмотреть повтор того или иного момента на своем мобильном устройстве. Приложение для стадиона могло бы предоставлять доступ к просмотру различных моментов с разных камер, данные статистики и новостную ленту прямо на телефоне пользователя в отличном качестве.

А для тех болельщиков, которые не хотят пропустить ни одного матча, приложение для стадиона может предоставить данные об игре, проходящей в этот момент в другом городе. Для ярых фанатов, готовых наблюдать несколько игр одно-

временно, дополнительная подписка будет не большой платой за такую возможность.

Электронные газеты и журналы. По всему миру СМИ обладают огромной аудиторией. Практически в каждом магазине приложений можно найти электронную версию того или иного журнала.

В электронные газеты и журналы встраивается все больше видеофайлов. Однако видео становится длиннее и, таким образом, его загрузка занимает больше времени, к тому же обычно оно запрашивается множеством пользователей одновременно. Приложение может использовать eMBMS для загрузки и кеширования электронных изданий в памяти устройства.

В результате конечный пользователь может читать любимую газету каждое утро без раздражающего ожидания окончания загрузки.

Обновление программного обеспечения. Программное обеспечение смартфонов и планшетов должно своевременно обновляться производителем для исправления ошибок и добавления нового функционала.

Используя широкополосную передачу, оператор может передавать своим абонентам обновления программного обеспечения для наиболее популярных устройств. Миллионы пользователей одновременно смогут загружать обновления.

Встроенная реклама в видео. Реклама перед показом видеоролика является одним из источников дохода в мобильном Интернете.

Реклама чрезвычайно важна для экономики мобильных сетей, но ее назойливость все более разочаровывает конечных пользователей. Таким образом, пользовательский опыт, обеспечиваемый имеющимися в настоящее время мобильными приложениями или интернет-сайтами, меньше, чем мог бы быть в случае отсутствия проблем, вызванных рекламой.

Действительно, пользователю показывается что-то, что он точно не желает видеть, причем в то же время он обязан платить за данные, которые не запрашивал, и ждать; видеореклама проигрывается довольно часто — и все это в совокупности не может не раздражать абонентов.

eMBMS позволяет осуществить предварительную фоновую загрузку рекламного видеоряда на устройство незаметно для пользователя. Перед просмотром видео приложение самостоятельно определяет наличие предварительно загруженной рекламы. Если она там есть, то отобразится мгновенно и в хорошем качестве, не раздражая пользователя.

Интернет вещей (умные счетчики). В качестве примера рассмотрим счетчики электричества. Такое умное устройство учитывает потребление электроэнергии и передает данные (по крайней мере раз в день) на серверы для мониторинга и тарификации.

Эти устройства несут на себе программное обеспечение и могут управляться централизованно. Очевидно, что с ростом числа подобных устройств затрудняется централизованное управление ими, что может дорого обойтись поставщику услуг. Широковещательная передача данных может помочь справиться с такой задачей, рассылая команды или обновления множеству устройств одновременно.

Общественная безопасность. Представим, что где-то произошло чрезвычайное происшествие, для урегулирования последствий требуются совместные усилия многих государственных служб — спасателей, полиции, пожарных и т. д. Для одновременной отдачи приказов множеству сотрудников нужна хорошая связь. Использование средств мобильной связи может оказаться хорошей альтернативой использованию портативных радиостанций.

Поэтому в настоящее время 3GPP активно прорабатывается использование eMBMS для решения вопросов общественной безопасности. Как вариант, eMBMS может использоваться для организации Push-to-Talk-сервиса. Это позволит просто и гибко обеспечивать связь внутри большой группы заинтересованных лиц.

Количественные характеристики эффективности использования радиоресурса

Особенности функционирования eMBMS

К главным недостаткам механизма широковещательной передачи в сетях LTE можно отнести статическое выделение радиоресурсов под нужды eMBMS и отсутствие обратной связи от пользователей.

Под статическим выделением радиоресурса подразумевается то, что доля субкадров, выделяемых под широковещательную передачу, задается заранее, а также то, что сами субкадры, используемые для широковещательной передачи, не могут быть использованы для выделенной передачи. Разумеется, стандартом предусмотрена возможность изменения доли субкадров, выделяемых под eMBMS среди общего ресурса, однако каждое такое изменение на данный момент не может пройти быстрее, чем за ~5 с (минимальное время, которое может пройти между обновлением сообщения, передающегося по MCCN-каналу, составляет 512 субкадров). К тому же такое изменение требует обновления SIB'ов, что не рекомендуется делать более 32 раз в течение трех часов [2].

При выделенной передаче данных БС может получать от пользователей информацию о потерях и, соответственно, использовать режим гибридной повторной передачи (HARQ — Hybrid Automatic Repeat Request). В режиме широковещательной

передачи механизм HARQ не применяется потому, что, во-первых, отсутствует обратная связь в принципе, а во-вторых, если бы БС могла самостоятельно пересылать пакеты по широковещательному каналу, то это нарушило бы принцип согласованной передачи с другими БС, участвующими в SFN. Таким образом, отправитель (BMS-C) не может узнать, приняли ли все пользователи очередной блок данных, чтобы в случае каких-либо потерь, во-первых, самостоятельно переслать данные еще раз, а во-вторых, запустить процесс изменения MCS (путем обновления QoS) для этой сессии. Так как нельзя исключать вероятность того, что в силу каких-то обстоятельств кто-либо из пользователей может не принять блок данных, стандарт предусматривает использование механизмов восстановления файлов, которые подразумевают как повторную доставку пакетов по выделенному каналу конкретным пользователям, так и повторную рассылку в рамках всей SFN.

Соответственно, для эффективного использования широковещательной передачи необходимо решить несколько качественных задач. В данном разделе будут рассмотрены две задачи такого типа.

Сначала будет рассмотрен подход, позволяющий понять, имеет ли смысл использовать широковещательную передачу данных в принципе. Такой подход следует применять, когда заранее неизвестно, для чего будет использоваться eMBMS. Если же сценарий известен, как и будет показано далее на примере, то можно использовать другие критерии для определения, как лучше всего применять eMBMS и каким образом обеспечить надежную доставку данных до абонента в силу отсутствия обратной связи. В настоящее время имеется небольшое число статей, посвященных этой теме. Данный раздел опирается на результаты работ автора статьи.

Сравнение эффективности использования широковещательной и выделенной передачи

Для того чтобы субкадры не выделялись зря под широковещательную передачу, необходимо иметь возможность узнать, когда лучше передавать данные не средствами выделенной передачи каждому пользователю, а сразу всем пользователям, применяя eMBMS.

Одним из критериев, позволяющих сравнить эффективность выделенной и широковещательной передачи, является отношение числа затраченных ресурсных блоков к объему переданной уникальной информации:

$$Q = \frac{\sum_{t=1}^T RB}{\sum_{t=1}^T k_t}, \quad (1)$$

где T — общее время работы или число переданных субкадров; RB_i — число ресурсных блоков, использованных для передачи в i -м субкадре; k_i — число полезных бит, переданных в i -м субкадре.

В работе [8] приводится сравнение выделенной и ширококвещательной передачи с использованием имитационного моделирования и аналитического подхода, сделанного при условии наличия ряда допущений:

- RLC- и PDCP-уровни не вносят заголовки;
- RLC-уровень не разбивает и не объединяет пакеты;
- PDCP-уровень не сжимает IP-заголовки;
- пользователи равноправны;
- в канале отсутствуют ошибки.

Для случая выделенной передачи данных формулу (1) возможно записать следующим образом:

$$Q = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N RB_{i,j}}{\sum_{t=1}^T k_i}, \quad (2)$$

где N — количество пользовательских устройств, которым передавались данные по выделенному каналу; $RB_{i,j}$ — число ресурсных блоков, использованных пользователем j в i -м субкадре.

Поскольку для сравнения входной поток для всех пользователей одинаков (в противном случае задача не имеет смысла) и считаются только полезные данные, знаменатель дроби не зависит от числа пользователей.

С использованием указанных допущений выражение (2) можно привести к виду

$$Q_{unicast} \approx \frac{N \cdot \overline{RB}}{k_{tti}}, \quad (3)$$

где N — число пользователей; \overline{RB} — среднее число ресурсных блоков, приходящихся на одного пользователя в одном субкадре; k_{tti} — среднее количество бит, переданных в одном субкадре.

Выражение (1) для случая ширококвещательной передачи выглядит следующим образом:

$$Q_{eMBMS} = \frac{\frac{m}{10} \cdot T \cdot RB_{sf}}{\sum_{t=1}^T k_i}, \quad (4)$$

где $m/10$ — доля субкадров, отведенных под ширококвещательную передачу среди общего числа субкадров в кадре; RB_{sf} — число ресурсных блоков в субкадре. Оно зависит только от ширины канала. Например, при ширине канала 15 МГц один субкадр будет содержать в себе 75 ресурсных блоков.

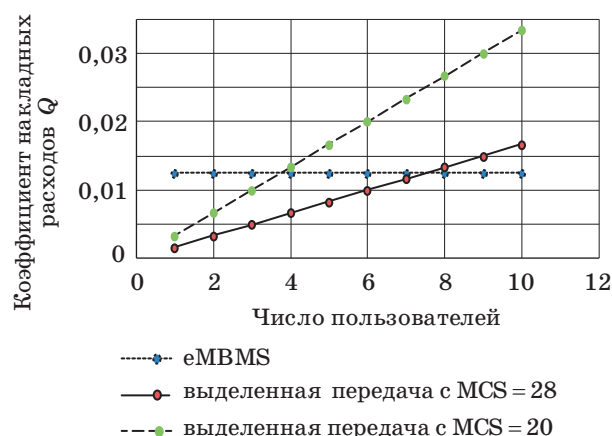


Рис. 3. Сравнение эффективности выделенной и ширококвещательной передач при интенсивности входного потока 0,6 Мбит/с

Если принять во внимание указанные ранее допущения, то можно из выражения (4) получить выражение вида

$$Q_{eMBMS} \approx \frac{m \cdot RB_{sf}}{10 \cdot k_{tti}}, \quad (5)$$

где m является входным параметром и задается перед началом вычислений на основе среднего числа бит, поступающих в систему за один момент времени, и максимального объема данных, который можно передать в одном субкадре.

График результатов сравнения эффективности выделенной и ширококвещательной передачи для случая, когда входной видеопоток поступает с интенсивностью 0,6 Мбит/с, показан на рис. 3.

С ростом числа пользователей растет коэффициент накладных расходов на выделенную передачу данных, но скорость этого роста зависит от выбранной кодомодуляционной схемы (которая в свою очередь зависит от условий в канале). Из графика видно, что в одном из случаев ширококвещательную передачу имеет смысл использовать, начиная уже с четырех пользователей.

Эффективность методов восстановления файлов

Частным случаем сценария обновления программного обеспечения является обновление операционной системы на смартфонах. Обычно обновление появляется единовременно во многих регионах для огромного числа устройств. Использование ширококвещательной передачи для доставки обновления не исключает того, что какая-то часть файла с обновлением может быть не принята пользовательским устройством вследствие ошибки.

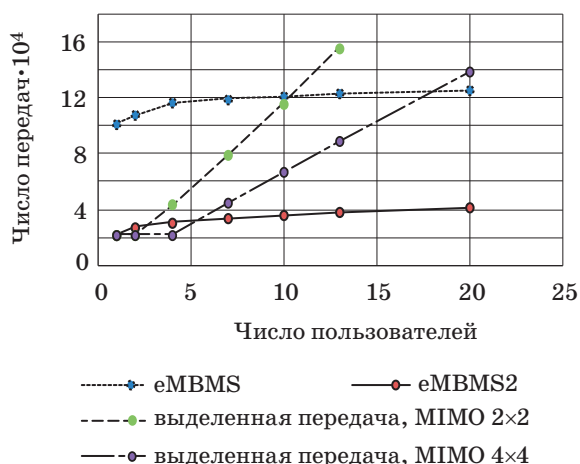


Рис. 4. Сравнение методов восстановления файлов

Для исправления таких ошибок стандарт предусматривает два подхода к восстановлению файлов: восстановление с использованием выделенного канала передачи и восстановление с использованием широкоэвещательного канала.

В работе [9] проведены анализ и сравнение двух методов восстановления файлов, подразумевающих стандартом для использования:

- повторная передача непринятых блоков по широкоэвещательному каналу;
- повторная передача непринятых блоков каждому пользователю индивидуально по выделенному каналу.

Также в работе был предложен не противоречащий стандарту метод восстановления файлов по широкоэвещательному каналу, заключавшийся в постоянной циклической передаче непринятых блоков по широкоэвещательному каналу до тех пор, пока они не будут приняты всеми пользователями. Данный метод показал преимущество в некоторых условиях по сравнению с методами, взятыми из стандарта.

На графиках (рис. 4) отражена зависимость необходимого числа передач от числа мобильных устройств, принимающих данные. Для выделенной передачи данных принималось во внимание использование технологии MIMO в конфигурации 2x2 и 4x4.

Статус внедрения eMBMS в сетях разных операторов

Данные из отчета [10] на апрель 2016 г. систематизированы в таблице. Из них следует, что как минимум два оператора имеют развернутую коммерческую сеть с поддержкой eMBMS. Еще не менее трех операторов занимаются внедрением eMBMS в свои LTE-сети. Множество испытаний и демонстраций было проведено и запланировано с операторами по всему миру.

Страна	Оператор	Статус
Австралия	Telstra	Подготовка к использованию
Бразилия	Clara and NET	Проведены испытания
Великобритания	Etisalat	Проводятся испытания
Германия	Vodafone	Проведены испытания
	IRT	Проводятся испытания
Гонконг	PCCW (CSL)	Проводится внутреннее тестирование
Индия	RJIL	Проведены испытания
Индонезия	Smartfren	Испытания запланированы
Испания	Vodafone	Проведены испытания
Италия	RAI	Проводятся испытания и сравнение eMBMS с DVB
	TIM	Проводятся испытания
Китай	China Mobile	Проведены испытания
	Cine Telecom	Проведены испытания
Нидерланды	KPN	Проведены испытания
Польша	Polkomtel Plus	Проведены испытания
Португалия	Meo	Проводятся испытания
Россия	Megafon	Проводится внутреннее тестирование
	MTS	Проведены испытания
Сингапур	SingTel	Проводятся испытания
США	AT&T	Проводятся испытания и осуществляется подготовка к использованию
	Verizon Wireless	Используется в коммерческой сети
Филиппины	Globe	Подготовка к использованию
	Smart	Проведены испытания
Франция	Orange	Проведены испытания
	TDF	Проводятся испытания и сравнение eMBMS с DVB
Южная Корея	SK Telecom	Подготовка к использованию
	KT	Используется в коммерческой сети

Заключение

Рассмотрена технология широкоэвещательной передачи данных в сетях LTE, известная как eMBMS. Сама по себе технология только начинает свой путь в коммерческих сотовых сетях. Нет сомнений, что широкоэвещательная передача

будет развиваться и дальше. Аналогов у данной технологии нет, и большинство предложенных сценариев использования мобильных сетей могут стать возможными только благодаря ей.

Основная польза от использования eMBMS возникает, когда доступ к одинаковым данным требуется нескольким пользователям. Причем точное число пользователей, при котором ширококвещательная передача становится предпочтительнее выделенной, зависит от различных внешних факторов, например, условий в канале. В данной работе описывается подход, позволяющий сравнить эффективность использования

канального ресурса для выделенной и ширококвещательной передачи данных.

Поскольку ширококвещательный канал все так же подвержен ошибкам, то возникает необходимость исправления ошибок в результате передачи данных с использованием eMBMS. Данная задача может решаться различными методами, при этом каждый обладает своими преимуществами.

Возможные сценарии использования ширококвещательной передачи не исчерпываются описанными в статье. Стоит ожидать расширения области возможного применения данной технологии с развитием сетей мобильной передачи данных.

Литература

1. Ericsson Mobility Report. Nov. 2015. <http://www.ericsson.com/res/docs/2015/mobility-report/ericsson-mobility-report-nov-2015.pdf> (дата обращения: 10.10.2016).
2. 3GPP TS 36.331 V12.8.0. RRC Protocol Specification. <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2440> (дата обращения: 05.09.2016).
3. 3GPP TS 25.446 V12.1.0. MBMS Synchronisation Protocol (SYNC). <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=1210> (дата обращения: 05.09.2016).
4. The OMVC Mobile TV Study: Live, Local Programming Will Drive Demand for Mobile TV. — Frank N. Magid Associates, Inc. <http://online.wsj.com/public/resources/documents/omvc200912.pdf> (дата обращения: 22.08.2016).
5. Citrix ByteMobile Mobile Analytics Report. — Citrix, June 2013. <https://www.citrix.com/products/bytemobile-adaptive-traffic-management/tech-info.htm> (дата обращения: 19.08.2016).
6. Diane Williams. The Arbitron National In-Car Study. — Arbitron, 2009 Ed. <http://www.arbitron.com/downloads/InCarStudy2009.pdf> (дата обращения: 04.09.2016).
7. Automotive Futures. Connected Cars for Smart Mobility: envisioning. — Atos, 2010. <https://se.atos.net/content/dam/global/careers/atos-connected-cars-smart-mobility.pdf> (дата обращения: 01.07.2016).
8. Митрофанов С. А., Тюрликов А. М. eMBMS LTE Usage to Deliver Mobile Data// 6th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems, Saint-Petersburg, 2014. P. 60–65. doi:10.1109/ICUMT.2014.7002079
9. Митрофанов С. А. Анализ методов восстановления файлов при ширококвещательной передаче в сетях LTE // Научная сессия ГУАП: сб. докл. Ч. 1. СПб., 2015. С. 269–273.
10. LTE Broadcast (eMBMS): Global Status Summary of Deployments and Activities. 2016. <http://gsacom.com/paper/lte-broadcast-embms-global-status-summary-of-deployments-and-activities/> (дата обращения: 12.10.2016).

UDC 621.391

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.63

Overview of Broadcast Transmission usage Scenarios in LTE Networks

Mitrofanov S. A.^a, Post-Graduate Student, smtrfnv@gmail.com

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

Introduction: Standards for 4G networks provide a way to transfer the same data to multiple users in a broadcast manner. This brings new opportunities to mobile operators for offering and deploying new mobile services. However, broadcast transmission is not usable for all possible scenarios and the standards do not provide any guideline answering the question. **Purpose:** We discuss possible broadcast transmission usage scenarios, introduce some metrics of effectiveness and use them for comparison between unicast and broadcast transmission schemes. **Results:** It is demonstrated that in order to support such a transmission mode, new logical nodes should be added into the core and radio networks. Twelve different scenarios of possible effective broadcast transmission scheme usage are described. Two problems are provided and solved in order to find out when it is better to use the broadcast transmission scheme rather than the unicast one. The article contains information about broadcast transmission scheme usage (deployments, trials, tests) through mobile networks all around the world. **Practical relevance:** The proposed approaches allow the operators and manufacturers to develop their own ways for effective usage of the broadcast transmission scheme.

Keywords — LTE, 4G, eMBMS, Broadcast Transmission.

References

1. *Ericsson Mobility Report*. November 2015. Available at: <http://www.ericsson.com/res/docs/2015/mobility-report/ericsson-mobility-report-nov-2015.pdf> (accessed 10 October 2016).
2. *3GPP TS 36.331 V12.8.0. RRC Protocol Specification*. Available at: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2440> (accessed 05 September 2016).
3. *3GPP TS 25.446 V12.1.0. MBMS Synchronisation Protocol (SYNC)*. Available at: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=1210> (accessed 05 September 2016).
4. *The OMVC Mobile TV Study: Live, Local Programming Will Drive Demand for Mobile TV*. Frank N. Magid Associates, Inc. Available at: <http://online.wsj.com/public/resources/documents/omvc200912.pdf> (accessed 22 August 2016).
5. *Citrix ByteMobile Mobile Analytics Report*. Citrix, June 2013. Available at: <https://www.citrix.com/products/byte-mobile-adaptive-traffic-management/tech-info.htm> (accessed 19 August 2016).
6. Diane Williams. *The Arbitron National In-Car Study*. Arbitron, 2009 Ed. Available at: <http://www.arbitron.com/downloads/InCarStudy2009.pdf> (accessed 04 September 2016).
7. *Automotive Futures. Connected Cars for Smart Mobility*. Atos, 2010. Available at: <https://se.atos.net/content/dam/global/careers/atos-connected-cars-smart-mobility.pdf> (accessed 01 June 2016).
8. Mitrofanov S. A., Turlikov A. M. eMBMS LTE Usage to Deliver Mobile Data. *6th Intern. Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems*. Saint-Petersburg, 2014, pp. 60–65. doi:10.1109/ICUMT.2014.7002079
9. Mitrofanov S. A. The Analysis of File Repairing Methods for LTE Broadcast Transmission Scheme. *Sbornik dokladov "Nauchnaia sessiia GUAP"*, chast 1 [Proc. of the "Scientific session SUAE", part 1]. Saint-Petersburg, pp. 269–273 (In Russian).
10. *LTE Broadcast (eMBMS): Global Status Summary of Deployments and Activities*. 2016. Available at: <http://gsacom.com/paper/lte-broadcast-embms-global-status-summary-of-deployments-and-activities/> (accessed 12 October 2016).

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.

OPTIMIZATION OF ERROR CONCEALMENT BASED ON ANALYSIS OF FADING TYPES

Part 1: Statistical Description of the Wireless Video Channel, Models of BER Determination and Error Concealment of Video Signals

Ofer Hadar^a, PhD, Associate Professor, hadar@cse.bgu.ac.il

Irina Bronfman^a, MSc Student, 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, 74105, 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.

Introduction

This article is based on the research of a combination of two fields: Fading and Error Concealment (EC).

Initially, the impact of three types of fading — Gaussian, Rayleigh and Ricean — in the communication channel is investigated. Typically, studies use the Rayleigh distribution for the description of the worst situation in the channel and the Gaussian distribution for the description of the best (ideal) situation in the channel. In this work, we propose using the modification of the Ricean distribution for the description of all situations in the channel. The work demonstrates that the Ricean distribution is much broader than the Gaussian and the Rayleigh types, and incorporates the latter distributions. Therefore, in the practical section of this paper, the tests and the effects of fast fading are performed using the Ricean distribution.

In addition, Symmetrical CALIC, which constitutes an optimization of one of the existing methods of EC named CALIC (Context-based, Adaptive, Lossless Image Codec) [1], has been introduced. A comparative analysis versus the original CALIC and versus the other methods is performed, and its outcome determines that the proposed optimization gives better results than all the methods used for comparison. Additionally, a new method of EC, called Balanced Percentage Calculation is proposed. The comparative analysis shows that in terms of average signal estimations, this method performs twice as well as the Symmetrical CALIC, and much better than other methods used for comparison.

There are many works on processing and transmitting video over wireless communication channels. For example, [2] proposes an adaptive hybrid digital-analog video transmission scheme for robust video streaming in mobile networks with realistic fading channels. This scheme differs from other

researches by not assuming wireless channels to be Gaussian, which is critical for fading channels [3] proposes a joint source-channel coding scheme for the delivery of scalable video over Multi Input Multi Output (MIMO) wireless systems. In it, aiming to improve the power efficiency of the MIMO-system, authors explore how to allocate sub-channels and transmit power to the video layers under constraints of video quality and delay. [4] analyzes the impact of bit errors on the perceived video quality. This impact depends on error resilience of the data format, EC mechanism used and characteristics of the bit error pattern. In tests the authors implement various error resilient tools at the transmitter side and at the receiver. Errors that require interactive feedback on dynamic channel conditions are discussed. [5] presents a rate-optimization procedure for the transmission of scalable video sequences of the H.264/AVC standard over wireless channels. Currently existing studies present neither a wireless channel with Ricean fading nor the influence of this type of fading on the appearance of errors in the video file, whereas our study addresses this issue.

There is also a lot of research on the topic of EC for video and especially on EC for video transmitted over wireless channels. For instance, [6] presents an EC system for overcoming visible distortions in video sequences which are transmitted over a losses prone communication network. This system provides an EC solution from the point of receiving the transmitted sequence by the decoder without human interference. [7] presents a hybrid EC algorithm for compressed video sequences, based on temporal and spatial concealment methods. The article develops post-processing techniques for the reconstruction of missing or damaged macroblocks. The authors propose a support of decision tree for efficiently choosing the best appropriate EC method, according to the spatial and temporal characteristics of the sequence. [8] studies the effectiveness of Flexible Macroblock Ordering in mitigating the impact of errors on the decoded video and proposes solutions to improve the EC on H.264 decoders. Study [9] proposes hybrid EC technique. In spatial domain, three methods: Weighted Average Interpolation, Directional Interpolation and Transformed Based Concealment are implemented and compared on various noises. To reduce the computational complexity and better quality, proposed a hybrid spatial-temporal video EC technique is proposed. It includes mode selection based on boundary matching decision. [10] presents a progressive block matching algorithm (PBMA) that performs EC in order to recover visual quality. The PBMA utilizes the Euclidean distance to consider the affection of corrupted-residual in block matching principle. The PBMA successively recovers the corrupted macroblock with minimizing the impact of corrupted-residual by Euclidean

distance information. Prior to our work, EC by symmetrical method has not been introduced in a previous study. Moreover, the CALIC method [1], on which the Symmetrical CALIC Concealment method is based, has not been used for EC, only for the prediction of the lost pixels. We also considered the possibility of using this method for both asymmetric and symmetric EC. In addition, no one has previously used balanced calculations to perform EC, a method proposed and tested in our work.

The main aim of the work is devising a method for more accurate analysis of EC. This goal was achieved as can be seen in the results of practical simulation.

The first Section's work deals with the background and defines the main goal of the work. The second section of this article presents a theoretical base of Slow and Fast fading, and Temporal and Spatial EC Methods. The third section presents Mathematical and Statistical Description of Wireless Channel with fading. The fourth section constitutes a description of Modified and New Models of EC in Channel with Fading. The fifth section of the article talks about the simulation, the sixth section shows the comparative results of the calculations, and the seventh section summarizes the work and gives recommendations for future research.

The article is divided into two parts. First (this) part presents statistical description of the wireless video channel, existing and modified models of Bit Error Rate (BER) determination and existing models of EC of video signals. Second part presents a description of modified and new models of EC of video signals in channel with fading, and then it shows the practical simulation and its results.

Overview

Slow and Fast Fading

Slow fading. The slow variations of spatial signals (expressed in decibels, dB) typically have a lognormal distribution or Gaussian distribution (expressed in watts, W) [11–19]. The probability density function (PDF) of the signal changes in accordance with the corresponding standard deviation and with the mean over a certain period of time or in a separate small area. This function depends on the nature of the terrain and on the nature of the atmospheric and ionospheric conditions. This PDF is determined by:

$$PDF(r) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(r - \bar{r})^2}{2\sigma_L^2}\right\}, \quad (1)$$

where r is the value of the received signal strength or voltage envelope; $\bar{r} = \langle r \rangle$ is the mean value of the random signal level; $\sigma_L = \left\langle r^2 - (\bar{r})^2 \right\rangle$ is the variance or time-average power ($\langle r \rangle$ indicates

the averaging operation of a variable r of the received signal envelope).

Fast fading. In the case of a stationary transmitter and receiver (static multipath channel), due to multiple reflections and scattering from various obstacles surrounding the transmitter and receiver, the radio signals travel along different paths of varying lengths, thereby producing such fast deviations from the signal strength (in volts, V) or power (in watts) at the receiver.

In the case of dynamic multipath situation, subscribers' antenna is moving, and the spatial variation of the resultant signal at the receiver can be regarded as the time variations [20, 21]. The signal received by the mobile antenna at any point in space may consist of a plurality of signals having randomly distributed amplitudes, phases and angles of signal arrival, as well as different time delays. All these features change the relative phase shift depending on the spatial position and, finally, lead to signal fading in the space domain. In the dynamic (mobile) multipath situation, the signal fading happens in the mobile receiver in the time domain. This is a temporary fading due to the frequency shift of the emitted stationary transmitter. In fact, the changes in time or dynamic changes of the propagation path lengths associated with the Doppler effect, which is created due to relative movement between the stationary base station and the moving subscriber.

To illustrate the effects of changes in the phase in the time domain due to the Doppler frequency shift (Doppler effect [11–19]), let consider a helicopter moving at a constant velocity V along the path XY (Fig. 1). The difference in path lengths driven by the signal from the source S to a mobile phone at the points X and Y is $\Delta l = l \cos \theta = V \Delta t \cos \theta$, where Δt is the time required for moving receiver to move from point X to point Y along the way, and θ is the angle between the mobile direction along the XY and the direction to the source at the current point Y , that is, YS . The change of phase of the resultant received signal is created due to the difference in path length, thus:

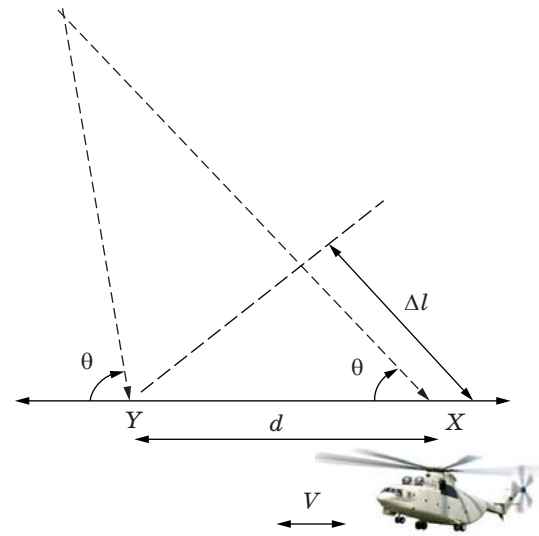
$$\Delta \Phi = k \Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} l \cos \theta = \frac{2\pi V \Delta t}{\lambda} \cos \theta. \quad (2)$$

Hence it is evident that a change of the radiated frequency, or Doppler shift, is given by f_D :

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{V}{\lambda} \cos \theta. \quad (3)$$

It is important to note from Fig. 1, that the angles at points X and Y are equal only when the corresponding lines XS and YS are parallel. Therefore, this figure is valid only in the limit, when the ter-

Remote source (S)



■ Fig. 1. Geometry of the mobile link for Doppler effect estimation

restrial source S is far away from the moving antenna at the points X and Y . The maximum Doppler shift is $f_{D_{\max}} = V / \lambda$, it is denoted as f_m here.

There exist a large number of probability distribution functions that could be used to describe the fast fading effects, such as Rayleigh, Suzuki, Ricean, Gamma, Gamma-Gamma and etc. The Ricean distribution is very general [11–19] as it includes both the line-of-sight (LOS) with scattering and diffraction and the non-LOS. In order to evaluate the contribution of each component of the signal at the receiver, i.e. dominant (or LOS) and secondary (or multipath), the Ricean parameter K is usually introduced as a ratio between these components [11–19], i.e.:

$$K = \frac{\text{LOS-Component power}}{\text{Multipath-Component power}}. \quad (4)$$

The Ricean PDF distribution of the signal strength or voltage envelope r can be defined as [1–19]:

$$PDF(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right\} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \quad \text{for } A > 0, r \geq 0, \quad (5)$$

where σ is the standard deviation of signal envelope; A is the peak strength or voltage of the dominant component envelope; $I_0(\cdot)$ is the modified Bessel function of the first kind and zero-order.

According to (4), it's possible rewrite the parameter K , which was defined above, as the ratio be-

tween the dominant and the multipath component power. This parameter is given as follows:

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2}. \quad (6)$$

Using (6), it's possible rewrite (5) as a function of K only [11–13, 18]:

$$PDF(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right\} \exp(-K) I_0\left(\frac{r}{\sigma} \sqrt{2K}\right). \quad (7)$$

Using such presentation of Ricean PDF, one can easily obtain the mean value and the variance as functions of the parameter K , called also the *fading parameter*. Thus, according to definitions of the mean value and the variance [13, 14], is get:

$$\begin{aligned} \mu_r(K) &= \int_0^{\infty} r \cdot PDF(r) dr = \\ &= \left[(1+K) I_0(\sqrt{2Kr}) + KI_1(K/2) \right]; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sigma_r^2(K) = \int_0^{\infty} r^2 \cdot PDF(r) dr = 2(1+K) - \mu_r^2. \quad (9)$$

Here, $I_1(\cdot)$ is the modified Bessel function of the first kind and first-order. For $K=0$: $\exp(-K)=1$ and $I_0(0)=1$, that is the worst case of the fading channel.

The Rayleigh PDF, when there is no LOS signal and is equal to:

$$PDF(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (10)$$

Temporal and Spatial Error Concealment Methods

Temporal EC. In the natural form of a sequence of low resolution, the correlation between two consecutive frames is higher than the correlation of pixel values in the same block (frame) [22, 23]. Consequently, in most instances the temporal interpolation provides better means for masking errors than spatial interpolation.

If the remains are lost, but the motion vectors were taken correctly, the easiest way to decipher the missing blocks is to reset the missing remains to zero. This scenario occurs when data sharing is used. “Decoding without residues” method performs well if the missing remains are small. On the other hand, the residues are small if the sequence contains mainly linear movement, which can be easily predicted.

If all the information macroblock is lost, a simpler method, called the “copy-paste” method (also

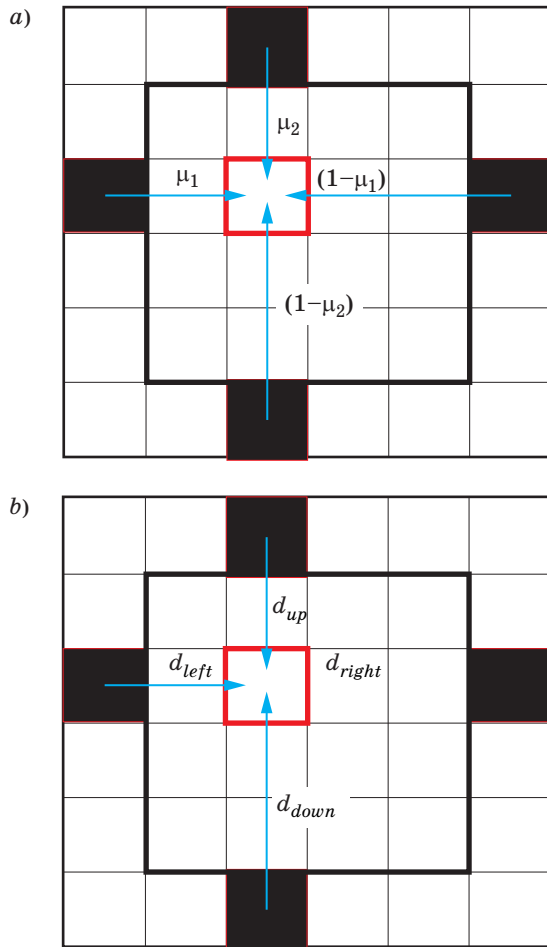
called zero-motion EC) [22], can be applied: the lost block is replaced by a spatially corresponding block in the previous frame. This method performs well only for sequences with low traffic. The best performance is provided by motor-compensated interpolation techniques. Methods for assessing the motion vector predicted the motion vector of the missing block in accordance with motion vectors of neighboring blocks (spatial — within one frame, or time — from previous frames).

Motion vector interpolation may lead to formation of blocking artifacts, especially in case of video sequences with non-uniform motion, and/or non-linear motion. Thus, in Chen et al. (1997) an improved method is provided. It sets weight in accordance with the “side match criterion”. The side match criterion measures the difference between the pixel values at the boundary and inside the block, a motion vector obtained by interpolation. Parts with higher coincidence receive higher weights. In implementing substitutions, the side match criterion is used to select a motion vector — the vector of the block with the best side match is selected.

The motion vectors are correlated in the temporal domain in addition to the spatial one. Thus, besides the spatial interpolation of a motion vector, or in cases where spatially adjacent motion vectors are not available, temporary interpolation motion vector is the best one. The efficiency of a temporal interpolation of motion vector depends strongly on the temporal characteristics of the video stream. Performance of this interpolation method is greatly reduced as the frame rate decreases. Applying the average of the previous and subsequent frames may improve performance of the method, although it may lead to increased delay and storage.

Spatial EC. The spatial EC only uses information from the processed image to reconstruct the lost area. The quality of the reconstruction essentially depends on the spatial characteristics of the latent image, given only the distribution of edges [22, 23]. The approaches to concealment of missing parts with different spatial characteristics are not necessarily equal. While smooth portions may be interpolated by a simple averaging or by optimizing a cost function of smoothness, more complicated methods have to deal with regions containing edges [22, 23]. The smoothing should be done only along the edges, and the edges must be extended. The image resolution together with the size and shape of lost area determines solutions of an interpolation problem.

The simplest method of spatial EC is an interpolation of the missing block using the average value of the boundary pixel values. However, this leads to a monotonic interpolation of the block, indistinguishable from the rest of the picture, especially if the missing block is not smooth. The method of



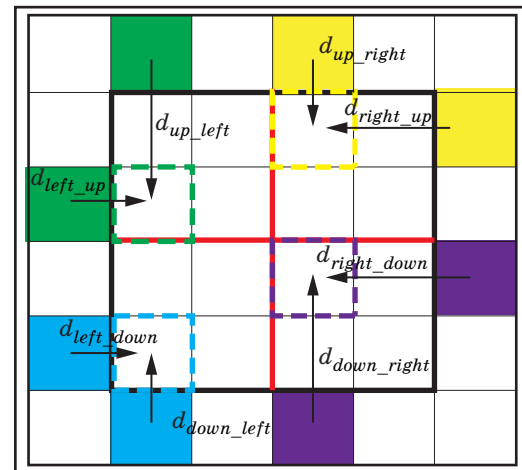
■ Fig. 2. Weighted Averaging: a — scheme 1; b — scheme 2

“weighted average” (Sun and Reibmann, 2001) improves on average the previous weighting contributions boundary points, depending on the distance between the interpolated pixel and the other abroad (opposite boundary).

It should be noted that this method works well in restoring parts containing only one dominant direction. However, it does not provide satisfactory results, if a larger number of dominant edges are included in the lost region. Furthermore, if the intersecting edges of the missing block that are based on the aimed pixel are not linear, interpolation may lead to creation of unpleasant artifacts.

In our work we suggest the spatial method of EC. This method is compared to existing spatial techniques and to their variants which have been suggested during our research. These techniques are presented below.

Weighted Averaging. Weighted averaging is a method that recovers the missing pixel value by calculating the average pixel values from the four pixels in the four one-pixel wide boundaries of the damaged block weighted by the distance be-



■ Fig. 3. Partial Weighted Averaging

tween the missing pixel and the four blocks boundaries (upper, down, left and right boundaries) as shown on Fig. 2, a and b [24]. The formula for calculating the missing pixel value (scheme 1) is:

$$P_{missed} = \frac{[\mu_1 \cdot P_{left} + (1-\mu_1) \cdot P_{right}]}{2} + \frac{[\mu_2 \cdot P_{up} + (1-\mu_2) \cdot P_{down}]}{2} \quad (11)$$

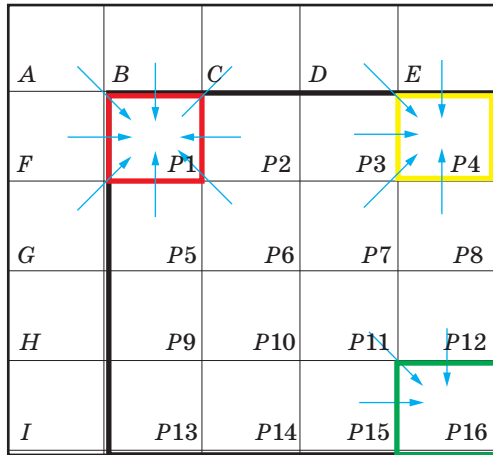
or (scheme 2):

$$P_{missed} = (d_{left} \cdot P_{left} + d_{right} \cdot P_{right} + d_{up} \cdot P_{up} + d_{down} \cdot P_{down}) / (d_{left} + d_{right} + d_{up} + d_{down}). \quad (12)$$

Partial Weighted Averaging. Partial Weighted Averaging method based on the original Weighted Averaging method. It recovers the missing pixel value by calculating the average pixel values from the two pixels in the two nearest one-pixel wide boundaries of the damaged block weighted by the distance between the missing pixel and the two blocks boundaries (upper and left, upper and right, down and right, down and left boundaries) as shown on Fig. 3. The formulas for calculating the missing pixels values are:

$$P_{missed_left_up} = \frac{d_{left_up} \cdot P_{left_up} + d_{up_left} \cdot P_{up_left}}{d_{left_up} + d_{up_left}};$$

$$P_{missed_right_up} = \frac{d_{right_up} \cdot P_{right_up} + d_{up_right} \cdot P_{up_right}}{d_{right_up} + d_{up_right}};$$



■ Fig. 4. Intra Prediction using System of Linear Equations by left top down scanning

$$\begin{aligned}
 P_{\text{missed_right_down}} &= (d_{\text{right_down}} \cdot P_{\text{right_down}} + \\
 &+ d_{\text{down_right}} \cdot P_{\text{down_right}}) / \\
 &/ (d_{\text{right_down}} + d_{\text{down_right}}); \\
 P_{\text{missed_left_down}} &= \\
 &= (d_{\text{left_down}} \cdot P_{\text{left_down}} + \\
 &+ d_{\text{down_left}} \cdot P_{\text{down_left}}) / \\
 &/ (d_{\text{left_down}} + d_{\text{down_left}}). \quad (13)
 \end{aligned}$$

Intra Prediction using System of Linear Equations (ISLE) by left top down scanning. Intra Prediction using System of Linear Equations uses the system of linear equations, which is a simple and effective tool applied almost everywhere [25, 26] for missing pixels value calculation. In the calculation, each pixel is the average of its nearest neighbours, when the top row and left column are known (pixels A–I on Fig. 4).

A $(N \times N)$ -size block generates N^2 unknowns (number of pixels in lost block) and correspondingly N^2 equations, which are solved using the matrix representation. The formulas for calculating the missing pixels values for block on Fig. 4 are (clockwise from left top pixel):

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{A + B + C + P_2 + P_6 + P_5 + G + F}{8}; \\
 P_2 &= \frac{B + C + D + P_3 + P_7 + P_6 + P_5 + P_1}{8}; \\
 P_3 &= \frac{C + D + E + P_4 + P_8 + P_7 + P_6 + P_2}{8}; \\
 P_4 &= \frac{D + E + P_8 + P_7 + P_3}{5};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_5 &= \frac{F + P_1 + P_2 + P_6 + P_{10} + P_9 + H + G}{8}; \\
 P_6 &= \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_7 + P_{11} + P_{10} + P_9 + P_5}{8}; \\
 P_7 &= \frac{P_2 + P_3 + P_4 + P_8 + P_{12} + P_{11} + P_{10} + P_6}{8}; \\
 P_8 &= \frac{P_3 + P_4 + P_{12} + P_{11} + P_7}{5}; \\
 P_9 &= \frac{G + P_5 + P_6 + P_{10} + P_{14} + P_{13} + I + H}{8}; \\
 P_{10} &= \frac{P_5 + P_6 + P_7 + P_{11} + P_{15} + P_{14} + P_{13} + P_9}{8}; \\
 P_{11} &= \frac{P_6 + P_7 + P_8 + P_{12} + P_{16} + P_{15} + P_{14} + P_{10}}{8}; \\
 P_{12} &= \frac{P_7 + P_8 + P_{16} + P_{15} + P_{14}}{5}; \\
 P_{13} &= \frac{H + P_9 + P_{10} + P_{14} + I}{8}; \\
 P_{14} &= \frac{P_9 + P_{10} + P_{11} + P_{15} + P_{13}}{5}; \\
 P_{15} &= \frac{P_{10} + P_{11} + P_{12} + P_{16} + P_{14}}{5}; \\
 P_{16} &= \frac{P_{11} + P_{12} + P_{15}}{3}. \quad (14)
 \end{aligned}$$

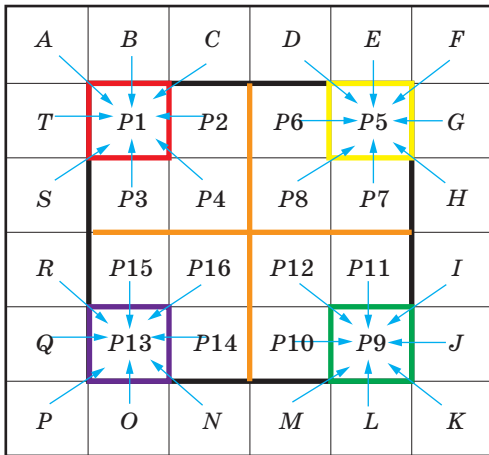
Now there are 16 equations for 16 unknowns P_1 – P_{16} which are solved using the matrix form of system of linear equations $Ax = B$, where vector x is P_1 – P_{16} .

Intra Prediction using System of Linear Equations by symmetric scanning (ISLE). The Symmetric Intra Prediction using System of Linear Equations, as ISLE [25, 26], uses the system of linear equations for missing pixels value calculation. In the calculation, each pixel is the average of its nearest neighbours, when the top and bottom rows, and left and right columns are known (pixels A–T on Fig. 5).

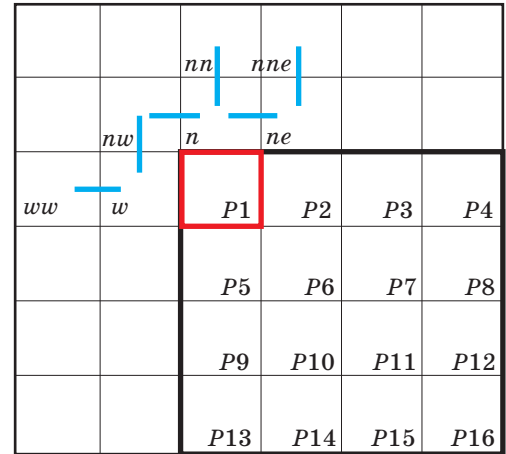
Here, as in ISLE, $(N \times N)$ -size block generates N^2 unknowns (number of pixels in lost block) and correspondingly N^2 equations, which are solved using the matrix representation. This technique is more effective than ISLE due to additional known information (additional known pixels). It should be noted that due to the symmetry, the number of the lost pixels changes.

The formulas for calculating the missing pixels values for block on Fig. 6 are (clockwise from left top pixel):

$$P_1 = \frac{A + B + C + P_2 + P_4 + P_3 + S + T}{8};$$



■ Fig. 5. Intra Prediction using System of Linear Equations by symmetric scanning



■ Fig. 6. Neighboring pixels used in prediction and modeling, and the estimated gradients of the image for standard CALIC by left top down scanning

$$P_2 = \frac{B+C+D+P_6+P_8+P_4+P_3+P_1}{8};$$

$$P_3 = \frac{T+P_1+P_2+P_4+P_{16}+P_{15}+R+S}{8};$$

$$P_4 = \frac{P_1+P_2+P_6+P_8+P_{12}+P_{16}+P_{15}+P_3}{8};$$

$$P_5 = \frac{D+E+F+G+H+P_7+P_8+P_6}{8};$$

$$P_6 = \frac{C+D+E+P_5+P_7+P_8+P_4+P_2}{8};$$

$$P_7 = \frac{P_6+P_5+G+H+I+P_{11}+P_{12}+P_8}{8};$$

$$P_8 = \frac{P_2+P_6+P_5+P_7+P_{11}+P_{12}+P_{16}+P_4}{8};$$

$$P_9 = \frac{P_{12}+P_{11}+I+J+K+L+M+P_{10}}{8};$$

$$P_{10} = \frac{P_{16}+P_{12}+P_{11}+P_9+L+M+N+P_{14}}{8};$$

$$P_{11} = \frac{P_8+P_7+H+I+J+P_9+P_{10}+P_{12}}{8};$$

$$P_{12} = \frac{P_4+P_8+P_7+P_{11}+P_9+P_{10}+P_{14}+P_{16}}{8};$$

$$P_{13} = \frac{R+P_{15}+P_{16}+P_{14}+N+O+P+Q}{8};$$

$$P_{14} = \frac{P_{15}+P_{16}+P_{12}+P_{10}+M+N+O+P_{13}}{8};$$

$$P_{15} = \frac{S+P_3+P_4+P_{16}+P_{14}+P_{13}+Q+R}{8};$$

$$P_{16} = \frac{P_3+P_4+P_8+P_{12}+P_{10}+P_{14}+P_{13}+P_{15}}{8}. \quad (15)$$

Now there are 16 equations for 16 unknowns P_1-P_{16} which are solved using the matrix form of system of linear equations $Ax=B$, where vector x is P_1-P_{16} .

Standard CALIC by left top down scanning. CALIC is the special framework that obtains higher lossless compression of continuous-tone images than other lossless image coding techniques mentioned in the literature [1]. This high coding efficiency is achieved with relatively low time and space complexities. CALIC is a sequential coding scheme that encodes and decodes in raster scan order with a single pass through the image. The coding process uses prediction and context templates that involve only the two previous scan lines of coded pixels. Consequently, the encoding and decoding algorithms require a simple two-line buffer that holds the two rows of pixels that immediately precede the current pixel.

Fig. 6 presents the neighboring pixels used in prediction and modeling, and the estimated gradients of the image, when P_1 is the first (in missed block) predicted pixel $I_p[i, j]$, let's mark it I_p . All the definitions and the prediction (that is concealment) showed in [1] and it is the procedure for left corner in our suggested modified method.

Mathematical and Statistical Description of Wireless Channel with Fading

Following [27, 28] we propose using the Ricean law, described by Ricean cumulative distribution function (CDF) and probability density function, for all the situations in the channel, including the worst

and the best cases. From a practical point of view, the mean and the variance of Ricean distribution are used applying the Ricean fading parameter, K . Following expression (8), according to [29], for $K < 2$:

$$\mu_r(K) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n}{\pi(2n-1)!} K^n, \quad (16)$$

where as for $K \geq 2$:

$$\mu_r(K) = \sqrt{2K} \left(1 - \frac{1}{4K} + \frac{1}{K^2} \right). \quad (17)$$

The same approximations can be obtained for the variance following derivations of expression (9) made in [29]. Thus, for $K < 2$:

$$\sigma_r^2(K) = 1 - \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \exp \left\{ -\frac{K}{\sqrt{2}} \right\}, \quad (18)$$

where as for $K \geq 2$:

$$\sigma_r^2(K) = 1 - \frac{1}{4K} \left(1 + \frac{1}{K} - \frac{1}{K^2} \right). \quad (19)$$

Using relations between the PDF and CDF, expression (10) allows us to obtain the Rayleigh CDF presentation:

$$\begin{aligned} CDF(R) &\equiv \Pr(r \leq R) = \int_0^R PDF(r) dr = \\ &= 1 - \exp \left\{ -\frac{R^2}{2\sigma_r^2} \right\}. \end{aligned} \quad (20)$$

Using (7) for the Ricean PDF, there is a more difficult formula for Ricean CDF with respect to Rayleigh CDF due to summation of an infinite number of terms, such as:

$$\begin{aligned} CDF(R) &= 1 - \exp \left\{ -\left(K + \frac{r^2}{2\sigma_r^2} \right) \right\} \times \\ &\times \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{\sigma_r \sqrt{2K}}{r} \right) I_m \left(\frac{r \cdot \sqrt{2K}}{\sigma_r} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Here $I_m(\cdot)$ is the modified Bessel function of the first kind and m -th order. Once more, the Ricean CDF depends only on parameter K and is limited to the Raleigh CDF and the Gaussian CDF for $K=0$ and for $K \rightarrow \infty$ respectively. Clearly, the CDF formula (21) is more complicated to evaluate analytically or numerically than the PDF formula (7). However, in practical terms, it is sufficient to use m up to the value where the last term's contribution becomes less than 0.1%. It was shown in [17] that for a Ricean CDF with $K=2$, the 14 dB of a fading outage probability is about 10^{-2} .

New method for the determining of BER in Ricean fading channel is offered by [30]. In order to calculate the BER, this method uses level crossing rate (LCR) and average fade duration (AFD).

Level crossing rate, N_x , is the expected rate at which the received signal envelope crosses the threshold in a positive-going or negative-going direction [31]. AFD, $\langle \tau \rangle$, is the average period of time for which the receiver signal envelope is below a threshold X [31]. We present the formulas of the LCR and the AFD according to [32]. The LCR formula is:

$$\begin{aligned} N_x(X) &= \frac{2X\sqrt{2\zeta}}{\pi^{3/2}K(0)} e^{-(X^2+\rho^2)/K(0)} \times \\ &\times \int_0^{\pi/2} \cosh \left(\frac{2X\rho \cos \alpha}{K(0)} \right) \times \\ &\times \left[e^{-\xi\rho \sin \alpha} + \sqrt{\pi} \xi \rho \sin \alpha Q(\xi\rho \sin \alpha) \right] d\alpha, \end{aligned} \quad (22)$$

where X is the level of the received input signal (threshold); $Q(\cdot)$ is the error function [29, 31, 33]:

$$Q(w) = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left\{ \frac{w}{\sqrt{2}} \right\}, \quad (23)$$

where

$$\operatorname{erf}\{w\} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w e^{-y^2} dy; \quad (24)$$

ρ is the amplitude of the LOS component of the signal strength [31]:

$$\rho = \sqrt{\frac{K}{K+1}}; \quad (25)$$

σ is the standard deviation [31]:

$$\zeta = -\frac{1}{2} K''(0) - \frac{\operatorname{Im}\{K'(0)\}^2}{2K(0)} \quad (26)$$

and ξ is presented from [31] by the following expression:

$$\xi = \frac{\left[\omega_D \cos \alpha_0 - \frac{\operatorname{Im}\{K'(0)\}}{K(0)} \right]}{\sqrt{2\zeta}}, \quad (27)$$

where α and α_0 are the angle and the initial angle between the transmitting and receiving antennas and the functions $K(0)$, $K'(0)$ and $K''(0)$ are defined in [32] as:

$$K(0) = \frac{1}{K+1};$$

$$K'(0) = -\frac{i\omega_D}{K+1} \left[\frac{\cos\theta \cdot I_1(k)}{I_0(k)} \right];$$

$$K''(0) = \frac{\omega_D^2}{2(K+1)} \left[1 + \frac{\cos 2\theta \cdot I_2(k)}{I_0(k)} \right], \quad (28)$$

where K (K -factor) is one of inputs that defines the relative strength of LOS component and the multipath scattered component; $I_n(k)$, $n=1, 2, 3, \dots$ are the n -th order modified Bessel functions of the first kind; k is the beamwidth of arriving waves, θ is the angle between the average scattering direction and the mobile vehicle direction.

The AFD can be defined as:

$$\langle \tau \rangle = \frac{1}{N_x} CDF(X), \quad (29)$$

where $CDF(X)$ is the probability of the event in which the received signal envelope does not exceed a specific level X , that is:

$$CDF(X) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad (30)$$

where τ_i is the duration of the fade and T is the observation interval of the fading signal (see Fig. 7), when:

$$N_x = \sum_m^M n_{x_m}. \quad (31)$$

After inserting the (30) in the (28), the resulting AFD defines percent of the bit time duration affected by Ricean fading. In order to calculate the BER the following formula is used:

$$BER \equiv P_6 = \frac{\text{number of bits in error per second}}{\text{number of bits in data per second}} \quad (32)$$

in which the number of bits in data per second constitutes the rate (R) of bit stream and the number of bits in error per second constitutes the LCR [31]. Put differently, LCR is the number of crosses per second, N_x . Therefore, (32) can be written as:

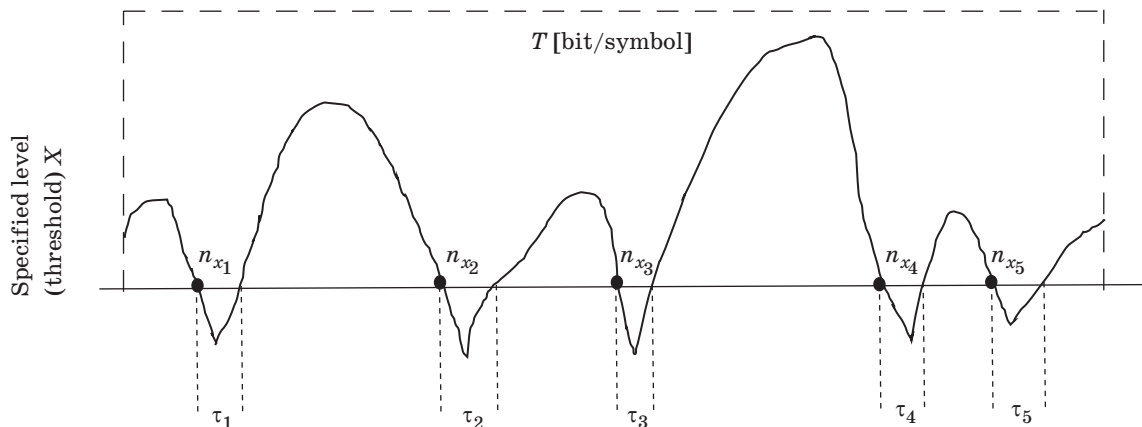
$$BER = \frac{N_x}{R}. \quad (33)$$

In further computations the above formula is used to estimate the BER in the channel with the Ricean fading. It is necessary to note that the LCR (N_x) is a general expression for the envelope LCR and contains the formula of Rayleigh N_x from [29, 34, 35], taking into account as well the notion that it is a formula of LCR for the channel with Rayleigh fading:

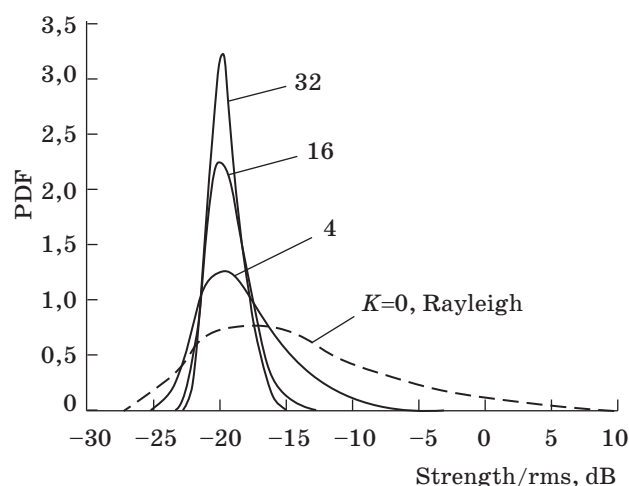
$$N_x = \sqrt{2\pi} f_m \zeta e^{-\zeta^2}. \quad (34)$$

Thus, (22) contains a special case of Rayleigh fading, usually used for Doppler effect estimation through the LCR estimates [19, 36, 37]. On this basis, it can be assumed that the formula of BER calculating for the channel with Ricean fading using different K -factor values allows us to get the BER of the channel with Rayleigh fading (low K) and the BER of the channel with Gaussian fading (high K). It follows that Ricean distribution law covers both the Rayleigh and Gauss laws. This is achieved by using the Ricean parameter of fading, K , which in situations of bad clearance between two terminals ($K \rightarrow 0$) transforms Ricean CDF and PDF to their Rayleigh counterparts [described by (10)], and in situations of good clearance between two terminals without any multipath components ($K \rightarrow \infty$) transforms Ricean CDF and PDF to their Gaussian counterparts yielding "Dirac-delta shaped" PDF [described by (1)] (Fig. 8) [29].

Such it is clear that the Ricean channel behaves like AWGN channel in the limit as $K \rightarrow \infty$, and like Rayleigh multipath channel when $K = 0$ or $K \rightarrow 0$.



■ Fig. 7. The illustration of definitions of the signal fading statistical parameters LCR and AFD



■ Fig. 8. Ricean PDF distribution versus ratio of signal to rms

It should be noted that the using of the formula for calculating the BER in the Ricean channel with the aim of receiving BER of AWGN and Rayleigh channels is logical and convenient, because usually there exists a spectrum of “average” cases with “medium” levels of noise, interferences and errors. These average cases produce the Ricean channel, and in “extreme” cases it is possible to quickly get the BER for Rayleigh and Gaussian channels without changing the concept.

To demonstrate the veracity of the BER, calculated using LCR formula for three models of channels, the graph has been constructed. This graph demonstrates that different values of K are obtained curve BER. The graph also shows that a low K leads to the BER closer to Rayleigh case, while a high K leads to the BER closer to Gauss occasion. All the results are shown and described in the Part 2.

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., Kol 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.
11. Jakes W. C. *Microwave Mobile Communications*. New York, John Wiley & Son, 1974. 480 p.
12. Steele R. *Mobile Radio Communication*. IEEE Press, 1992. 395 p.
13. Stuber G. L. *Principles of Mobile Communications*. Boston-London, Kluwer Academic Publishers, 1996. 497 p.
14. Blaunstein N., and Andersen J. B. *Multipath Phenomena in Cellular Networks*. Boston-London, Artech Houses, 2002. 296 p.
15. Saunders S. R. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. New York, John Wiley & Sons, 1999. 409 p.
16. Bertoni H. L. *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*. New Jersey, Prentice Hall PTR, 2000. 258 p.
17. Blaunstein N. *Wireless Communication Systems*. Chapter 12. In: *Handbook of Engineering Electromagnetics*. Ed. by Rajeev Bansal. New York, Marcel Dekker, 2004. 67 p.
18. Rappaport T. S. *Wireless Communications*. New York, Prentice Hall PTR, 1996. 642 p.
19. Lee W. Y. C. *Mobile Cellular Telecommunications Systems*. New York, McGraw Hill, 1989. 563 p.
20. Leon-Garcia A. *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*. New York, Addison-Wesley Publishing Company, 1994. 349 p.
21. Stark H., and Woods J. W. *Probability, Random Processes, and Estimation Theory for Engineers*. New Jersey, Prentice Hall, 1994. 376 p.

22. Goldsmith A. J., and Chua S. G. Variable-Rate Variable-Power MQAM for Fading Channels. *IEEE Trans. Commun.*, 1997, no. 11, pp. 1218–1230.
23. Chen T. P.-C., and Chen T. Second-Generation Error Concealment for Video Transport over Error-Prone Channels. *Wireless Commun. and Mobile Computing*, 2002, no. 4, pp. 607–624. doi:10.1002/wcm.83
24. Sun M. T., and Reibman A. R. *Compressed Video over Networks*. New York, Marcel Dekker, 2001. 358 p.
25. Doshkov D., Ndjiki-Nya P., Lakshman H., Koppel M., and Wiegand T. Towards Efficient Intra Prediction Based on Image Impainting Methods. *28th Picture Coding Symp., PCS2010*, December 8–10, 2010, Nagoya, Japan, 6 p.
26. Chen B. N., and Lin Y. Selective Motion Field Interpolation for Temporal Error Concealment. *Intern. Conf. on Computer and Communication Engineering 2006 (ICCE 2006)*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 9–11, 2006, 6 p.
27. Blaunstein N., Arnon S., Zilberman A., and Kopeika N. *Applied Aspects of Optical Communication and LIDAR*. Taylor and Francis Group, 2010. 262 p.
28. Blaunstein N. *Radio Propagation in Cellular Networks*. Boston-London, Artech House, 2000. 386 p.
29. Blaunstein N., and Christodoulou C. G. *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Networks*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2007. 614 p.
30. Blaunstein N., and Yarkoni N. Data Stream Parameters Prediction in Land and Atmospheric MIMO Wireless Communication Links with Fading. *2nd European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP 2007)*, Edinburgh, November 2007, pp. 123–126.
31. Tepedelenlioglu C., et al. Estimation of Doppler Spread and Spatial Strength in Mobile Communications with Applications to Handoff and Adaptive Transmissions. *J. Wireless Commun. Mobile Computing*, 2001, no. 2, pp. 221–241.
32. Goldsmith A. J. *Wireless Communications*. New Jersey, Wiley & Sons, 2004. 419 p.
33. *Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications*. Ed. by E. Krouk and S. Semenov. United Kingdom, Wiley, 2011. 662 p.
34. Katz B., Greenberg S., Yarkoni N., Blaunstein N., and Giladi R. New Error-Resilient Scheme Based on FMO and Dynamic Redundant Slices Allocation for Wireless Video Transmission. *IEEE Trans. on Broadcasting*, 2007, no. 1, pp. 127–135.
35. Rappaport T. S. *Wireless Communications Principles and Practice*. New York, Prentice Hall, 1996. 452 p.
36. Blaunstein N., and Cristodoulou Ch. *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Networks*. New Jersey, Hoboken, John Wiley & Sons, 2014. 683 p.
37. Molisch A. F. *Wireless Communications*. London, Wiley and Sons, 2006. 622 p.

УДК 621.39

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.72

Оптимизация маскирования ошибок на основе анализа затухания типов фадинга Часть 1: Статистическое описание беспроводного видеоканала, модели определения BER и маскирования ошибок видеосигналов

Хадар Офер^а, Phd, доцентБронфман Ирина^б, MSc студентБлаунштейн Натан^{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 в видеофайле ошибок, 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.

МЕТОД СОГЛАСОВАННОГО ПОВЕДЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ И АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ВЕДЕНИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Л. А. Мартынова^а, доктор техн. наук, старший научный сотрудник
^аАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: традиционное использование для сейсморазведки стационарных геофонов, прикрепляемых к дну, затратно и малоэффективно. Размещение геофонов на автономных обитаемых подводных аппаратах позволяет частично автоматизировать сейсморазведку, перейдя от статической схемы использования геофонов для прослушивания отраженных сигналов, создаваемых излучателем, к динамической. При динамической схеме группа автономных обитаемых подводных аппаратов постепенно перемещается вместе с излучателем, при этом основная часть геофонов занята приемом отраженного сигнала, а остальная часть — перемещением вместе с автономными обитаемыми подводными аппаратами в новое место, что существенно сокращает время ведения сейсморазведки. Однако при этом возникает проблема согласованного поведения группы автономных обитаемых подводных аппаратов с движением излучателя. **Цель исследования:** разработка метода согласованного поведения группы автономных обитаемых подводных аппаратов и излучателя при ведении сейсморазведки. **Результаты:** разработан метод координации движения излучателя и поступательного движения группы автономных обитаемых подводных аппаратов, при котором излучатель, двигаясь по смещающейся круговой траектории, постоянно описывает окружность вокруг положения перемещающейся группы автономных обитаемых подводных аппаратов. На основе специально разработанной математической модели найдены оптимальные значения параметров согласованного движения излучателя и группы автономных обитаемых подводных аппаратов, которые позволили обеспечить наиболее широкий диапазон азимутов направлений прихода отраженных сигналов, создаваемых излучателем. **Практическая значимость:** применение динамической схемы использования геофонов приводит к существенному сокращению времени на проведение сейсморазведки в заданном районе по сравнению с использованием статической схемы, а также значительно возрастает подвижность всей системы «группа автономных обитаемых подводных аппаратов — излучатель», а значит, и возможность оперативного изменения параметров согласованного движения в зависимости от сложившейся при ведении сейсморазведки ситуации.

Ключевые слова — автономный обитаемый подводный аппарат, метод согласованного поведения, азимуты, среднеквадратическое отклонение.

Введение

Поиску залежей углеводородов в морском дне в настоящее время уделяется повышенное внимание, особенно в Арктических районах [1–3].

При поиске залежей углеводородов основными задачами являются:

- обнаружение месторождения углеводородов;
- локализация его положения.

Арктические территории покрыты льдом, что делает невозможным использование ряда широко известных методов разведки углеводородов, например, с применением сейсмокос. Поэтому наиболее целесообразным в ледовых условиях способом считается сейсморазведка с использованием геофонов, прикрепленных к дну [4–13]. Однако указанный способ является трудоемким и чрезмерно продолжительным, поскольку большая часть времени затрачивается на подготовительные работы, включающие следующие операции:

- распределение геофонов по морской поверхности;
- опускание геофонов на морское дно;
- прикрепление геофонов к дну с определенной их ориентацией;

- позиционирование геофонов;
- всплытие геофонов после проведения измерений;
- сбор по поверхности моря всплывших геофонов.

В настоящее время предпринимаются попытки автоматизировать часть перечисленных мероприятий, например, осуществлять самопогружение геофонов с укладыванием на дно и всплытие без внешней помощи в заданный момент времени [14–16]. Другим вариантом совершенствования сейсморазведки месторождений углеводородов является автоматизация перемещения геофонов путем помещения каждого геофона в корпус автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА) [17, 18].

Помещение каждого геофона в корпус АНПА открывает широкие возможности формирования динамической системы ведения сейсморазведки залежей углеводородов, поскольку геофон с АНПА может самостоятельно всплывать на заданную глубину, перемещаться в указанную точку и опускаться на дно для прослушивания отраженных сигналов, создаваемых специальным излучателем-вибратором (далее по тексту — излучатель). Поскольку для ведения сейсморазведки

необходимо несколько геофонов, то формируется группа АНПА. При этом эффективное ведение сейсморазведки возможно только при согласованных действиях излучателя и группы АНПА, которые в свою очередь обеспечиваются оптимальным выбором параметров их взаимного функционирования.

Целью настоящей работы является разработка метода согласованного поведения излучателя и группы АНПА и определение параметров метода, обеспечивающих эффективное ведение сейсморазведки в заданном районе.

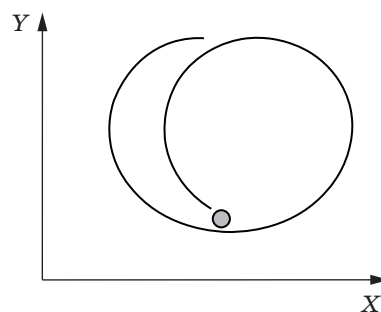
Для достижения цели в работе были решены следующие задачи:

- обоснована оптимальная траектория движения излучателя;
- предложена оптимальная эффективная схема перемещения группы АНПА с геофонами на борту;
- определены параметры согласованного функционирования излучателя и группы АНПА;
- определены параметры метода, обеспечивающие эффективную сейсморазведку в заданном районе, на основании результатов проведенных исследований и численных экспериментов.

Описание предлагаемого метода согласованного функционирования излучателя и группы АНПА

Поиск донных месторождений углеводородов проводится следующим образом. В заданном районе прикрепляются к дну геофоны в точках, расположенных в узлах условной сетки, покрывающей дно заданного района. Вблизи донной поверхности осуществляется перемещение излучателя, зондирующего донную поверхность импульсными сигналами. Частоты излучаемых сигналов согласованы с особенностями отражения сигналов залежами углеводородов. Геофоны, каждый из которых расположен в АНПА, принимают отраженные сигналы от залежей углеводородов в придонном слое. По разности моментов времени приема геофонами отраженных сигналов определяется местоположение залежей углеводородов.

Из литературы известно, что для повышения точности определения местоположения залежей углеводородов наиболее целесообразно перемещение излучателя по круговым траекториям (циклоидам) [19, 20] (рис. 1). Так, при исследовании точности метода в зависимости от траектории движения излучателя относительно АНПА показано, что траектория движения излучателя должна быть такой, чтобы курсовые углы излучателя относительно АНПА в моменты времени измерения отраженного сигнала периодически меняли борт и изменялись в возможно широких пределах [20]. Переход от прямолинейного дви-



■ *Рис. 1.* Внешний вид круговой траектории движения излучателя (по циклоиде)

жения по параллельным направлениям к круговому движению излучателя при обследовании заданного района способствует повышению широкоазимутальности направлений отраженных сигналов. Широкоазимутальная сейсморазведка гарантирует получение данных в широком диапазоне направлений сейсмических лучей. Опыт показал [20], что этот метод обеспечивает более качественное освещение разреза, более высокое соотношение сигнал/помеха и лучшую разрешающую способность сейсмоземки в сложных геологических условиях, например, в пластах, подстилающих соляные тела сложной формы. Указанные факторы оказывают существенное влияние на точность позиционирования месторождений углеводородов.

Использование традиционной схемы со стационарными геофонами, при которой сначала все геофоны опускаются и прикрепляются к дну, затем следует процесс приема и регистрации отраженного сигнала, затем — синхронное всплытие всех геофонов и их перемещение в новые позиции для следующего приема отраженных сигналов, приводит к тому, что часть времени расходуется на выполнение технологических операций с геофонами: открепление от дна, перемещение, прикрепление к дну, определение собственного местоположения, подготовку к приему отраженного сигнала.

В настоящей работе предлагается метод поиска залежей углеводородов, основанный на использовании преимуществ АНПА по сравнению со стационарными геофонами, а именно способности их свободно перемещаться, причем независимо друг от друга.

Предлагаемый метод согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА заключается в следующем. В то время как большая часть АНПА из группы прикреплена к дну и принимает отраженный сигнал, создаваемый излучателем, другая часть АНПА перемещается для занятия новой позиции, не участвуя при этом в приеме отраженных сигналов. После занятия новой позиции прием отра-

женных сигналов осуществляет группа АНПА в обновленном составе, при этом часть АНПА, не задействованная в приеме отраженного сигнала, осуществляет перемещение в места новой своей дислокации. Тем самым достигается динамичность функционирования всей системы в целом и непрерывность ведения сейсморазведки.

Определение параметров метода

Очевидно, что использование метода согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА подразумевает тщательную координацию действий излучателя и группы АНПА.

Математически сказанное означает следующее.

1. Если предположить, что скорость перемещения группы — $V_{гр}$, то скорость перемещения центра окружности $V_{ц}$, вдоль которой происходит круговое вращение излучателя, определяется равенством скоростей:

$$V_{ц} = V_{гр}.$$

2. Угловая скорость $\Delta\alpha$ движения излучателя по окружности радиуса R описывается выражением

$$\Delta\alpha = \frac{V_{изл.}}{R}.$$

3. Скорость движения группы АНПА определяется количеством рядов АНПА, которые последовательно перемещаются. При этом диапазон изменения скорости движения группы в зависимости от количества перемещаемых рядов определяется выражением

$$V_{гр} = \frac{N}{M} V_{ц},$$

где N — количество задействованных рядов АНПА при перемещении; M — общее количество рядов АНПА в группе вдоль направления перемещения.

Приведенные параметры являются основополагающими в методе согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА при ведении сейсморазведки и практически не зависят друг от друга.

В то же время на их значения могут быть наложены существенные ограничения, например, из-за мощности излучателя, оказывающей влияние на дальность приема геофонами отраженных сигналов.

Предельная дальность приема отраженных сигналов ставит ограничения, с одной стороны, на размеры группы, поскольку излучателю целесообразно осуществлять движение вдоль окруж-

ности, геометрически описывающей положение группы, а с другой стороны, на радиус окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, по указанным выше причинам.

Из-за ограничений по дальности приема отраженных сигналов может оказаться, что размер обследуемой зоны (назовем ее локальной зоной) существенно меньше размеров заданного района. В этом случае сейсморазведку необходимо вести путем поэтапного обследования локальных зон, просматривая последовательно зоны одну за другой. При этом возникает ряд дополнительных параметров, которые наряду с перечисленными выше также необходимо оптимизировать. Дополнительными параметрами являются:

- количество локальных зон;
- последовательность осмотра локальных зон;
- совокупное время, затрачиваемое на осмотр локальных зон.

Рассмотрим причины выбора значений перечисленных параметров метода согласованного поведения излучателя и группы АНПА.

На скорость движения группы АНПА влияние оказывает размер группы, характеризуемый:

- дистанцией между рядами АНПА вдоль осей X и Y ;
- количеством АНПА в ряду;
- количеством рядов в группе;
- топологией размещения АНПА в группе.

Во многом параметры группы определяются ограничениями, наложенными на АНПА. С одной стороны, при движении группы должен быть обеспечен бесстолкновительный режим движения АНПА, что лимитирует дистанцию сближения АНПА друг с другом. С другой стороны, для поддержания возможности обмена информацией АНПА друг с другом (по крайней мере — с ближайшим) дистанция расхождения двух АНПА между собой не должна превышать некоторого допустимого значения.

Геометрическая протяженность группы вдоль осей X и Y определяется соотношениями

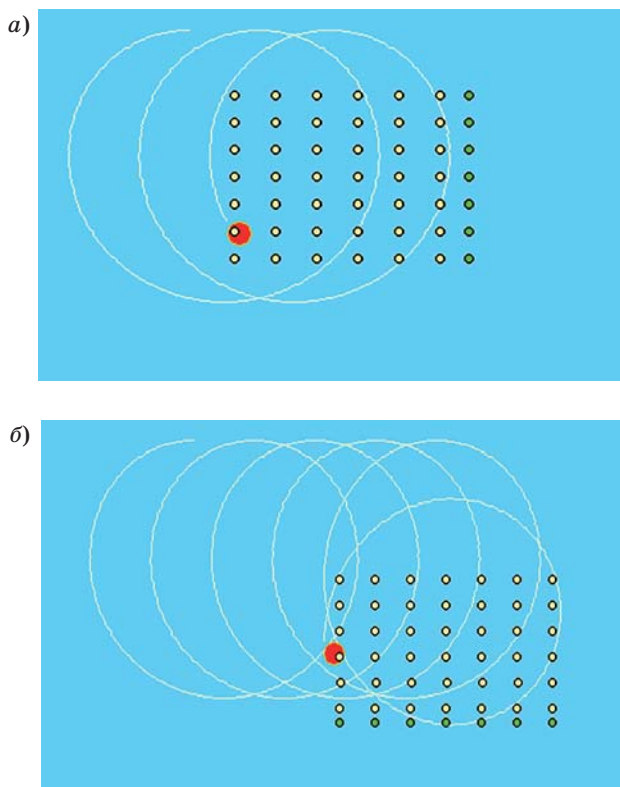
$$L_x = M_x \cdot \Delta X; L_y = M_y \cdot \Delta Y,$$

где L_x, L_y — протяженность группы вдоль осей X и Y ; M_x, M_y — количество АНПА в ряду вдоль осей X и Y .

Тогда траектория, вдоль которой происходит движение излучателя, является окружностью, описанной вокруг группы, и ее радиус R определяется выражением

$$R = \frac{\sqrt{2}}{2} L,$$

где L — максимальная геометрическая протяженность группы в одном из направлений X и Y :
 $L = \max\{L_x, L_y\}.$



■ **Рис. 2.** Начальный и промежуточный моменты согласованного движения излучателя и группы АНПА: последовательное перемещение группы АНПА прямолинейно (а) и с изменением направления поворотом группы направо (б)

На скорость перемещения группы АНПА влияние оказывают:

- технологические возможности и временные ограничения, необходимые на выполнение технологических операций по размещению геофонов;
- ограничения на параметры перемещения излучателя и его функционирования.

Условия координации движения излучателя и группы АНПА находятся в некотором противоречии друг с другом, поскольку определяются, с одной стороны, непрерывностью ведения сейсморазведки, что обеспечивает безусловный экономический эффект функционирования всей системы в целом, а с другой стороны, необходимостью в течение некоторого времени удерживать в неподвижном положении АНПА, прикрепленные к дну, для прослушивания отраженных сигналов.

Параметрами, оказывающими влияние на траекторию перемещения излучателя, являются:

- радиус окружности, вдоль которой происходит вращение излучателя;
- линейная скорость движения излучателя вдоль окружности;

- параметры траектории перемещения центра окружности;
- скорость перемещения центра окружности.

Относительно движения центра окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, необходимо отметить, что излучатель может перемещаться по более сложной траектории, чем прямая линия (при циклоиде), если это будет оправдано эффективностью функционирования всей системы в целом.

Выбор параметров метода согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА при ведении сейсморазведки основан на обеспечении координированного поведения излучателя и группы АНПА (рис. 2, а и б).

Для определения оптимальных параметров метода согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА необходимо установить показатели, на основе которых осуществляется выбор оптимальных параметров.

Показатели, по которым осуществляется выбор параметров метода

Одним из важнейших показателей, положенных в основу выбора параметров метода, является широкоазимутальность прихода отраженных сигналов, оказывающая, в свою очередь, влияние на точность определения местоположения залежей углеводородов. Поэтому выбор параметров системы ведения сейсморазведки осуществлялся на основе оценки степени широкоазимутальности, выраженной отклонением полученных значений азимутов от равномерного распределения азимутов в диапазоне $[0, 360^\circ]$. Степень отклонения выражена среднеквадратическим отклонением (СКО) азимутов от среднего их значения по результатам полного цикла измерений в ходе проведения численного эксперимента.

Расчет средних значений азимутов производится по формуле

$$MO = \frac{\sum_{i=1}^M Az_i}{M}.$$

Здесь M — количество АНПА в группе, означающее, что в каждый i -й момент времени поступает M азимутов для обработки.

С течением времени происходит накопление азимутов по каждому из АНПА:

$$Az_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{i_time} Az_j,$$

где i_time — текущий момент времени; Az_{Σ} — накопленное за период времени до i_time количество азимутов по каждому из i направлений.

Среднеквадратическое отклонение азимутов в каждый момент времени определяется с учетом накоплений по каждому из направлений следующим выражением:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{(Az_i - Az_{MO})^2}{M}}, \quad i=1, i_time.$$

По результатам совокупности всех измерений в процессе проведения численного эксперимента определяется среднее значение СКО азимутов

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_i}{K}, \quad i=1, i_time,$$

где K — количество моментов измерений.

Далее проводится оценка количества локальных зон, покрывающих заданный район ведения сейсморазведки. При этом учитываются:

- степень покрытия локальными зонами всего заданного района;
- степень перекрытия локальных зон друг другом.

В качестве исходных данных использовались размеры локальной зоны ведения сейсморазведки, полученные при определении оптимальных значений параметров метода согласованного поведения излучателя и группы АНПА.

Выбор наилучшей схемы последовательности обследований локальных зон определялся из условия максимально возможного покрытия площади заданного района локальными зонами при минимальном количестве перекрытий локальными зонами друг друга.

Количество локальных зон вдоль осей X и Y определяется соотношениями

$$N_x = \frac{L_x \text{ района}}{L_x}; \quad N_y = \frac{L_y \text{ района}}{L_y},$$

где L_x района и L_y района — размеры района вдоль осей X и Y соответственно.

Определение параметров метода согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА осуществляется по результатам численного эксперимента путем моделирования согласованного функционирования излучателя и группы АНПА.

Определение оптимальных параметров метода

Выбор оптимальных параметров метода согласованного функционирования (поведения) излучателя и группы АНПА осуществлялся в два этапа.

На первом этапе были проведены исследования влияния радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, на степень равно-

мерности распределения азимутов направлений прихода отраженных сигналов. Маршрут движения системы «группа АНПА — излучатель» был построен таким образом, чтобы указанная система описала замкнутый контур в виде прямоугольника. Изменение направления движения группы АНПА происходило за счет изменения формирования ряда той части АНПА, которая осуществляет переход в точки следующей дислокации. В результате предложенной схемы осуществлялся полный обход локальной зоны с приведением группы АНПА в положение, в точности соответствующее стартовому. Реализация замкнутого контура позволяет получить более объективные результаты распределения азимутов направлений прихода отраженного сигнала по сравнению с прямолинейным движением группы АНПА.

По результатам численного эксперимента определялся оптимальный радиус окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя. Значение радиуса позволяет определить размер локальной зоны, в пределах которой происходит движение группы АНПА по замкнутому контуру.

На втором этапе исследований с использованием размеров локальной зоны в качестве исходных данных была проведена оценка количества локальных зон, покрывающих заданный район ведения сейсморазведки, а также определена оптимальная последовательность поиска в локальных зонах. Кроме того, определено рациональное поведение группы АНПА для эффективного ведения сейсморазведки по всей площади заданного района.

При проведении исследований были приняты следующие исходные данные:

по району: рассматривался заданный район 1000×1000 м;

по группе:

- количество АНПА в группе — 49 ед.;
- количество рядов — 7, в каждом ряду по 7 ед.;
- расстояние между АНПА вдоль оси X : $\Delta X = 30$ м, вдоль оси Y : $\Delta Y = 20$ м;
- скорость перемещения группы АНПА определялась количеством рядов группы, перемещающихся вдоль направления движения группы.

Относительно перемещения излучателя принималось, что центр окружности в точности совпадал с геометрическим «центром масс» группы.

Предполагалось, что за время перемещения одиночного ряда АНПА остальная (большая) часть АНПА успевала выполнить последовательно операции заглужения и опускания на дно, прикрепления к дну, позиционирования, приема отраженных сигналов и их регистрации на карту памяти, всплытия и подготовки к дальнейшему перемещению в точку новой дислокации.

В ходе проведения исследований была выполнена серия численных экспериментов, при этом в каждом эксперименте значение радиуса окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, принималось постоянным. Для каждого значения радиуса проводился численный эксперимент, в ходе которого система «группа АНПА — излучатель» описывала полный контур в виде прямоугольника. Значение радиуса варьировалось от 10 до 200 м с шагом 10 м.

На первом этапе проведения исследований при выборе параметров метода согласованного поведения излучателя и группы АНПА ограничения по дальности приема отраженных сигналов не учитывались. В ходе проведения серии численных экспериментов было определено влияние радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, на СКО азимутов (рис. 3).

Из результатов исследований видно следующее.

1. Изменение радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, оказывает влияние на степень широкоазимутальности, выраженной СКО азимутов.

2. С увеличением радиуса окружности СКО азимутов монотонно убывает от 1100 до 180 и достигает минимальной отметки при $R = 100$ м. Дальнейшее увеличение радиуса приводит к увеличению СКО до 380, зафиксированного при $R = 200$ м.

Результаты численного эксперимента показали, что существует оптимальное значение радиуса, при котором СКО азимутов достигает наименьшего значения. Это значение радиуса соответствует окружности, близкой к окружности, описанной вокруг группы АНПА с центром в геометрическом «центре масс» АНПА. Однако, как отмечалось выше, при проведении численного эксперимента ограничения на дальности приема отраженного сигнала не учитывались.

В то же время на практике может оказаться, что мощности излучателя недостаточно для обеспечения полученных дальностей или чувствитель-

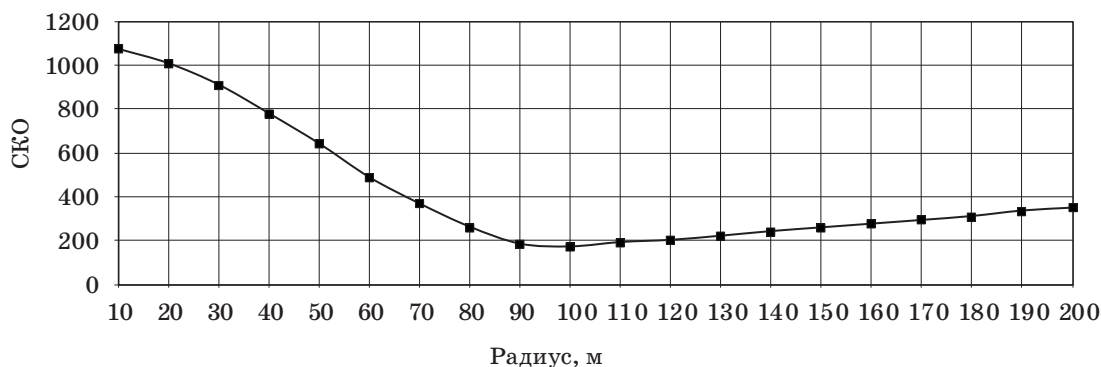
ность геофонов не позволяет различить сигналы, близкие по уровню к шумам окружающей среды. Все это требует учета дальности при проведении исследований. Поэтому далее при тех же самых исходных данных учитывались дальности приема отраженных сигналов следующим образом. Перед проведением эксперимента задавалось предельное значение дальности приема отраженного сигнала. Затем при последовательном изменении радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, проводилась серия численных экспериментов, в ходе которых определялись азимуты, как и в предыдущих экспериментах. Однако на этот раз если оказывалось, что дальность превышает предельное значение, то эти азимуты исключались из статистической обработки результата. Тем самым определялся «вклад» азимутов с повышенной дальностью в общий результат.

По результатам серии экспериментов строился график, аналогичный приведенному на рис. 3. Затем в следующей серии значение предельной дальности менялось, и вновь проводилась серия численных экспериментов с изменением радиуса окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, от 10 до 200 м с шагом 10 м.

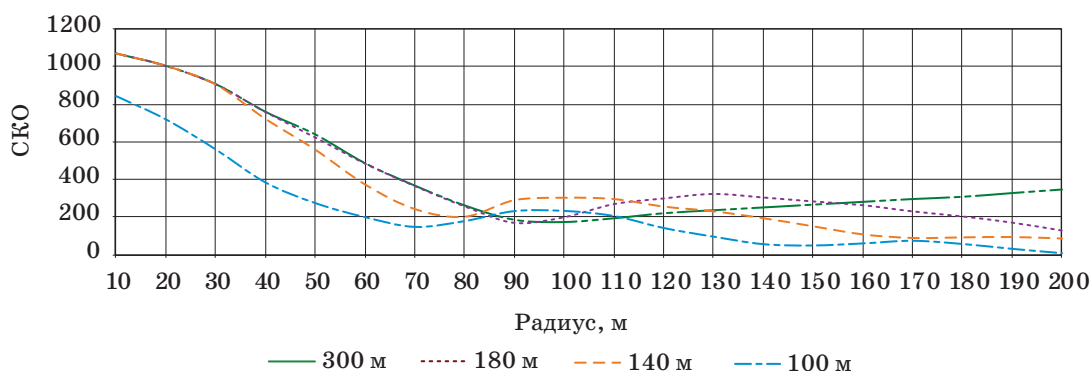
В результате проведения нескольких серий численных экспериментов были определены зависимости влияния радиуса окружности при учете четырех вариантов дальности приема отраженных сигналов (рис. 4) и сделаны следующие выводы.

1. Учет ограничений по дальности приема отраженных сигналов оказывает влияние на СКО азимутов. Так, при уменьшении предельной дальности приема отраженных сигналов от 300 до 100 м снижение по СКО азимутов в среднем произошло на 200.

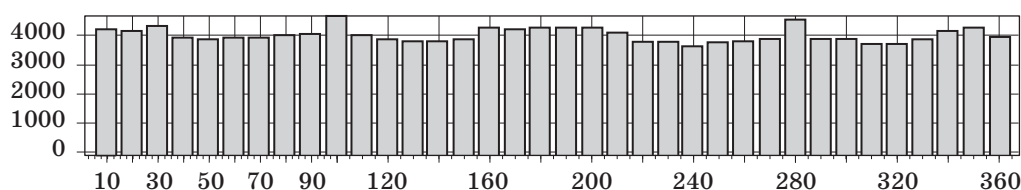
2. Незначительное снижение предельной дальности приема отраженных сигналов, например от 300 до 180 м, приводит к снижению СКО азимутов на больших радиусах — только после 90 м. При этом минимум на радиусе 100 м сохраняется. В дальнейшем наблюдается более интенсивный



■ Рис. 3. Зависимость СКО азимутов от радиуса окружности, вдоль которой происходит вращение излучателя



■ **Рис. 4.** Зависимость SKO от радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, с учетом ограничений по дальностям приема отраженных сигналов

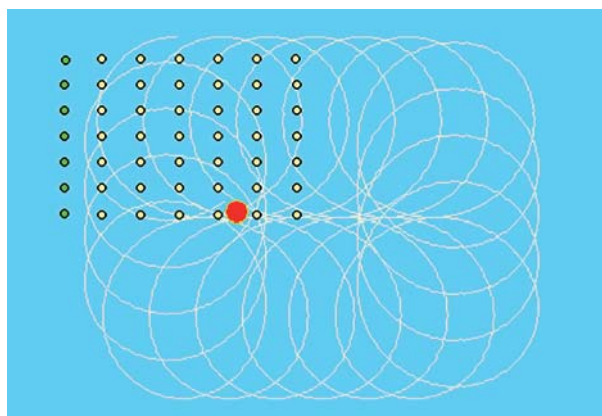


■ **Рис. 5.** Гистограмма распределения азимутов при предельной дальности 100 м

рост SKO азимутов по сравнению с вариантом 300 м, поскольку та часть азимутов, которая способствовала выравниванию азимутов до равномерного распределения и тем самым снижению SKO, была исключена из рассмотрения по причине дальности, превышающей предельное значение. Однако после отметки 130 м наблюдается еще одна точка перегиба, и с дальнейшим увеличением радиуса SKO азимутов начинает снижаться. Объяснить это можно тем, что с ростом радиуса в целом происходит увеличение SKO, однако из-за превышения предельной дистанции из рассмотрения исключается та часть азимутов, которая способствует увеличению SKO азимутов.

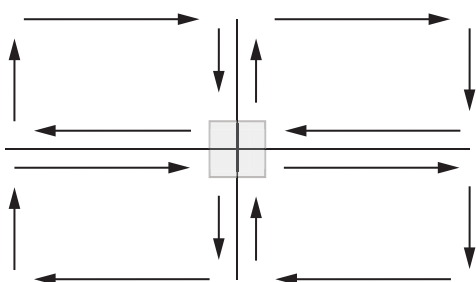
3. Схожий характер зависимости SKO азимутов от радиуса окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, наблюдается при дальнейшем снижении предельной дальности приема отраженных сигналов. При этом положение минимума SKO азимутов смещается: при дистанции 100 м оно составило 70, при дистанции 140 м — 80, при дистанции 180 м — 90, при дистанции 300 м (так же как и при безграничном случае) — 100.

4. При рассмотрении гистограммы распределения азимутов (рис. 5) выявлено, что наименьшее значение SKO азимутов наблюдается при ограничении по дальности 100 м и составляет 148 (см. рис. 4). В этом случае траектория перемещения излучателя вокруг группы АНПА выглядит следующим образом (отображена светлой линией на рис. 6).



■ **Рис. 6.** Зависимость SKO от радиуса окружности, вдоль которой происходит вращение излучателя

Таким образом, результаты проведенных численных экспериментов показали, что для обеспечения эффективного ведения сейсморазведки необходимо согласованно подбирать мощность излучателя и чувствительность геофонов для обеспечения дальности приема отраженных сигналов с учетом радиуса обхода группы АНПА. Приведенные расчеты показывают целесообразность использования оптимальных параметров метода согласованного функционирования излучателя и группы АНПА с учетом ограничений, накладываемых на радиус окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, в свя-



■ Рис. 7. Схема ведения сейсморазведки в заданном районе путем последовательного обследования локальных зон

зи с ограничением по дальности приема отраженных сигналов.

По результатам первого этапа исследований были получены параметры траектории движения излучателя, которые в свою очередь оказывают влияние на размер группы. В целом результаты исследований позволили определить размер локальной зоны, в пределах которой осуществляется наиболее эффективное ведение сейсморазведки. Этим значением является $R = 100$ м, поэтому размеры зоны получились равными 500×500 м.

На втором этапе исследований определялись количество локальных зон и последовательность проведения сейсморазведки в локальных зонах.

Поскольку размер обследуемого района составляет 1000×1000 м, то количество локальных зон, покрывающих заданный район, равно четырем. Поэтому далее при проведении исследований выявлялось оптимальное поведение группы АНПА для эффективного ведения сейсморазведки во всем заданном районе.

Анализ сложившейся ситуации показал, что в целях сокращения времени на обследование заданного района целесообразно просматривать

территорию заданного района поэтапно, путем последовательного перемещения группы АНПА и излучателя из одной локальной зоны в другую, при этом стартовое положение группы при обследовании каждого следующего участка будет иметь начало в точке, совпадающей с точкой окончания сейсморазведки в предшествующей локальной зоне (рис. 7). В этом случае будут отсутствовать временные и материальные затраты на перемещение группы АНПА в точку начала движения в соседней локальной зоне. Излучателю также не придется совершать специальные маневры для перемещения в соседнюю локальную зону.

Одновременно рассчитывалось время, затрачиваемое на сейсморазведку в заданном районе, путем умножения времени, затраченного на сейсморазведку в отдельно взятой локальной зоне, на количество зон в заданном районе.

Заключение

Предложен метод ведения сейсморазведки группой АНПА, отличающийся динамической схемой использования геофонов, прикрепленных к АНПА.

Исследования, направленные на формирование согласованного поведения излучателя и группы АНПА, позволили повысить эффективность ведения сейсморазведки за счет существенного сокращения времени на ее проведение и повышения точности определения положения залежей углеводородов.

Определены параметры метода, обеспечивающие эффективное ведение сейсморазведки в заданном районе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-02928-а).

Литература

1. Фасхутдинов Р. В. Подводные камни морской сейсморазведки // *www.Kogabel.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. и др. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации / Н. П. Лаверов, Л. И. Лобковский, А. В. Тулупов, М. А. Воронов, О. Ю. Ганжа // *Арктика: экология и экономика*. 2011. № 4. С. 4–13.
4. Ковачев С. А. и др. Сейсмичность в районе Кравцовского морского нефтегазового месторождения в Балтийском море / С. А. Ковачев, А. А. Крылов, В. Н. Иванов, Г. К. Тимашкевич, Т. А. Ковачева, А. В. Хортов // *Естественные и технические науки*. 2016. № 4. С. 34–40.
5. Крылов А. А. Некоторые аспекты донных сейсмологических исследований и мониторинга на объектах нефтегазовой добычи и транспортировки на шельфе // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2015. № 9. С. 20–25.
6. Крылов А. А., Иващенко А. И., Ковачев С. А. Оценка сейсмической опасности нефтегазоносных шельфовых зон на примере Северного Каспия // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 6. С. 1006–1012.
7. Крылов А. А. Моделирование реакции пористых водонасыщенных верхних осадков морского шельфа на сейсмические воздействия // *Естественные и технические науки*. 2015. № 10. С. 221–223.
8. Левченко Д. Г. Методы и средства измерения параметров океанической среды автоматическими мно-

- гоцелевыми донными станциями // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 2. http://www.ngtr.ru/rub/12/28_2010.pdf (дата обращения: 17.01.2017).
9. Delaney J. R. NEPTUNE: An Interactive Submarine Observatory at the Scale of a Tectonic Plate. Long-Term Observations in the Oceans // ОНП/ION Joint Symp. Japan, 2001. P. 309.
 10. 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.
 11. Wild P. Practical Application of Seismic Anisotropy // First Break. May 2011. Vol. 29. P. 117–124.
 12. Лаверов Н. П. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4. С. 4–13.
 13. Leurera 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.
 14. Пат. 2381530 РФ. Морская автономная донная станция для выполнения геофизических и геолого-разведочных 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.
 15. 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. Ленков, В. В. Чернявец, А. А. Зайцев, А. Л. Гвоздецкий (РФ). — № 2010103093/28; заявл. 29.01.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. — 14 с.
 16. 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.
 17. 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., Владивосток, 2011. Секция 2. С. 220–224.
 18. 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.
 19. Кебкэл К. Г., Машошин А. И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. № 3. С. 115–130.
 20. Буя М. и др. Морская сейсморазведка по спиральной траектории Coil Shooting / М. Буя, П. Э. Флорес, Д. Хилл, Э. Палмер, Р. Росс, Р. Уокер, М. Хаубирс, М. Томпсон, С. Лаура, Д. Менликли, Н. Молдовану, Э. Снайдер // Нефтегазовое обозрение. 2008. Т. 21. № 4. С. 22–39.

UDC 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83

Concerted Action of a Radiator and Autonomous Uninhabited Submersibles for Effective Seismic ExplorationMartynova L. A.^a, Dr. Sc., Tech., Senior Researcher, martynowa999@bk.ru^aState Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: In seismic exploration, they traditionally use stationary geophones attached to a bottom, which is costly and inefficient. Placement of geophones on autonomous uninhabited submersibles allows you to partially automate the seismic exploration, giving up the static scheme of using the geophones for listening to the reflected signals created by a radiator, and switching to a dynamic scheme when a group of autonomous uninhabited submersibles gradually move together with a radiator. In this case, most geophones are busy accepting the reflected signal, and the rest of them are moving together with the submersibles to a new place. This significantly reduces the seismic exploration time. The problem is that the group of the submersibles should act in agreement with the radiator movement. **Purpose:** We have to develop a method of concerted action for a group of autonomous uninhabited submersibles and a radiator during seismic exploration. **Results:** A method has been developed to coordinate the movement of a radiator and the progress of a group of autonomous uninhabited submersibles when the radiator, moving along a shifting circular trajectory, constantly describes a circle around the position of the moving group of the submersibles. The values of the optimal parameters of their concerted movement were found on the basis of a specially formulated mathematical model. These values allow you to provide the broadest range of azimuths for the directions of the receipt of the reflected signals emitted by the radiator. **Practical relevance:** The dynamic scheme of using the geophones leads to an essentially shorter time necessary for seismic exploration in a given area as compared to the static scheme. Besides, the mobility of the entire system formed by a group of the submersibles and a radiator considerably increases, giving you many more ways to rapidly change the parameters of the concerted movement depending on a particular situation during the seismic exploration.

Keywords — Autonomous Uninhabited Submersible, Concerted Action, Azimuths, Mean Square Deviation.

References

1. Faskhutdinov 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. I., 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. Kovachev S. A., Krylov A. A., Ivanov V. N., Timashkevich G. K., Kovacheva T. A., Hortov A. V. Seismichnost Near the Kravtsovsky Sea Oil and Gas Field in the Baltic Sea. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 4, pp. 34–40 (In Russian).
5. Krylov A. A. Some Aspects of Ground Seismological Researches and Monitoring on Objects of Oil and Gas Production and Transportation on the Shelf. *Zashchita okruzhaiushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2015, no. 9, pp. 20–25 (In Russian).
6. Krylov A. A., Ivashchenko A. I., Kovachev S. A. Assessment of Seismic Danger of Oil-and-Gas Shelf Zones on the Example of the Northern Caspian Sea. *Okeanologiya*, 2015, vol. 55, no. 6, pp. 1006–1012 (In Russian).
7. Krylov A. A. Modeling of Reaction of Porous Water-saturated Upper Rainfall of the Sea Shelf to Seismic Impacts. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 10, pp. 221–223 (In Russian).
8. Levchenko D. G. Methods and Means of Measuring the Parameters of Oceanic Environment by Automatic Multi-Purpose Bottom Stations. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2010, vol. 5, no. 2. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/12/28_2010.pdf (accessed 17 January 2017) (In Russian).
9. 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, pp. 309.
10. 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.
11. Wild P. Practical Application of Seismic Anisotropy. *First Break*, May 2011, vol. 29, pp. 117–124.
12. Laverov N. P. The Prospects of Ground Seismic Exploration in the Russian Federation. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2011, no. 4, pp. 4–13 (In Russian).
13. 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.
14. Mashoshin A. I., Zhumenkov S. V., Zinnatov V. B., Ermakov S. Y., Smirnov A. S. *Morskaya avtonomnaya donnaya stantsiya dlia vypolneniia geofizicheskikh i geologorazvedochnykh rabot* [The Sea Autonomous Ground Station for Accomplishment of Geophysical and Exploration Works]. Patent RU, no. 2381530, 2008.
15. 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. *Avtonomnaya donnaya stantsiya dlia seismicheskikh nabludeniï* [Independent Bottom Station For Seismic Observations]. Patent RU, no. 2438149, 2010.
16. Sukonkin S. J., Rybakov N. P., Belov S. V., Chervinchuk S. J., Koshurnikov A. V., Pushkarev P. J., Chernjavets V. V. *Podvodnaya geofizicheskaia stantsiya* [Underwater Geophysical Station]. Patent RU, no. 2435180, 2010.
17. 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"], 2011, Section 2, Vladivostok, pp. 220–224 (In Russian).
18. 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 seismogidrokusticheskaia stantsiya 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.
19. 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).
20. Flores P. E., Hill D., Palmer E., Ross R., Walker R., Haurbirs 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).

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Н. А. Жильникова^а, канд. техн. наук, доцент

А. И. Шишкин^б, канд. техн. наук, профессор

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

М. А. Епифанова^б, аспирант

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

^бСанкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: для создания системы экологического управления природно-техническими комплексами необходима организация алгоритмического обеспечения обоснования квот нагрузки для каждого субъекта средствами геоинформационного моделирования. **Результаты:** разработана структура представления территориального природно-технического комплекса в виде объектов геоинформационной системы, что позволяет выполнить анализ и обработку данных средствами геоинформационной технологии с оценкой для каждого значения используемых в соответствии с предложенной методикой параметров. Для реализации разработанного алгоритма создана геоинформационная моделирующая система управления распределением квот нагрузки между субъектами по сложным атрибутивным и пространственным запросам, которая позволяет решать задачи долгосрочного (стратегического), оперативного (текущего) управления, а также управления в условиях чрезвычайных ситуаций. Целевой функцией алгоритма оптимизации распределения нагрузки между всеми водопользователями бассейна является обеспечение заданного класса качества воды при наиболее эффективном вложении средств в рамках конкретного территориального природно-технического комплекса. Определены критерии распределения нагрузки между водопользователями, к которым относятся применение наилучших доступных технологий, социальная значимость объекта, экологическое состояние водных объектов в заданных створах территориального природно-технического комплекса. Представленные результаты раскрывают новые подходы, методы и методики перераспределения техногенной нагрузки на основе технических и геоинформационных программных средств нового поколения. **Практическая значимость:** алгоритм и методика построения проекта геоинформационной системы экологического управления территориальными природно-техническими комплексами позволяют вести оперативный анализ характеристик по результатам контроля, распределять квоты нагрузки с учетом уровня экологичности производств по предложенным критериям в соответствии с разработанной методикой повышения эффективности управления предприятием.

Ключевые слова — геоинформационная моделирующая система, экологическое управление территориальным природно-техническим комплексом, алгоритмическое обеспечение экологического и технологического нормирования, информационная база геоданных, тематические слои, нормативы допустимого сброса, нормативы допустимого воздействия, критерии квотирования, математическое моделирование, перенос загрязняющих веществ.

Введение

Представленная работа является логическим продолжением разработанной ранее авторами методики нормирования допустимых сбросов для группы водопользователей с применением геоинформационных технологий [1–4]. Предложен алгоритм и критерии квотирования антропогенной нагрузки между водопользователями в рамках установленных бассейновых нормативов допустимых воздействий (НДВ) согласно действующим рекомендациям [5].

В настоящей работе авторы в соответствии с действующим законодательством поставили следующие задачи:

1) определить лимитирующие факторы при бассейновом межотраслевом подходе к управлению и на их основе разработать критерии квотирования антропогенной нагрузки на водные объекты;

2) обосновать типовые математические модели и программы расчета переноса загрязняющих веществ для бассейнового природно-технического комплекса;

3) на основе предлагаемого алгоритма и критериев квотирования перераспределить и оптимизировать нагрузку между водопользователями территориального природно-технического комплекса (ТПТК) в рамках водного бассейна.

Для объектов 1-й категории согласно классификации [2] допустимый сброс должен быть определен на основе наилучших доступных технологий (НДТ), для 3-й категории расчеты нормативов допустимого сброса (НДС) должны быть выполнены только по лимитирующим показателям, для 2-й категории сохраняется существующая система экологического нормирования, а для 4-й категории расчет НДС вообще не предусмотрен.

Реализация вышеизложенных требований предопределяет необходимость использования системного анализа на основе бассейновых эколого-технологических принципов и соответствующих алгоритмов, реализуемых с использованием геоинформационных технологий.

Новизна изложенного подхода заключается в разработке и реализации алгоритма обоснования индивидуальных для каждого водопользователя НДС на основе перераспределения бассейновых НДС. В качестве определяющих используются критерии технологического и экологического нормирования, опирающегося на современные средства геоинформационного математического моделирования и управления бассейновым ТПТК [6].

Геоинформационная моделирующая система ТПТК

Современные системы управления качеством водных объектов природно-технических комплексов (ПТК) опираются на результаты экологического мониторинга, производственного экологического и технического контроля. Наиболее эффективно создание и ведение геоинформационных систем (ГИС) на основе базы данных в режиме онлайн. Данная система позволяет оценить степень влияния различных водопользователей на качество воды водных объектов на базе программных продуктов ArcGis, проанализировать данные через картографические сервисы и по этим результатам квотировать нагрузку для каждого субъекта.

Вся вносимая в ГИС информация экологического нормирования и управления водными ресурсами реализуется в рамках схемы комплексного использования и охраны водных объектов и проектов норм допустимых воздействий на цифровой картографической основе и разделяется по отдельным группам.

1. База геоданных, экологических и технологических норм ПТК в соответствии с нормативно-правовыми документами охватывает реки; озера; предприятия; водовыпуски; водохозяйственные створы; водохозяйственные участки; границы районирования; расчетные водохозяйственные участки; балансы загрязняющих веществ; лимиты и квоты; пункты контроля качества воды; объекты привязки к местности (железные и автомобильные дороги, населенные пункты и т. д.).

2. Информация по нормированию допустимых воздействий включает НДС по привносу химических веществ; НДС по изъятию водных ресурсов; НДС по привносу радиоактивных веществ; НДС по привносу микроорганизмов; НДС по привносу тепла; НДС по сбросу воды.

3. При разработке схемы комплексного использования и охраны водных объектов должны быть рассмотрены следующие разделы: «Лимиты водо-

потребления/водоотведения»; «Квоты забора воды и сброса сточных вод»; «Баланс загрязняющих веществ на расчетный период»; «Баланс загрязняющих веществ на перспективу»; «Водоохранное мероприятия», «Сведения Государственного водного реестра и Государственного мониторинга водных объектов».

Разработанный геоинформационный моделирующий комплекс представляет собой геоинформационную онлайн-систему ТПТК с реализованными моделями переноса загрязняющих веществ для разных типов водных объектов (рис. 1).

Геоинформационная моделирующая система (ГИМС) включает в себя:

1) блок моделирования переноса загрязняющих веществ и формирования качества воды при неограниченном количестве и типе водопользователей ПТК;

2) пространственную топооснову (набор структурированных в виде отдельных слоев данных об объекте) в пределах ТПТК;

3) базу данных для расчета НДС;

4) модель водного объекта на базе программных продуктов ArcGis;

5) базу геоданных моделирования процессов конвективно-диффузионного переноса и превращения загрязняющих веществ (КДП и ПВ) [2–4];

6) представление данных в ГИС (отображение результатов имитационного моделирования на карте в ГИС) при разных сценариях распределения нагрузки и прогнозирование развития экологической ситуации.

Блок моделирования дает возможность создания модулей расширения сторонними разработчиками без привлечения исполнителя основного приложения. Модуль расширения осуществляет самостоятельный прямой доступ к базе данных для работы с данными.

База данных содержит следующие основные сведения о рассматриваемом ТПТК:

— данные Государственной гидрометеорологической службы и Роспотребнадзора;

— данные регионального (бассейнового) ТПТК;

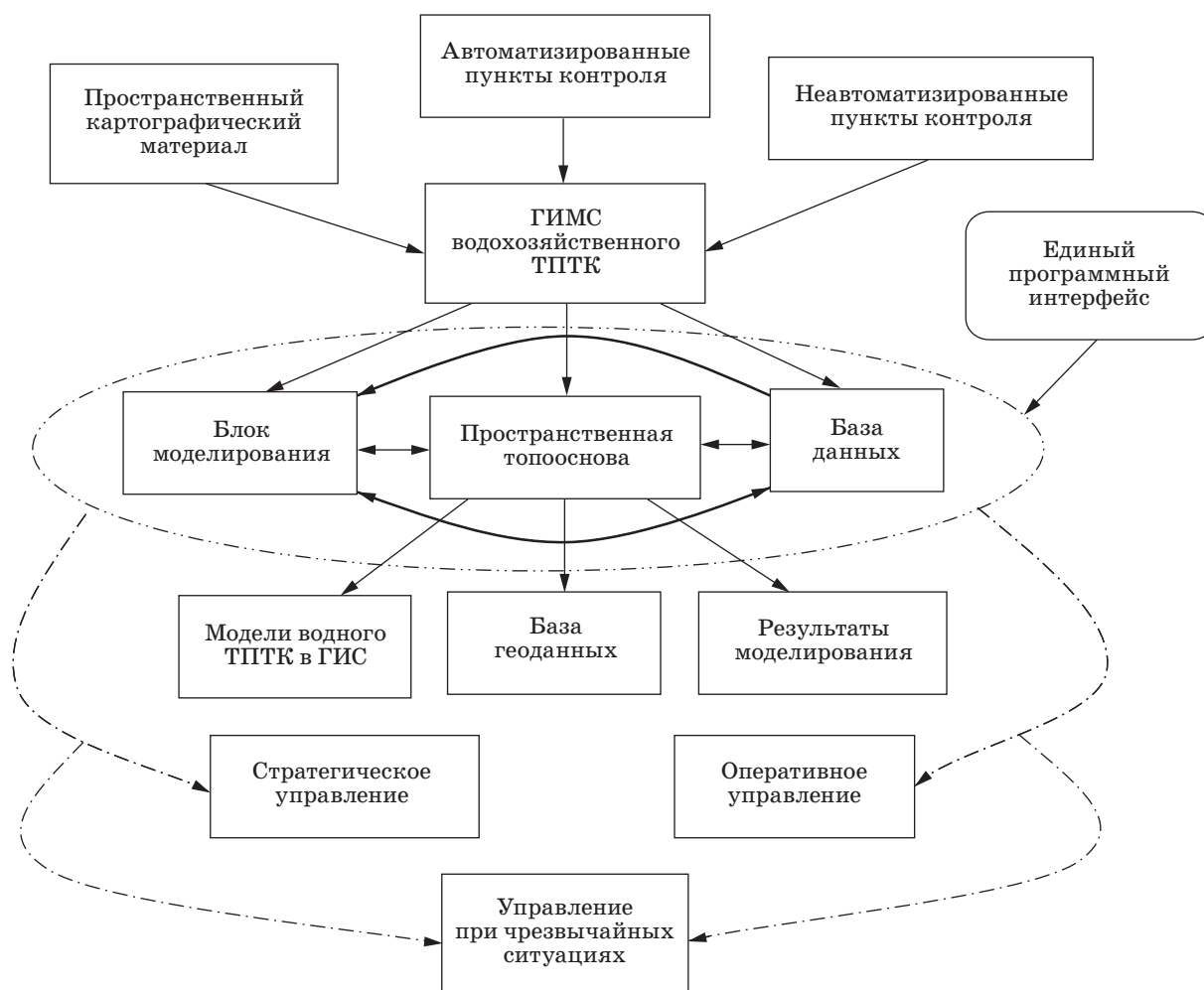
— границы бассейна и расчетных водохозяйственных участков, расположение притоков, гидрологические и морфологические параметры;

— сведения о фактическом состоянии качества воды в водных объектах: фоновые характеристики водных объектов по гидрохимическим и гидробиологическим показателям, интегральным показателям и индексам;

— сведения о предприятиях-водопользователях и водовыпусках:

- количество и характеристика водовыпусков;
- массы сброса загрязняющих веществ;
- расходы отводимых сточных вод.

Модель водного объекта в среде ГИС представлена в виде полигонов с однородными гидрологи-



■ Рис. 1. Структура ГИМС-ТПТК

ческими и морфологическими характеристиками, реализуется в соответствии с расчетной схемой водосбора и особенностями формирования качества воды. Набор программных модулей позволяет реализовать соответствующие математические модели для расчета полей концентраций при заданных краевых (граничных и начальных) условиях и экспортировать результат на топооснову [7].

Реализованные в ГИМС-ТПТК типовые модели формирования качества воды приведены в таблице, где C — концентрация вещества, мг/л; t — время, с; k_1 — коэффициент биохимического окисления, 1/сут; $C_{2пр}$ — предельная величина насыщения кислородом, мг/л; C_2 — величина растворенного в воде кислорода, мг/л; Q — расход воды, м³/с; ω — площадь поперечного сечения русла, м²; T — температура воды, °C; x — продольная координата, м; y — поперечная координата, м; z — координата по вертикали, М; v_x, v_y, v_z — средние скорости течения, м/с; D_x, D_y, D_z — коэффициенты продольной, поперечной диффу-

зии и диффузии по вертикали соответственно, м²/с; B — коэффициент; q — внешний источник, отнесенный к единице длины водотока, м²/с.

Уравнения 1–12 таблицы характеризуют перенос загрязняющих веществ в водотоках и водоемах, уравнение 13 можно использовать для моделирования ТПТК с неглубокими водными объектами при двухмерной нестационарной аппроксимации методом полных потоков.

Все приведенные дифференциальные уравнения реализуются методом конечных разностей по явной схеме с ограничением по условию устойчивости соотношения шагов по координатам и времени. При решении задачи расчета переноса загрязняющих веществ в водоеме использован алгоритм, разработанный Фельзембаумом [8].

Начальные и граничные условия для расчета поля концентраций задаются в соответствии с данными экологического мониторинга. В программном продукте расчет коэффициента поперечной диффузии (D_y) реализуется в зависимости

■ Основные типы моделей КДП и ПВ, реализованные в ГИМС-ТПТК

№	Тип уравнения
1	$\frac{\partial C}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = f(x, t, C)$
2	$\frac{dC_2}{dt} = \frac{dC_1}{dt} + k_1 \cdot (C_{2\text{пр}} - C_2)$
3	$\frac{dC_1}{dt} = -\alpha \cdot C_1 \cdot C_2$
4	$\frac{\partial C}{\partial t} + v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k_1 \cdot C$
5	$\frac{\partial}{\partial x}(\omega \cdot C) = \frac{\partial}{\partial y}(\omega \cdot D_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y}) - k_1 \cdot \omega \cdot C$
6	$\frac{\partial(\omega \cdot T)}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot T)}{\partial x} = \frac{\partial[\omega \cdot D_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x}]}{\partial x} - k_1 \cdot \omega \cdot (T - T_1)$
7	$\frac{\partial(\omega \cdot C_i)}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_i)}{\partial x} = \frac{\partial[\omega \cdot D_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x}]}{\partial x}$
8	$B \cdot \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$
9	$\frac{\partial}{\partial t}(\omega \cdot C) + \frac{\partial}{\partial x}(Q \cdot C) = \frac{\partial}{\partial x}(\omega \cdot D_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x}) - k_1 \cdot \omega \cdot C$
10	$v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - k_1 \cdot C$
11	$v \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - k_1 \cdot C$
12	$v_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = D_x \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - k_1 \cdot C$
13	$\frac{\partial C}{\partial t} + V_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right)$

от типа водного объекта и имеющихся данных измерений гидрологических характеристик.

Моделирование осуществляется с использованием программы «ГИМС-ТПТК», в основу кото-

рой положен метод конечных разностей, с предварительной аппроксимацией расчетной области, в пределах которых концентрации загрязняющих веществ являются постоянными. В результате работы программного модуля формируется шейп-файл, состоящий из множества полигонов, каждому из которых ставится в соответствие номер *mx* и *ny*, записанный в таблице атрибутов. Шейп-файл необходим для занесения значений поля концентраций, получаемого в результате моделирования и построения тематических карт в среде ГИС.

При оперативном перераспределении нагрузки между водопользователями для большинства ТПТК в соответствии с установленными квотами в среде ГИС предусмотрена возможность предоставления информации удаленному пользователю через Интернет. При этом удаленный пользователь, используя обычный интернет-браузер, может не только просматривать статические картинки, но и в интерактивном режиме осуществлять навигацию, приближаясь к интересующим объектам, анализировать тематические слои, надписывать объекты и т. д. Особо следует подчеркнуть возможность просматривать и оценивать картографические сервисы с представлением в виде web-ресурса в сети Интернет.

Разработанная программа «ГИМС-ТПТК» позволяет:

1) на основании квот перераспределять нагрузку между индивидуальными водопользователями (НДС) в рамках бассейновых НДВ по управляемому или потенциально управляемому привносу загрязняющих веществ;

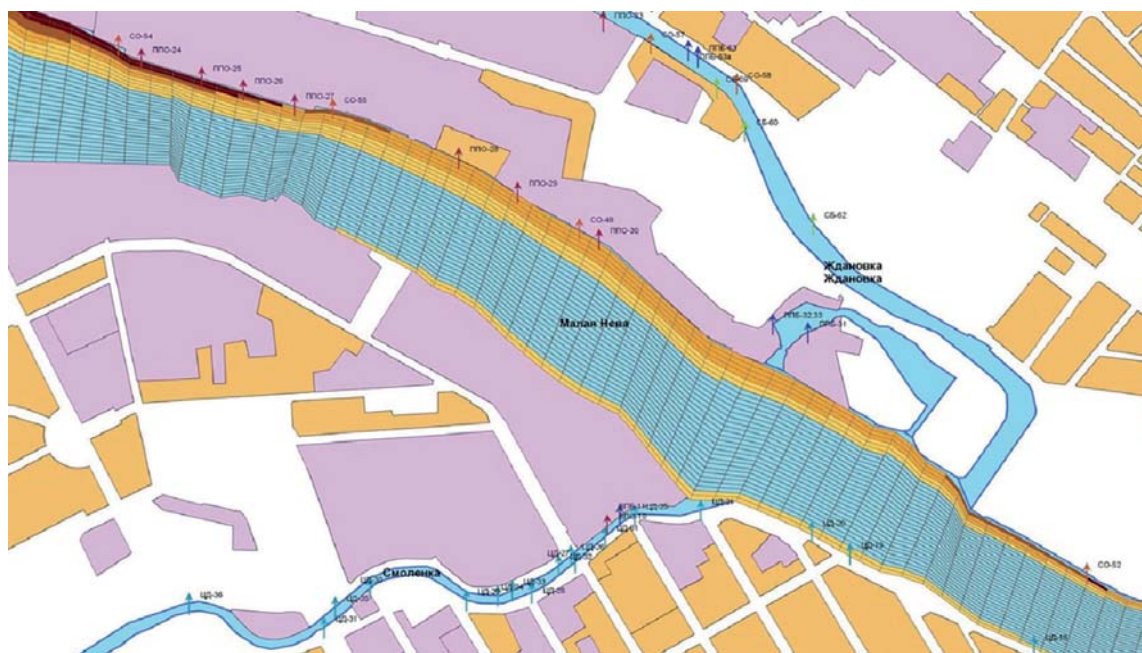
2) обосновывать возможность строительства новых предприятий и реконструкции действующих с неоднородными характеристиками в пределах ТПТК;

3) моделировать процессы переноса загрязняющих веществ при фактических, чрезвычайных и плановых параметрах водного объекта и состава сброса, а также с учетом естественных природных изменений (смены гидрологической фазы, наводнения и т. д.). При каждом расчетном варианте определяются зоны влияния и зоны, подверженные максимальному загрязнению;

4) оптимизировать нагрузку от ряда водопользователей в целях минимизации негативного воздействия на водные ресурсы бассейна при минимуме суммарных приведенных затрат на достижение НДС всеми водопользователями водохозяйственного участка или всего ТПТК.

Разработанный алгоритм, методика и программные средства апробированы на примере ГИМС-ТПТК «Нева», используемого в целях управления хозяйственно-бытовым водоснабжением и водоотведением (рис. 2).

Это позволило обосновать перераспределение нагрузки на исследуемый участок в виде бассей-



■ Рис. 2. ГИМС-ТПТК для моделирования распределения поля концентраций в р. Малая Нева

новых НДВ по целевым показателям с дифференциацией НДС для каждого водопользователя и обеспечением заданных экологических стандартов.

Критерии перераспределения техногенной нагрузки для ТПТК и имитационное моделирование

Ключевой проблемой расчета НДС для каждого из группы водопользователей на базе НДВ всего бассейна ТПТК является обоснование критериев распределения нагрузки между водопользователями. Авторами был предложен критерий распределения нагрузки $K_{\text{тех}}$ [2, 9], учитывающий фактическую массу и режим сброса сточных вод, степень соответствия основной технологии производств и систем очистки требованиям НДТ, социальную значимость каждого субъекта в рамках рассматриваемого ТПТК.

Целевой функцией алгоритма оптимизации распределения нагрузки в ТПТК является соблюдение интересов каждого водопользователя с необходимостью обеспечить определенную квоту по уровню сброса загрязняющих веществ и достижение заданного экологического состояния водного бассейна при минимизации общих затрат.

Задача оптимизации сводится к виду

$$\sum_{i=1}^n S_{\text{оч } i}(P_i) \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^n C_{\text{оч } i}(P_i) \rightarrow C_{\text{к.с}}, P_{i, \min} \leq P_i \leq P_{i, \max}, \quad (2)$$

где $S_{\text{оч } i}$ — приведенные затраты на очистку в i -м пункте; $C_{\text{к.с}}$ — снижение концентрации примесей в водном объекте в соответствии с НДС, отнесенных к контрольному створу; $C_{\text{оч } i}$ — снижение концентрации примесей в контрольном створе в результате очистки i -м водопользователем; $P_{i, \min}$ и $P_{i, \max}$ — соответственно минимально допустимые и максимально возможные степени очистки сточных вод.

Для нахождения оптимальных параметров введем следующие ограничения.

1. Обеспечение в контрольных створах низких уровней загрязненности воды:

$$C_{\text{max}} \leq 2C_{\text{н}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{н}}$ — норматив качества воды. В сточных водах концентрация загрязняющих веществ не должна превышать верхний предел среднего уровня загрязненности.

2. Суммарная масса сброса загрязняющих веществ от всех предприятий бассейна не должна превышать установленный НДВ за вычетом диффузной нагрузки:

$$\sum_{i=1}^n \text{НДС}_i \leq 0,8\text{НДВ} - M_{\text{диф } i}, \quad (4)$$

где $\sum \text{НДС}_i$ — суммарный допустимый сброс загрязняющих веществ от всех приоритетных во-

допользователей водохозяйственного участка по i -му загрязняющему веществу; $НДВ_i$ — норматив допустимого воздействия по i -му загрязняющему веществу; $M_{диф i}$ — диффузный сток от неуправляемых и условно управляемых источников загрязнения по i -му загрязняющему веществу; $0,8$ — коэффициент, показывающий, что для целей перспективного развития региона на настоящий момент времени может быть использовано не более 80% от допустимой нагрузки.

3. Установленный НДС не может превышать фактического сброса предприятия:

$$НДС_i \leq M_{факт i} \quad (5)$$

4. Для предприятий 1-й категории воздействия на водные объекты установленный норматив на сброс загрязняющих веществ не может быть меньше показателя, достигаемого при использовании НДТ:

$$НДС_i \leq \Pi_i \cdot q_{ni} \quad (6)$$

где Π_i — объем выпускаемой продукции, т; q_{ni} — удельный норматив образования i -го загрязняющего вещества на тонну выпускаемой продукции при соблюдении НДТ, г/т.

Алгоритм расчета распределения нагрузки для предприятий

Алгоритм распределения квот нагрузки между водопользователями приведен на рис. 3.

1. Расчет суммарной допустимой нагрузки от всех предприятий в рамках расчетного водохозяйственного подучастка.

Суммарная масса сброса загрязняющих веществ от всех предприятий определяется по формуле (4).

Если фактический диффузный сток превышает установленную квоту для данного водохозяйственного участка, то предприятия не могут дополнительно загрязнять водный объект, что возможно, если концентрация загрязняющего вещества в сточных водах не превысит норматива качества воды.

В случаях отрицательного значения $\sum НДС_i$ расчет НДС $_i$ может быть произведен по формуле

$$НДС_i = C_{ни} \cdot q_{ст i} \quad (7)$$

где $q_{ст}$ — расход сточных вод от предприятия, м³/с.

2. Расчет индивидуального НДС для предприятия.

Расчет индивидуальных норм сброса для сосредоточенных источников загрязнения для каж-

дого расчетного участка предлагается осуществлять по формуле

$$НДС_i = \sum_{i=1}^n НДС_i \frac{M_i / M_{общ i} + K_{эф j}}{2 \frac{\sum_{i=1}^n K_{эф j}}{i=1}}, \quad (8)$$

где M_i — фактическая масса сброса от j -го предприятия; $M_{общ i}$ — общая фактическая масса сброса от всех предприятий бассейна; $K_{эф j}$ — коэффициент эффективности управления j -м предприятием.

3. Этап проверки граничных условий.

На данном этапе проводится сравнение допустимой и фактической масс сброса загрязняющих веществ от сосредоточенных источников загрязнения. Если фактическая антропогенная нагрузка на водохозяйственный участок меньше квоты, выделяемой для предприятий-водопользователей ($M_{факт i} < \sum НДС_i$), то для всех предприятий в качестве НДС принимаются фактические массы сброса загрязняющих веществ:

$$\begin{aligned} &\text{если } НДС_{ij} > M_{факт i}, \\ &\text{то } НДС_{ij} \text{ приравнивается к } M_{факт i}. \end{aligned} \quad (9)$$

Если отношение фактической концентрации загрязняющего вещества в сточной воде к установленному нормативу качества воды превышает средний уровень загрязненности (N), то проводится пересчет допустимой концентрации и затем, соответственно, НДС:

$$\text{если } \frac{C_{ст i}}{C_{ни}} > N, \text{ то } НДС_i = C_{ни} \cdot N \cdot q_{ст i}, \quad (10)$$

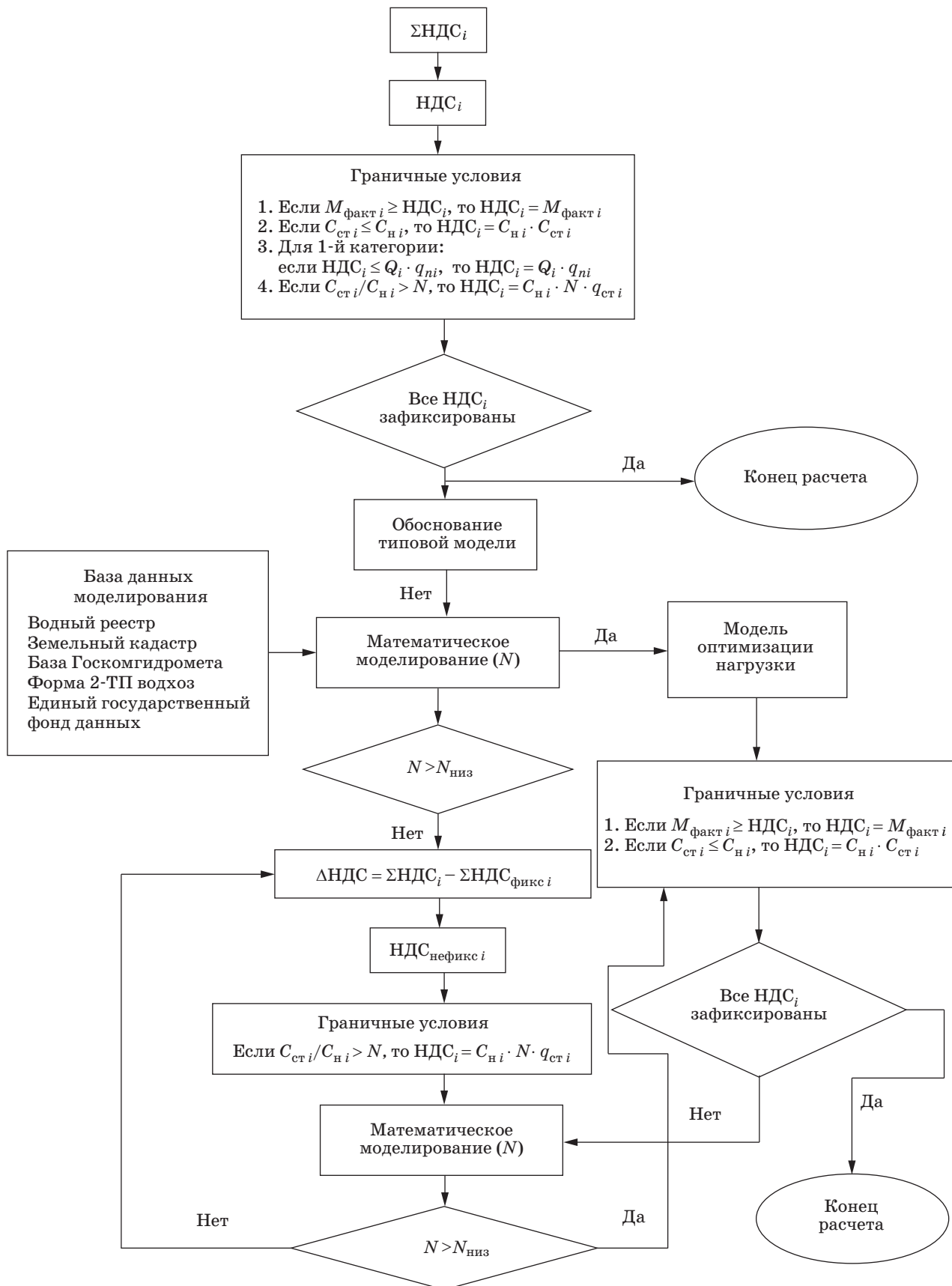
где $C_{ст i}$ — концентрация загрязняющего вещества в сточных водах, мг/л.

Для предприятий 1-й группы воздействия на водную среду НДС $_i$ должен быть не меньше технологического норматива, отвечающего внедрению НДТ:

$$\text{если } НДС_i \leq Q_i \cdot q_{ni}, \text{ то } НДС_i = Q_i \cdot q_{ni}. \quad (11)$$

4. Моделирование переноса загрязняющих веществ.

На первом этапе происходит обоснование выбора типовой математической модели, удовлетворяющей параметрам ТПТК. Моделирование переноса загрязняющих веществ осуществляется на основе информации, заложенной в базе данных ГИМС (см. рис. 1). Информация по водному объекту включает комплекс гидрологических, гидрохимических, гидробиологических показателей и индексов.



■ Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета распределения нагрузки для предприятий

Сведения по предприятиям включают данные по форме 2-ТП водхоз о типе и конструкции водо-выпуска.

На основе полученных НДС для предприятий рассчитывается значение концентрации загрязняющего вещества в сточных водах

$$C_{ст} = \frac{НДС_i}{q_{ст}}. \quad (12)$$

Далее на основе имитационного математического моделирования процессов формирования качества воды в рамках ТПТК определяется степень воздействия всех источников загрязнения в контрольных створах для различных вариантов исходных данных и производится сравнение полученного значения с показателем низкого уровня загрязненности. Если этот показатель не превышен, то переход к этапу 5, в противном случае к этапу 6.

5. Перераспределение нагрузки.

Определяется запас массы сброса загрязняющих веществ:

$$\Delta НДС_i = \sum_{i=1}^n НДС_i - \sum_{i=1}^j НДС_{i \text{ фикс}}, \quad (13)$$

где j — количество зафиксированных НДС; $НДС_{\text{фикс } i}$ — величина зафиксированного НДС для i -го предприятия.

Устанавливаются НДС для предприятий, которые соблюдали граничные условия. Далее возвращение к этапу 2 алгоритма и выполнение расчета для оставшихся предприятий:

$$НДС_i = \sum_{i=1}^n НДС_i \frac{M_i / M_{\text{общ } i} + K_{\text{эф } j}}{2 \sum_{i=1}^n K_{\text{эф } j}}. \quad (14)$$

Предприятия, у которых НДС зафиксированы, в дальнейшем перераспределении НДС не участвуют.

6. Сокращение нагрузки в соответствии с предлагаемым алгоритмом.

Если при фактических параметрах сброса в контрольном створе превышен параметр низкого уровня загрязнения, то проводится сокращение нагрузки от всех незафиксированных предприятий. Проверяются граничные условия и фиксируются предприятия аналогично этапу 3 алгоритма. Далее аналогично этапу 4 осуществляется имитационное математическое моделирование до определения НДС всех водопользователей.

После того как все НДС будут зафиксированы, расчет прекращается.

Заключение

Разработаны структура и алгоритм нормирования техногенной нагрузки для ТПТК на основе геоинформационных технологий.

Для реализации разработанного алгоритма создана геоинформационная моделирующая система «ГИМС-ТПТК» для управления распределением квот нагрузки между водопользователями по эколого-технологическим критериям.

Предложена и реализована на основе программных средств нового поколения методика расчета комплексного показателя эффективности управления предприятием в рамках ТПТК при условии обеспечения заданного уровня экологичности.

Определены критерии распределения нагрузки между водопользователями, к которым относятся: применение НДТ, социальная значимость объекта, экологическое состояние водных объектов в заданных створах ТПТК.

Предложенные в статье подходы основаны на развитии разработанных авторами ранее методов и программных средств, которые широко апробированы в инженерной практике и могут быть рекомендованы к использованию Агентством водных ресурсов Российской Федерации при решении широкого круга задач, а также для экспертных оценок крупных проектов в Государственной экологической экспертизе Минприроды.

Литература

1. Епифанов А. В., Шишкин А. И., Антонов И. В. Геоинформационная моделирующая система нормирования допустимых сбросов для целлюлозно-бумажных комплексов // Водное хозяйство России. 2011. № 1. С. 66–80.
2. Епифанов А. В., Шишкин А. И., Антонов И. В. Нормирование сброса сточных вод при производстве целлюлозы и продуктов ее переработки с применением ГИС технологий // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2012. № 1. С. 66–73.
3. Shishkin I., Antonov I., Epifanov A. Geoinformation Modeling Complex for Rationing of Technogenic Loading// Environmental Protection of Urban and Suburban Settlements: Proc. of XVII Intern. Eco-conference, Novosad, Serbia, 2013. P. 299–306.
4. Жильникова Н. А. Методика эколого-технологического нормирования нагрузки в рамках территориального природно-технического комплекса // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Экономика и экологический менеджмент. 2015. № 1. С. 61–67.
5. Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты (утв.

Приказом МПР РФ от 12 декабря 2007 № 328). <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2063965/> (дата обращения: 11.01.2017).

6. Жильникова Н. А., Алексеев В. В., Шишкин И. А. Информационно-измерительная система мониторинга защиты территории топливно-энергетического комплекса от подтопления на основе геоинформационной технологии // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6. С. 93–97. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.93
7. Св-во гос. рег. прогн. для ЭВМ 2009615259, Российская Федерация. REG_SOST/ Шишкин А. И., Епифанов А. В., Антонов И. В., Алексеев В. В., Кураки-

на Н. И., Желтов Е. В.; правообладатель Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т. — № 2009615259; дата поступл. 07.08.2009; дата регистр. 23.09.2009.

8. Фельзенбаум А. И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 128 с.
9. Жильникова Н. А., Антонов И. В., Шишкин И. А. Управление промышленно-территориальным комплексом радиоэлектронной промышленности по эколого-технологическим показателям // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. 2016. Вып. 5. № 6. С. 47–51.

UDC 504.064.3, 504.064.4

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.93

Algorithm of Control over Technogenic Impact Distribution for Territorial Natural-Technical Complex Based on Geoinformation Systems

Zhilnikova N. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, nataliazhilnikova@gmail.com

Shishkin A. I.^b, PhD, Tech., Professor, aishishkin@yandex.ru

Epifanov A. B.^b, PhD, Tech., Associate Professor, epifandr@yandex.ru

Epifanova M. A.^b, Post-Graduate Student, epif.marina@gmail.com

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

^bSaint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint-Petersburg State Technological University of Plant Polymers, 4, Ivana Chernykh St., 198095, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: To create a system of environmental management of a natural-technical complex, you have to algorithmically support the choice of load quotas for every subject by means of geoinformation modeling. **Results:** A structure has been developed to represent a territorial natural-engineering complex as a group of geoinformation system objects. Such a structure allows you to analyze and process the data by geoinformation system tools, estimating the value of each parameter used in accordance with the proposed technique. In order to implement the proposed algorithm, a geoinformation modeling control system is created which distributes the load quotas among the subjects according to complex attribute and spatial requests. It can solve problems of long-term (strategic) control, short-term (current) control, and management in emergency. The target function of the algorithm optimizing the load distribution between all the water basin users is to provide the predefined quality of water with the most efficient financial investment within a specific territorial natural-engineering complex. The criteria have been determined for the load distribution between the water users. These criteria are the usage of the best available technologies, the social significance of the object, the ecological status of the water bodies in the given water points of the complex. The presented results open up new approaches, methods and techniques for man-induced load redistribution based on technical and geoinformation software of the new generation. **Practical relevance:** The algorithm and technique of developing a geoinformation system of environmental management of a territorial natural-engineering complex allow you to analyze the characteristics of the monitoring results in real time, and to distribute the load quotas taking into account the ecological levels of companies by the proposed criteria in accordance with the developed methodology of increasing the company management efficiency.

Keywords — Geoinformation Modeling System, Environmental Management of a Territorial Natural-Technical Complex, Algorithmic Support of Environmental and Technological Standards, Geoinformation Database, Thematic Layers, Norms of Permissible Discharge, Permitted Impact Limits, Quota Criteria, Mathematical Modeling, Transport of Pollutants.

References

1. Epifanov A. V., Shishkin A. I., Antonov I. V. Geoinformation Simulation System of Permissible Discharge Standardization for Pulp and Paper Complexes. *Vodnoe khoziaistvo Rossii*, 2011, no. 1, pp. 66–80 (In Russian).
2. Epifanov A. V., Shishkin A. I., Antonov I. V. Standartization of Wastewater Discharge on Manufacture of Pulp and Pulp Derivatives with GIS Technologies. *Tseliuloza. Bumaga. Karton*, 2012, no. 1, pp. 66–73 (In Russian).
3. Shishkin I., Antonov I., Epifanov A. Geoinformation Modeling Complex for Rationing of Technogenic Loading. *Proc. of XVII Intern. Eco-conference "Environmental Protection of Urban and Suburban Settlements"*, Novosad, Serbia, 2013, pp. 299–306.
4. Zhil'nikova N. A. Methodology of Ecological and Technological Norm Setting of Load to Environment within Territorial Natural Technical Complex. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Ser. Ekonomika i ekologicheskii menedzhment*, 2015, no. 1, pp. 61–67 (In Russian).
5. *Metodicheskie ukazaniya po razrabotke normativov dopustimogo vozdeystviya na vodnye ob'ekty* [Methodological Guidelines on Development of Allowable Impact Standards for Wa-

ter Bodies]. *Prikaz MPR RF*, 12 December 2007, no. 328. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2063965/> (accessed 11 January 2017).

6. Zhil'nikova N. A., Alekseev V. V., Shishkin I. A. Data Measuring Monitoring System of Territory Protection for Fuel-Power Complex from Flooding Using Geoinformation System. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 6, pp. 93–97 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.93
7. Shishkin A. I., et al. *O gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM "GIMS-reka"* [On State Registration of Computer Program Geoinformation Modelling System — River]. Certificate of state registration no. 2009615259, 2009.
8. Fel'zenbaum A. I. *Teoreticheskie osnovy i metody rascheta ustanovivshikhsia morskikh techenii* [Theoretical Foundations and Methods Steady Streams]. Moscow, AN SSSR Publ., 1960. 128 p. (In Russian).
9. Zhil'nikova N. A., Antonov I. V., Shishkin I. A. Radioelectronic Industrial Territorial Complex Control According to Eco-Technological Criteria. *Voprosy radioelektroniki. Ser. OT*, 2016, iss. 5, no. 6, pp. 47–51 (In Russian).

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ И ПРОСЛЕЖИВАНИЯ СОСУДОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ГЛАЗНОГО ДНА

Р. Г. Хафизов^а, доктор техн. наук, профессор

Д. Г. Хафизов^а, канд. техн. наук, доцент

Е. Г. Танаева^{а, б}, аспирант, врач-офтальмолог

^аПоволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, РФ

^бРеспубликанская офтальмологическая больница им. Г. И. Григорьева, Йошкар-Ола, РФ

Введение: описание состояния сосудов сетчатки по изображениям глазного дна является повседневной процедурой в офтальмологической практике. Как объект для диагностической интерпретации цифровые фотографии глазного дна представляют собой классический пример медицинских изображений, характеризующийся особой сложностью. Для автоматизации диагностического описания состояния сосудов сетчатки необходимо выделить основных диагностических признаков, таких как толщина и направление сосудов. **Цель исследования:** разработка алгоритма оценивания толщины и направления сосудов глазного дна, позволяющего автоматизировать процедуру визуализации сосудов сетчатки и упростить задачу мониторинга. **Результаты:** предложена методика оценивания толщины и направления сосудов сетчатки, основанная на исследовании статистических характеристик изображений глазного дна. В качестве наблюдаемой статистики использована нормированная разность оценок генеральных средних. Получена зависимость оценки толщины сосуда от степени зашумленности тестового изображения. Разработан алгоритм прослеживания сосудов на изображении глазного дна. **Практическая значимость:** предложенный алгоритм может быть использован для создания медицинских экспертных систем, позволяющих автоматизировать процесс оценивания состояния сосудов сетчатки, мониторинга состояния сосудов и частично решить задачу диагностики.

Ключевые слова — изображения глазного дна, сосуды сетчатки, статистический анализ изображений, прослеживание сосудов.

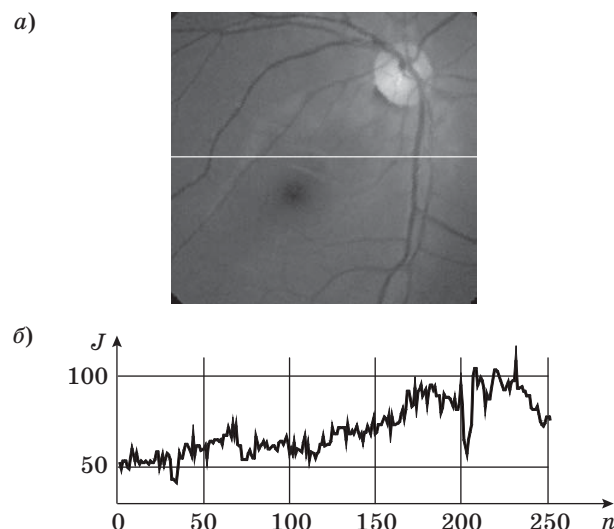
Введение

Прозрачность оптических сред глаза позволяет наблюдать сосудистую систему сетчатки и другие структуры глазного дна прямым и неинвазивным способом. Анализ изменений кровеносных сосудов глазного дна дает интегральную характеристику состояния сосудов организма в целом и состояния зрительной системы в частности. Изменение соотношения диаметра артерий и вен, локальные изменения диаметра сосудов, повышенная извилистость сосудов и другие изменения являются ранними признаками поражения сосудов сетчатки при таких заболеваниях, как артериальная гипертензия, системный атеросклероз, вегетососудистая дистония, ретинопатия недоношенных и т. д. [1].

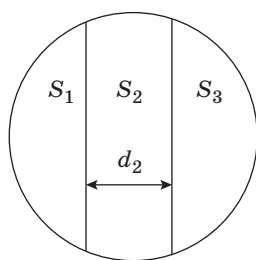
В качестве основных диагностических параметров, на основе которых производится формирование диагностических признаков сосудов, выделяют такие характеристики сосудов, как толщина и направление [2]. Эти параметры представляют собой локальные характеристики, рассчитываемые непосредственно в процессе прослеживания сосудов. В настоящее время существуют различные способы оценки толщины сосудов на изображении глазного дна [2–4]. Целью данной работы является разработка методики оценивания толщины и направления сосудов, основанной на исследовании статистических характеристик изображений, и алгоритма прослеживания сосудов на изображении глазного дна.

Методика оценивания толщины и направления сосудов

Существующие подходы к оцениванию толщины сосудов на изображении глазного дна используют, как правило, срез функции яркости изображения, взятый перпендикулярно направлению сосудов (рис. 1, а и б). При этом изображение глазного дна является статистически неодно-



■ Рис. 1. Участок глазного дна (а) и сечение по яркости выделенной строки (б)



■ **Рис. 2.** Вид строба для оценивания параметров и прослеживания сосудов

родным, и оценивание параметров объектов, расположенных на изображении, становится сложной задачей.

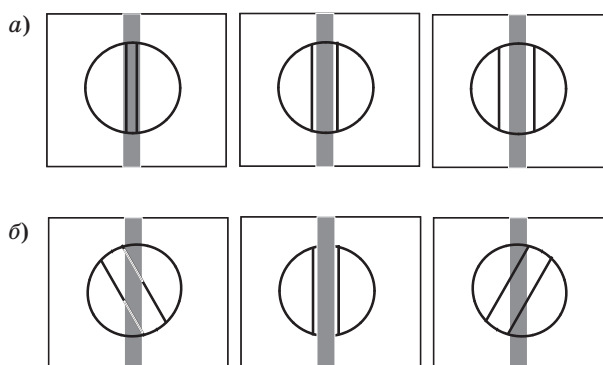
Для оценивания толщины и направления сосудов на изображении глазного дна предлагается форма строба, показанная на рис. 2 [5, 6].

Строб представляет собой три примыкающие друг к другу области S_1 , S_2 и S_3 . Необходимо на основании фрагментов случайных полей в пределах пар областей S_1 , S_2 и S_3 вынести решение в пользу гипотезы о том, что точки, образующие область S_2 , относятся к изображению сосуда, а точки, образующие области S_1 и S_3 , принадлежат фону. При этом разница между выборками, взятыми из областей S_1 и S_2 , и выборками, взятыми из областей S_2 и S_3 , носит систематический характер. Конкурирующая гипотеза соответствует утверждению о том, что области S_1 , S_2 и S_3 или одна из пар областей S_1 , S_2 и S_2 , S_3 принадлежат либо фону, либо одному и тому же изображению. Выборки, взятые из этих областей, статистически не отличаются друг от друга, и наблюдаемая между ними разница носит случайный характер.

По выборкам значений яркости из областей S_1 , S_2 и S_3 получим оценки генеральных средних $\bar{\xi}_1$, $\bar{\xi}_2$ и $\bar{\xi}_3$ соответственно. Объем выборки в пределах одного окна достаточно велик, и в связи с этим создаются предпосылки для выполнения центральной предельной теоремы теории вероятностей. Поэтому оценка $\bar{\xi}$ генеральной средней подчиняется нормальному закону распределения. Разница оценок $\bar{\xi}_1$ и $\bar{\xi}_2$, как и разница оценок $\bar{\xi}_3$ и $\bar{\xi}_2$, также будет иметь нормальное распределение вероятностей.

В качестве наблюдаемой статистики используем нормированную разность оценок генеральных средних с учетом того, что в нашем распоряжении вместо дисперсии генеральной совокупности σ^2 имеются ее оценки, полученные по выборкам ξ_1 , ξ_2 и ξ_3 :

$$t_{1,2} = \frac{\bar{\xi}_1 - \bar{\xi}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}; \quad t_{3,2} = \frac{\bar{\xi}_3 - \bar{\xi}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_3^2}{n_3} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}.$$



■ **Рис. 3.** Процесс варьирования ширины области S_2 (а) и углового положения строба (б)

Тогда при $t_{1,2} \geq t_0$ и $t_{3,2} \geq t_0$, где t_0 — пороговое значение критерия, установленное в соответствии с принятой величиной доверительной вероятности, принимается гипотеза, что точки, образующие область S_2 , относятся к изображению сосуда, а точки, образующие области S_1 и S_3 , принадлежат фону. Во всех остальных случаях принимается гипотеза о том, что области S_1 , S_2 и S_3 или одна из пар областей S_1 , S_2 и S_2 , S_3 принадлежат либо фону, либо одному и тому же изображению.

Для оценивания толщины сосудов варьируется ширина d_2 области S_2 (рис. 3, а). Считается, что состояние строба выбрано наилучшим, если в результате вариации ширины d_2 достигнуты максимальные значения $t_{1,2}$ и $t_{3,2}$.

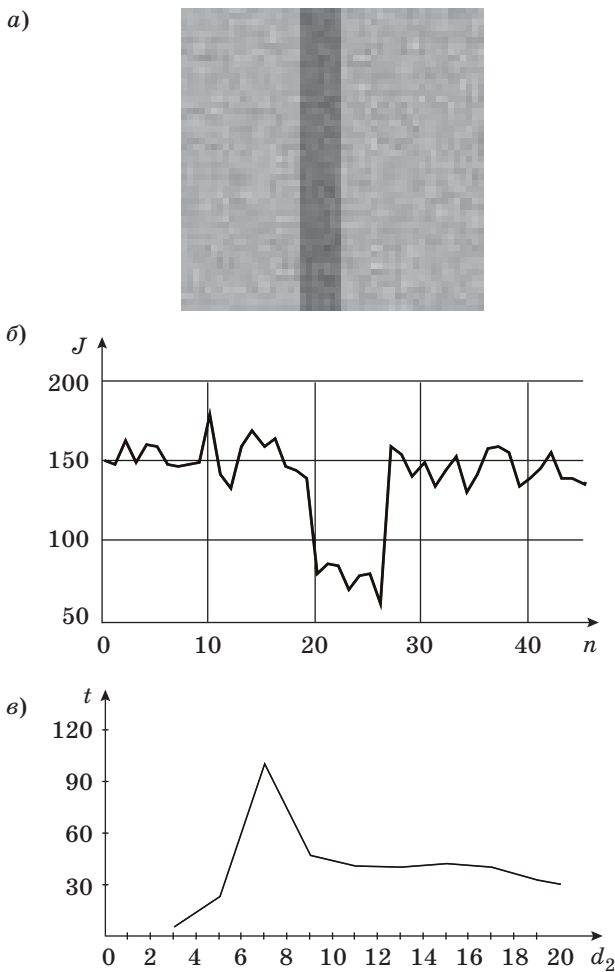
Аналогичным образом производится оценивание направления сосуда, но при этом варьируется угловое положение строба на изображении (рис. 3, б).

Алгоритм прослеживания сосудов на изображении глазного дна

Предложенная методика оценки толщины и направления сосудов была исследована с использованием тестового изображения (рис. 4, а), параметры которого были априорно известны (рис. 4, б).

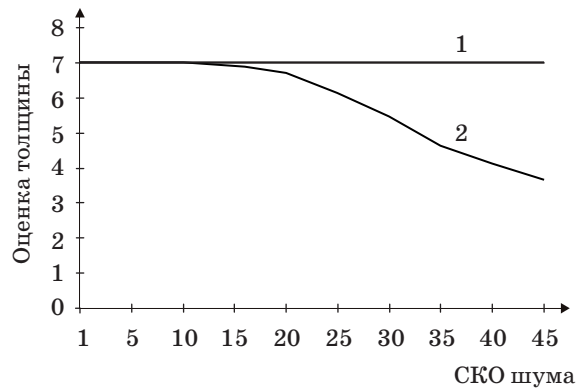
На рис. 5, в представлена зависимость величины t при варьировании ширины области S_2 для тестового изображения. Максимальное значение величины t достигается при $S_2 = 7$, что соответствует действительности. Исследована зависимость оценки толщины сосуда от степени зашумленности тестового изображения (рис. 5) при использовании предложенной методики (линия 1) и непосредственной аппроксимации по методу наименьших квадратов (линия 2).

Таким образом, предложенная методика позволяет достаточно надежно производить оценивание параметров сосудов.



■ **Рис. 4.** Тестовое изображение (а), срез по яркости по одной из строк (б) и результат вычисления величины t при варьировании ширины области S_2 (в)

Исходная точка для прослеживания определяется в результате обнаружения сосуда на изображении глазного дна. При этом может быть использована методика, предложенная в работе [5]. Вторая и последующие точки находятся следующим образом. Центр строга устанавливается на исходную точку. Затем происходит адаптация строга, т. е. определение оптимального направления перемещения и ширины d_2 центральной части строга S_2 . Считается, что состояние строга выбрано оптимально, если в результате вариации направления перемещения и ширины d_2 достигнуты максимальные значения $t_{1,2}$ и $t_{3,2}$. Если выполняются условия $t_{1,2 \max} > t_0$ и $t_{3,2 \max} > t_0$, то принимаются данное направление движения и значение ширины центральной части строга. После адаптации центр строга перемещается в выбранном направлении на один пиксель, и в массив памяти заносится единичный вектор, соединяющий предыдущую точку, в которой на-



■ **Рис. 5.** Зависимость оценки толщины сосудов от СКО шума тестового изображения



■ **Рис. 6.** Участок глазного дна и результат прослеживания сосудов

ходился центр строга, с текущей. Набор векторов перемещения строга образует траекторию. Прослеживание прекращается, если значения $t_{1,2 \max}$ и $t_{3,2 \max}$ оказываются ниже порога срыва слежения.

Пример применения алгоритма прослеживания сосудов на изображении глазного дна на основе предложенной методики оценки толщины и направления сосудов представлен на рис. 6.

В результате прослеживания сосудов на изображении глазного дна формируются траектории сосудов в виде наборов векторов перемещений строга. Кроме того, каждому вектору перемещения поставлено в соответствие значение толщины сосуда в данной точке. На основе этих данных производится формирование диагностических признаков сосудов.

Заключение

В работе предложена методика оценивания толщины и направления сосудов, основанная на исследовании статистических характеристик изображений. В качестве наблюдаемой статистики использована нормированная разность оценок

генеральных средних. Получена зависимость оценки толщины сосуда от степени зашумленности тестового изображения при использовании предложенной методики и непосредственной аппроксимации по методу наименьших квадратов. Разработан алгоритм прослеживания сосудов на изображении глазного дна.

Литература

1. Ильясова Н. Ю., Устинов А. В., Баранов В. Г. Экспертная компьютерная система диагностики глазных заболеваний по изображениям глазного дна // Компьютерная оптика. 1999. № 19. С. 202–209.
2. Куприянов А. В., Ильясова Н. Ю. Разработка информационной технологии оценивания геометрических параметров изображений глазного дна // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2008. № 2. С. 221–234.
3. Бранчевский С. Л. и др. Система цифрового анализа для диагностики сосудистой патологии глазного дна / С. Л. Бранчевский, Н. А. Гаврилова, Н. Ю. Ильясова, А. Г. Храмов // Вестник офтальмологии. 2003. № 5. С. 37–40.
4. Ильясова Н. Ю., Липка Д. Е., Куприянов А. В. Применение искусственных нейронных сетей для оценивания диагностических параметров на биомедицинских изображениях // Компьютерная оптика. 2003. № 25. С. 151–154.
5. Введение в контурный анализ и его приложение к обработке изображений и сигналов / под ред. Я. А. Фурмана. — М.: Физматлит, 2002. — 592 с.
6. Танаева Е. Г., Хафизов Р. Г. Алгоритм выделения сосудистой системы сетчатки на изображениях глазного дна на основе контурного анализа // Символ науки. 2016. № 1. С. 102–107.

UDC 621.391

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.102

Algorithm of Parameter Estimation and Vessel Tracking on Eye Fundus Images

Khafizov R. G.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, hafizovRG@volgatech.net

Khafizov D. G.^a, PhD, Tech., Assistant Professor, hafizovdg@volgatech.net

Tanaeva E. G.^{a,b}, Post-Graduate Student, Ophthalmologist, elena-309@mail.ru

^aVolga State University of Technology, 3, Lenin Sq., 424000, Yoshkar-Ola, Russian Federation

^bRepublican G. I. Grigoriev Ophthalmologic Hospital, 68a, Proletarskaya St., 424000, Yoshkar-Ola, Russian Federation

Introduction: Description of retinal blood vessel state by fundus images is a daily procedure in ophthalmological practice. As an object for diagnostic interpretation, digital fundus images are a classic example of medical images of extreme complexity. In order to automate the diagnostic description of retinal blood vessels, we have to highlight the major diagnostic features like the thickness and direction of the vessels. **Purpose:** We develop an algorithm for estimating the thickness and direction of the fundus vessels, which would allow us to automate the retinal vessel imaging procedures and simplify the monitoring. **Results:** A technique is proposed for estimating the retinal vessel thickness and direction, based on studying the statistical parameters of fundus images. A normalized difference of the estimates of the universe means was used as observed statistics. It is described how the vessel thickness estimation depends on the test image noise level. An algorithm for tracking retinal vessels is developed. **Practical relevance:** The proposed algorithm can be used for creating medical expert systems which would allow you to automate the evaluation of retinal vessel state, to monitor the vascular condition, and to assist in diagnostics.

Keywords — Fundus Images, Retinal Vessels, Statistical Image Analysis, Vessel Tracking.

References

1. Ilyasova N. Yu., Ustinov A. V., Baranov V. G. An Expert Computer System for Diagnosing Eye Diseases from Retina Images. *Komp'uternaia optika* [Computer Optics], 1999, no. 19, pp. 202–209 (In Russian).
2. Kupriyanov A. V., Ilyasova N. Yu. Development of the Information Technology for Estimation of Fundus Image Geometric Parameters. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aërokozmoshcheskogo universiteta* [Herald of the Samara State Aerospace University], 2008, no. 2, pp. 221–235 (In Russian).
3. Branchevsky S. L., Gavrilova N. A., Ilyasova N. Yu., Khramov A. G. A System of Digital Analysis for the Diagnostics of Vascular Pathologies of the Eye Fundus. *Vestnik oftal'mologii* [Herald of Ophthalmology], 2003, no. 5, pp. 37–40 (In Russian).
4. Ilyasova N. Yu., Lipka D. Ye., Kupriyanov A. V. Use of Artificial Neural Networks for Estimating Diagnostic Parameters in Biomedical Images. *Komp'uternaia optika* [Computer Optics], 2003, no. 25, pp. 151–154 (In Russian).
5. *Vvedenie v konturnyi analiz i ego prilozhenie k obrabotke izobrazhenii i signalov* [Contour Analysis Introduction and its Image and Signal Processing Application]. Ed. by Ya. A. Furman. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 592 p. (In Russian).
6. Tanaeva E. G., Khafizov R. G. Retinal Blood Vessels Selection Algorithm of the Fundus Images Based on Contour Analysis. *Simvol nauki* [Symbol of Science], 2016, no. 1, pp. 102–107 (In Russian).

УДК 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.106

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ АДАПТИВНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

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

^аСанкт-Петербургский государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, РФ

Введение: для работы предприятий в современных рыночных условиях характерно резкое повышение динамичности внешней среды, что выражается в быстром изменении спроса из-за изменения заказов, появления новых видов продукции, потребности в повышении конкурентоспособности. Изменяется, таким образом, состав вектора цели функционирования системы, что требует оперативного перехода на выпуск новой продукции. Компенсация изменения цели осуществляется путем изменения структурных связей производства, т. е. применением адаптивного режима. Одновременно применение компьютерной системы управления позволяет ввести оптимальные режимы работы, что очень важно для повышения конкурентоспособности. **Цель исследования:** выявление возможностей адаптивных автоматизированных систем управления производством для создания математической модели. **Методы:** однородный метод, базирующийся на прямой и обратной задачах оптимального статического линейного программирования. **Результаты:** построена адаптивная оптимальная трехуровневая модель, отличающаяся системным характером описания процесса планирования в автоматизированной системе управления производством. Представлены структура и технология работы модели. В системном методе описания процесса согласованы и объединены как известные, так и предложенные автором локальные методы. Среди предложенных — метод генерации данных в технологической цепочке и верхнем уровне системы, методы согласования экономических интересов структурных элементов с использованием равновесия по Нэшу и векторной оптимизации. Рассмотрена специфика моделирования для систем малой и высокой размерности. Выявлено, что малоразмерная, простая по структуре модель позволяет оперативно проверить основные теоретические положения. Высокоразмерная модель необходима для прикладного управления действующим производством. **Практическая значимость:** сформированная системная модель может быть использована как для исследования процесса планирования в системе, так и для прямого планирования в составе автоматизированной системы управления производством, работающей и в традиционном режиме, и в адаптивном режиме оперативного перехода на выпуск новой продукции с предварительным определением его целесообразности.

Ключевые слова — моделирование, системная модель, планирование, трехуровневая структура, адаптивная автоматизированная система управления производством.

Введение

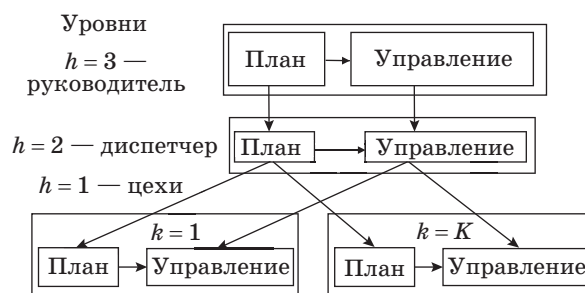
Для автоматизации управления предприятием при плановой экономике с малодинамичной внешней средой использовались традиционные системы [1]. В то же время рыночные условия работы предприятий характеризуются резким повышением динамичности внешней среды, которое выражается в динамичном изменении спроса из-за изменения заказов, появления новых видов продукции, потребности в повышении конкурентоспособности. Изменяется, таким образом, состав вектора цели функционирования системы, что требует оперативного перехода на выпуск новой продукции. Компенсация изменения цели осуществляется путем изменения структурных связей производства, которые могут осуществляться по указанию извне (интеллектуальные системы) или при выработке внутреннего решения (интеллектуальные системы).

Возникает, следовательно, необходимость исследования возможностей нового класса адаптивных автоматизированных систем управления производством (ААСУП). Изучение возможностей

подобных систем предполагает рассмотрение двух составляющих: математического описания и компьютерной реализации систем.

Математическое описание

В работе [2] показано, что такие системы, охватывающие подсистемы технико-экономического планирования и оперативного управления основным производством, характеризуются трехуровневой структурой (рис. 1).



■ **Рис. 1.** Структура трехуровневой системы

В силу специфических особенностей таких систем автором предложен и новый глобальный метод описания [3], получивший название «однородный». Он представляет собой совокупность (интеграцию) широко распространенной задачи статического линейного программирования (СЛП) и разностных уравнений. Описание уровней системы управления получило следующий вид.

Уровень управления $h = 3$.

$$\mathbf{P}(T) \geq \mathbf{R}(T), \mathbf{P}(t_i) = \mathbf{P}(t_{i-1}) + \mathbf{p}(t_i); \quad (1)$$

$$\mathbf{z}(t_i) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t_{i-1}) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t_{i-1}), \mathbf{z}(0) = \mathbf{z}_0; \quad (2)$$

$$\mathbf{p}(t_i) = \mathbf{C}\mathbf{z}(t_i); \quad (3)$$

$$\mathbf{D}\mathbf{p}_1(t_i) \leq \mathbf{b}(t_{i-1}); \quad (4)$$

$$G(\mathbf{P}) = \mathbf{F}\mathbf{P} \rightarrow \max, \quad (5)$$

где \mathbf{P}, \mathbf{p} — векторы текущего плана и плана с накоплением; \mathbf{R} — вектор спроса; \mathbf{z} — вектор незавершенного производства; $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ — матрицы соответствующих размерностей; \mathbf{D} — матрица норм расходов; \mathbf{p}_1 — вектор запуска комплекта материалов в производство; \mathbf{b} — вектор имеющегося количества ресурсов; \mathbf{F} — вектор прибыли от выпуска единицы продукции; $T, t_i = iv$ — интервалы времени; $i = 1, N; T = Nv$. Основу однородного метода составляет задача СЛП, которую назовем прямой задачей, в виде выражений (4), (5). Выражения (1)–(3) трансформируют задачу СЛП в задачу динамического линейного программирования.

Уровень управления $h = 1$.

$$\mathbf{z}_k(t_i) = \mathbf{A}_k\mathbf{z}_k(t_{i-1}) + \mathbf{B}_k\mathbf{p}_k(t_{i-1}), \mathbf{z}_k(0) = \mathbf{z}_{k0}; \quad (6)$$

$$\mathbf{p}_k(t_i) = \mathbf{C}_k\mathbf{p}_k(t_i); \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{D}_1^m \mathbf{p}_1(t_i) \leq \mathbf{b}^m(0); \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{p}_k(t_i) < \mathbf{P}(T); \quad (9)$$

$$\mathbf{D}_k^\Psi \mathbf{p}_k(t_i) \leq \mathbf{b}_k^\Psi(t_{i-1}); \quad (10)$$

$$\mathbf{D}_k^m \mathbf{p}_k(t_i) \leq \mathbf{b}_k^m(t_i); \quad (11)$$

$$\mathbf{b}_k^\Psi(t_i) = \mathbf{b}_k^\Psi(t_{i-1}) + \Delta \mathbf{b}_k^\Psi(t_{i-1}); \quad (12)$$

$$G_k = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_k(T) \rightarrow \max, \quad (13)$$

$$i = 0, N - 1, t_i = iv, t_0 = 0, T = Nv,$$

где \mathbf{z}, \mathbf{p} — вектор-столбцы (планового) незавершенного производства и ежедневного плана; $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ — матрицы, отражающие динамику процесса планирования; \mathbf{p}_1 — вектор-столбец запуска комплектов ресурсов в производство; \mathbf{D} — ма-

трица норм расходов ресурсов; \mathbf{b} — вектор-столбец наличного количества ресурсов; $\mathbf{b}^m(0)$ — вектор количества материальных ресурсов, которыми располагает уровень $h = 3$; $\Delta \mathbf{b}$ — вектор поступления ресурсов; \mathbf{F} — вектор-строка прибыли от выпуска единицы продукции; \mathbf{P} — вектор-столбец плана уровня $h = 3$; t_i, T — минимальный интервал времени и время моделирования; $m = 1, M$ — виды материальных ресурсов; $\psi = 1, \Psi$ — виды прочих ресурсов; $i = 1, N$ — моменты времени; k — номер подразделения, $k = 1$.

Уровень управления $h = 2$.

Выражения (11), (13) в описании уровня $h = 1$ заменяются соответственно на выражения

$$\mathbf{D}_k^m \mathbf{p}_{1k}(t_i) \leq \mathbf{p}_{1,k-1}^m(t_{i-1}); \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I G_k(t_i) \rightarrow \max. \quad (15)$$

Связи между уровнями $h = 2$ и $h = 3$ имеют следующий вид:

$$\mathbf{D} = \prod_{k=1}^K \mathbf{D}_k; \quad (16)$$

$$G = \sum_{k=1}^{K-1} \mathbf{F}_K \prod_{r=k-1}^K \mathbf{D}_r \mathbf{P}_K(t_i) \rightarrow \max, \quad (17)$$

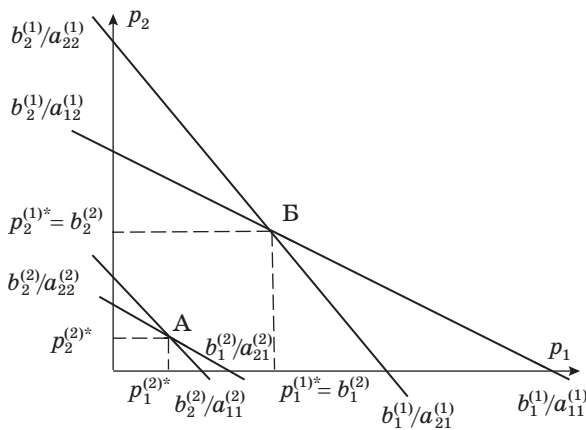
где $r = \begin{cases} k+1, k, K \\ 0, k = K \end{cases}$; $\mathbf{D}_0 = \mathbf{I}$, \mathbf{I} — единичная матрица.

Следует отметить, что однородный метод предложен автором в 90-е годы XX века [3]. В связи с этим полезно посмотреть, появились ли альтернативные методы описания. Анализ современной литературы [4–10] дает в целом отрицательный ответ. В то же время вызывает интерес работа [6], в которой для трудно формализуемых процедур предложены активные методы (механизмы), многие из которых базируются на задаче СЛП. Однако рассматриваются преимущественно автономные процедуры с двухуровневой веерной структурой, и лишь в некоторых случаях учитываются горизонтальные связи (в виде обмена информацией) между элементами нижнего уровня.

Прямую задачу (4), (5) можно представить в виде таблицы. Там же показана обратная задача, полезная при генерации данных.

■ **Виды задач СЛП**

Задача	Дано	Найти
Прямая	Векторы $\mathbf{R}, \mathbf{b}, \mathbf{F}$, матрица \mathbf{D}	Вектор \mathbf{P}
Обратная	Векторы $\mathbf{R}, \mathbf{P}, \mathbf{F}$, матрица \mathbf{D}	Вектор \mathbf{b}



■ **Рис. 2.** Соотношение областей определения в цепочке линейного программирования: все a, b, p больше единицы

Поскольку основу однородного метода составляет задача СЛП, целесообразно дополнительно исследовать ее свойства [11, 12], полезные в дальнейшем. Для отдельных элементов справедливы следующие свойства.

Свойство 1. Пусть F — вектор-строка целевой функции, d — скаляр. Если заменить вектор F на Fd при неизменных ограничениях, то значение целевой функции увеличится в d раз.

Свойство 2. Если при начальном векторе плана P вектор ограничений b заменить на bd при прежней матрице норм расходов ресурсов, то значение вектора плана станет Pd , а значение целевой функции изменится в d раз.

Свойство 3. Если матрицу ограничений A изменить на Ad при прежнем векторе b , то вектор плана получит значение P/d .

Для горизонтально связанных задач СЛП полезно следующее свойство. Пусть имеются два по-

следовательных элемента, которые в соответствии с таблицей имеют такое описание:

— первый элемент:

даны векторы R_1, b_1, F_1 , матрица D_1 ,
найти вектор P_1 ; (18)

— второй элемент:

даны векторы R_2, b_2, F_2 , матрица D_2 ,
найти вектор P_2 . (19)

Связь элементов определяется выражениями

$$P_1 = b_2. \quad (20)$$

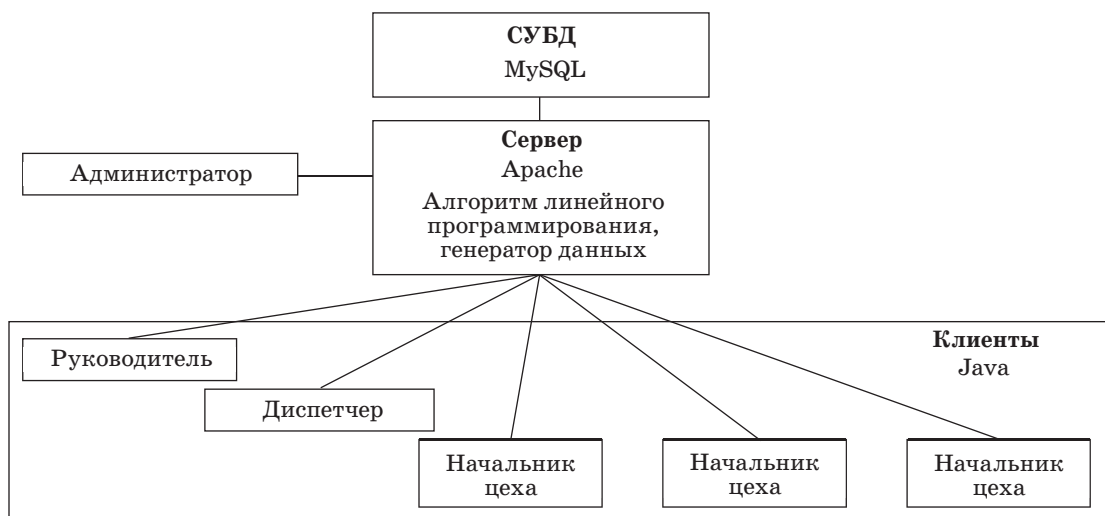
Если все значения в векторах b, F и в матрице D второго элемента больше единицы, то области определения соотносятся так, как показано на рис. 2. Если перечисленные коэффициенты менее единицы, то точки A и B меняются местами.

Компьютерная реализация

Общая схема компьютерной реализации показана на рис. 3.

В технологии работы модели (рис. 4) можно выделить два этапа: согласованный (по целевым функциям) режим (этап 1); несогласованный режим (этап 2).

Этап 1. Рассмотрим один интервал времени. Первоначально администратор генерирует на основе обратной задачи СЛП (см. таблицу) числовые данные для цепочки локальной модели диспетчера. При этом соблюдаются условия (14), обеспечивающие согласование экономических интересов структурных элементов. Полученные данные, за исключением планов P , вводятся в базу данных (БД). Затем на основе данных модели



■ **Рис. 3.** Схема компьютерной реализации

диспетчера администратором генерируются данные уровня руководителя, которые (исключая планы) вводятся в БД.

Затем по той же схеме рассчитываются и вносятся в БД планы диспетчера и начальников цехов. Работы с одним интервалом времени заканчиваются, и перечисленные процедуры повторяются для остальных интервалов времени. Создается, таким образом, модель с согласованными экономическими интересами. Этап одновременно предназначен для настройки модели.

Теперь можно перейти к этапу 2 (см. рис. 4).

Этап 2. Снова рассмотрим первоначально один интервал времени. Если критерии нестоимостные, то их следует трансформировать в стоимостные.

Администратором генерируются данные согласованного режима для уровня диспетчера, а затем — для уровня руководителя. Для уровня руководителя данные передаются в БД.

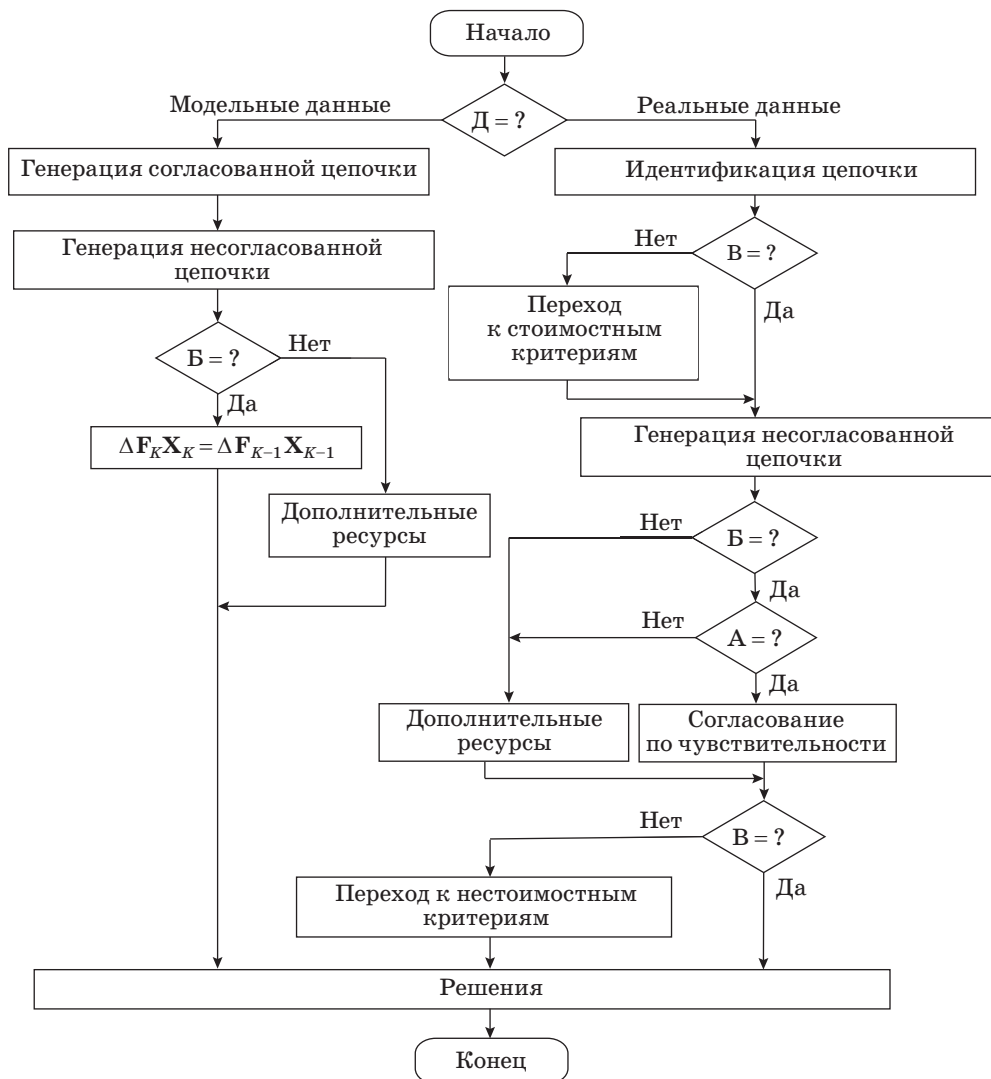
Далее для уровня диспетчера переходят к формированию несогласованного режима. Этого можно достичь одним из следующих способов.

С1. Выводятся администратором последние симплекс-таблицы решения задач СЛП диспетчерской цепочки. Выявляется параметрическая чувствительность, при этом условия (14) были нарушены за счет только одного вида продукции. Полученные данные (кроме планов) записываются в БД.

С2. План предыдущего структурного элемента изменяется произвольно, и после этого начинается новая генерация данных этого элемента.

Идея согласования экономических интересов заключается в передаче части прибыли от одних структурных элементов к другим, что стимулирует работу последних. В согласовании возможно выделить несколько вариантов.

В1.1. Если целевые функции в способе С1 имеют значения одного порядка, то в последующем



■ **Рис. 4.** Идентификация (реальные данные) и генерация (модельные данные): *A* — согласование возможно; *B* — масштабы критериев соизмеримы; *B* — все критерии стоимостные

элементе выбирают вид продукции такой, что выпуск не меняется, при этом значение целевой функции снижается. «Потеря» целевой функции передается предыдущему элементу для стимулирования.

В1.2. Если масштабы целевых функций разные, то используется тот же алгоритм, но задача упрощается за счет расширенных возможностей структурных элементов с более высокими масштабами целевых функций.

В2. Если используется способ С2, то для согласования можно применить равновесие по Нэшу или векторную оптимизацию. Разные масштабы целевых функций можно свести к одинаковому, используя свойство 1 задачи СЛП.

Далее по прежней схеме рассматривается необходимое количество интервалов времени.

В некоторый момент времени администратор может изменить состав вектора спроса. Тогда рассчитываются новые планы и принимаются в случае, если они выгоднее прежних, а далее прово-

дятся расчеты по описанной ранее последовательности. При необходимости производится переход от стоимостных критериев к начальным нестоимостным.

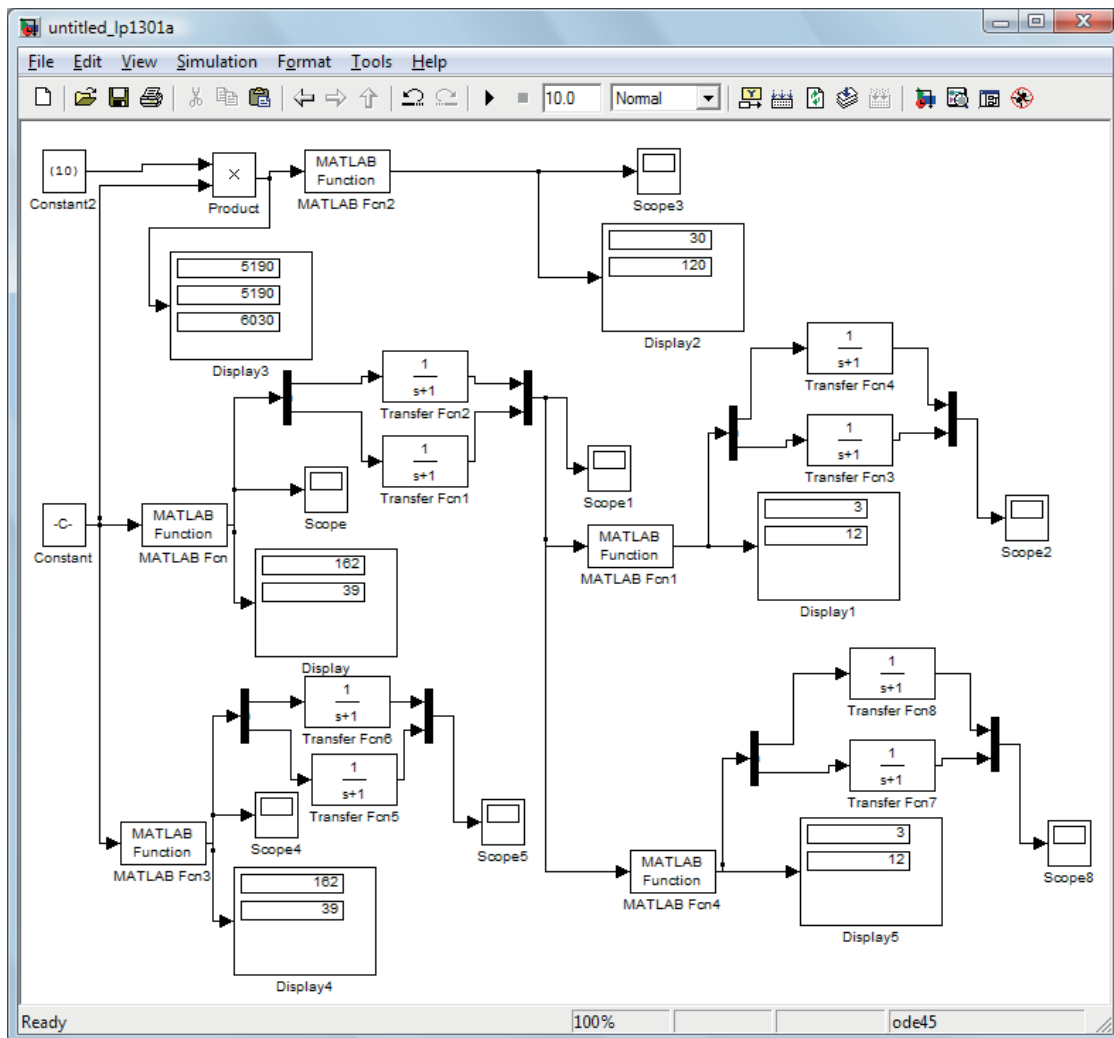
Рассмотренную системную технологию легко проверить на малой размерности. Для нее не нужны БД, а пользователи компьютера последовательно выполняют роли администратора и клиентов. Схема такой модели приведена на рис. 5.

При реальной размерности схема рис. 3 используется в явном виде.

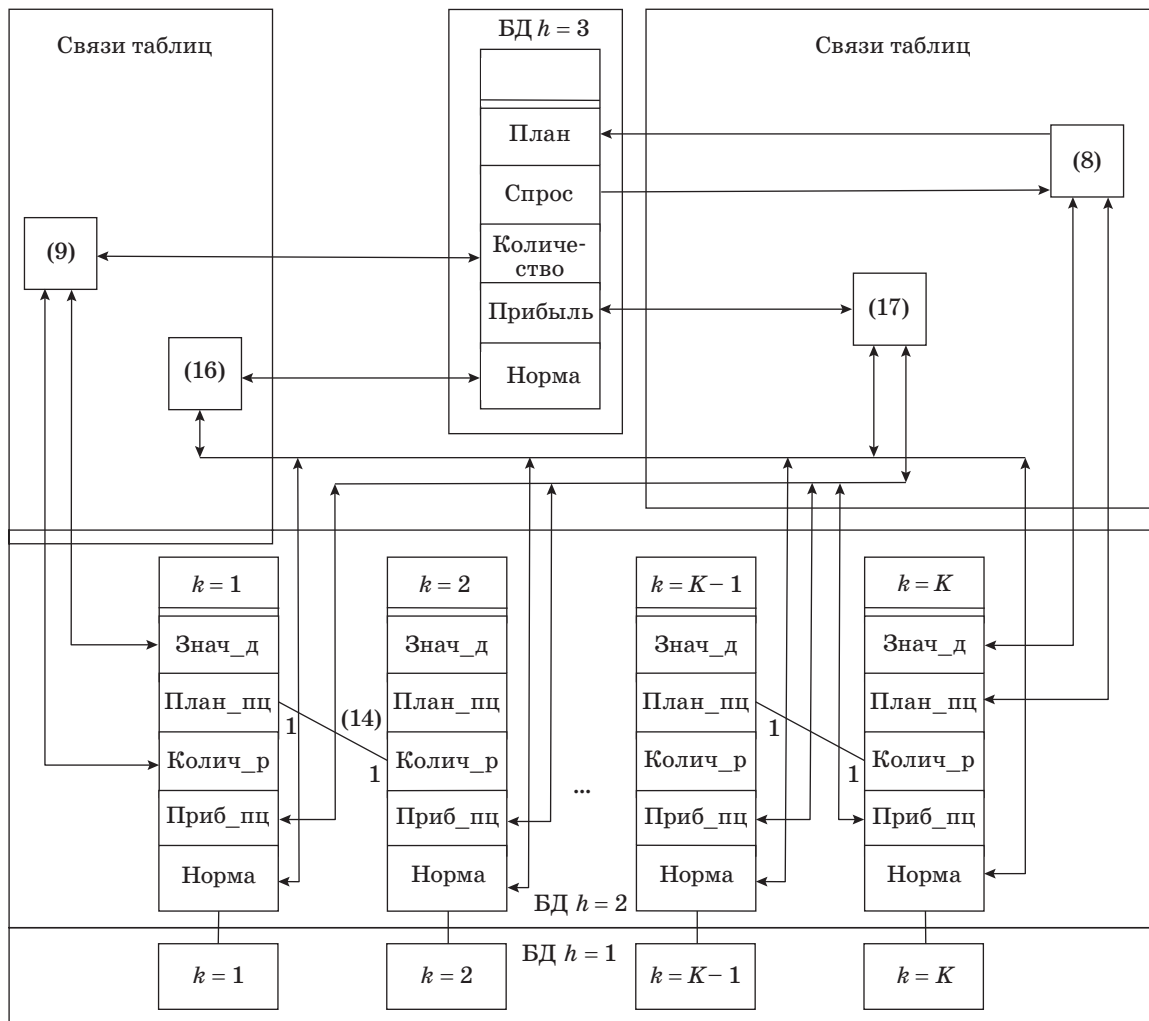
Процедура выбора программных средств на основе сформулированных требований к ним, учитывающих особенности системы, описана в работах [13, 14] (см. рис. 3).

Целесообразно построить единое информационное пространство [15–17], для чего необходимо сформировать в сервере БД многоуровневую базу данных.

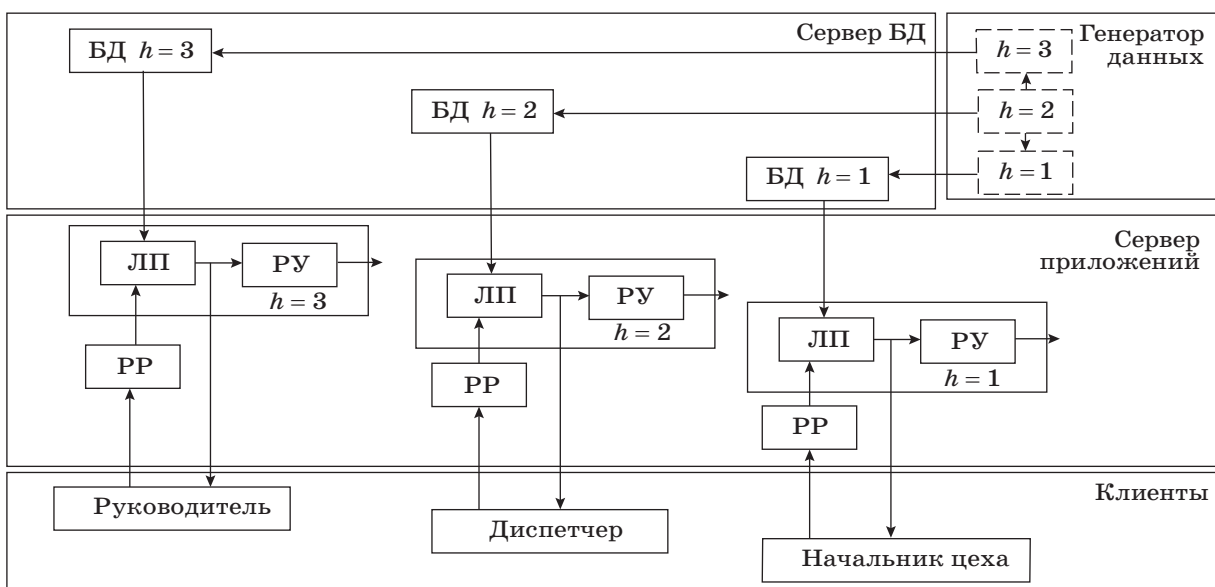
Реализация БД возможна двумя способами (рис. 6 и 7).



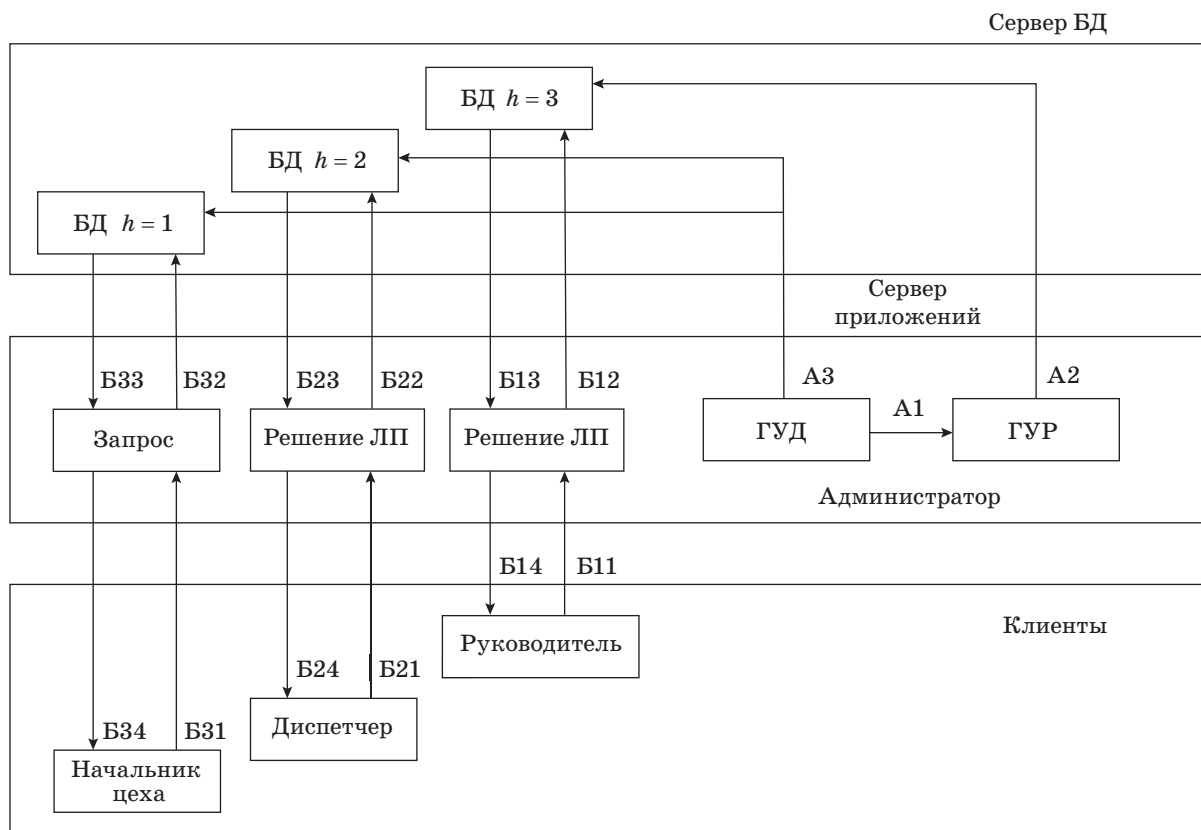
■ Рис. 5. Трехуровневая компьютерная система ($h = 1$, $h = 2$ и $h = 3$)



■ Рис. 6. Трехуровневая интегрированная БД



■ Рис. 7. Автономные локальные базы данных: ЛП — линейное программирование; РУ — разностные уравнения; РР — режимы работы (согласованный, несогласованный, переход на выпуск новой продукции)



■ Рис. 8. Схема согласованного режима: ГУД — генератор уровня диспетчера; ГУР — генератор уровня руководителя; А1 — связь ГУД и ГУР; А2 — заполнение БД $h=3$; А3 — заполнение БД $h=2$ и $h=1$; Б1 — решение задачи ЛП руководителя; Б2 — решение задачи ЛП диспетчера; Б3 — запрос с уровня начальника цеха

Структура модели представлена на рис. 8, на котором обозначения A соответствуют генерации данных, а B — обработке данных.

Заключение

Построена адаптивная оптимальная трехуровневая системная модель описания процесса планирования в АСУП. Представлены структура и технология работы модели системы.

Для описания и изучения свойств процесса планирования в трехуровневых ААСУП, работающих в высокودинамичной внешней среде, успешно применен предложенный автором однородный метод, базирующийся на прямой задаче СЛП. В системном методе описания использованы локальные методы как известные, так и предложенные автором. Среди предложенных — метод генерации данных в технологической цепочке, методы согласования экономических интересов структурных элементов с использованием равновесия по Нэшу и векторной оптимизации.

Отмечено, что данные, необходимые для отладки и функционирования ААСУП, можно получить в трудоемкой процедуре идентификации или в процедуре генерации данных. Предложенная

генерация осуществляется с помощью компьютерной модели, использующей прямую и обратную задачи СЛП. Дополнительно изучены свойства задачи СЛП, работающей как автономно, так и в режиме последовательной цепочки и связанных уровней. Предложены варианты реализации сетевой модели адаптивной системы управления производством и для малой размерности в рамках пакета MatLab, и для рабочей размерности. В последнем случае сформулированы требования и осуществлен выбор системы программных средств для реализации «тонкого» клиента. Показаны разновидности сервера баз данных и сервера приложений, в котором выделены алгоритмы генерации и обработки данных. Рассмотрена технология работы модели.

Сформированная системная модель может быть использована как для исследования процесса планирования в системе, так и для прямого планирования в составе АСУП, работающей и в традиционном режиме, и в адаптивном режиме оперативного перехода на выпуск новой продукции с предварительным определением его целесообразности.

Найдено, таким образом, решение проблемы формирования и прикладного использования модели для решения прикладных задач ААСУП.

Литература

1. Кульга К. С. Автоматизация технической подготовки и управления на основе PLM. — М.: Машиностроение, 2008. — 256 с.
2. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Проблемы адаптивного автоматизированного управления промышленным предприятием // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6. С. 18–24.
3. Чертовской В. Д. Интеллектуализация автоматизированного управления производством. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. — 164 с.
4. Мизон В. А. Интеллектуальные методы управления предприятием. — СПб.: Академия управления и экономики, 2008. — 302 с.
5. Абдикеев Н. М. Управление знаниями корпорации и реинжиниринг бизнеса. — М.: Инфра, 2010. — 352 с.
6. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами. — М.: Физматгиз, 2012. — 644 с.
7. Ленский В. Е. Эволюция представлений об управлении (методология и философский анализ). — М.: Когито-Центр, 2015. — 197 с.
8. Черняк Л. И. От адаптивной структуры — к адаптивному предприятию//Открытые системы. 2004. № 9. С. 30–35.
9. Интегральные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте//Сб. науч. тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф., Коломна, 18–20 мая 2015 г. Т. 2. — М.: Физматгиз, 2015. — 388 с.
10. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурой динамически сложных технических объектов. — М.: Наука, 2006. — 352 с.
11. Чертовской В. Д. Моделирование процессов планирования в интеллектуальной системе управления производством // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016): материалы 9-й Российской мультikonференции по проблемам управления, 4–6 октября 2016 г. СПб.: Электроприбор, 2016. С. 536–544.
12. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Формирование математического описания многоуровневой автоматизированной системы управления производством// Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 8. С. 27–31.
13. Чертовской В. Д. О перспективных методах планирования выпуска продукции при импортозамещении // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2016. Вып. 3. С. 136–142.
14. Чертовской В. Д., Некрасов А. В. Системная генерация числовых данных для модели адаптивной автоматизированной системы управления производством // Сб. научных трудов профессорско-преподавательского состава ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова. СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2016. С. 372–379.
15. Когаловский М. Р. Перспективы технологии информационных систем. — М.: ДМК Пресс, 2003. — 288 с.
16. Гринев М. Н., Кузнецов С. Д. UQL: язык запросов к интегрированным данным в терминах UML // Программирование. 2002. № 4. С. 18–24.
17. OWL Web Ontology Language Overview. 2009. <http://www.w3.org/TR/owlfeatures/> (дата обращения: 18.12.2012).

UDC 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.106

Mathematical Description and Computer Realization of Adaptive Automatized Company Control System Model

Chertovskoy V. D.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, vdchertows@mail.ru^aAdmiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya St., 198035, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Modern companies have to work in a dynamically changing environment, experiencing rapid changes of demand, appearance of new goods and constant need to be more competitive. The vector of the system functioning purpose often changes its constitution, requiring a quick switch to new production. The change of the purpose is compensated by changing the company structure connections, i.e. by the use of an adaptive regime. In the same time, the application of a computer control system allows you to introduce optimal operational modes which is very important for keeping your competitiveness high. **Purpose:** We have to figure out the possibilities of adaptive automatized company control systems in order to develop their mathematical model. **Methods:** We use a homogenous method based on the direct and reverse problems of optimal static linear programming. **Results:** An adaptive optimal three-level model is built which describes planning in an automatized company control system in a system way. The model's structure and technology of work are discussed. In the system method of a process description, both known and proposed by the author local methods were combined, including the method of data generation for a technology line and for the top level of the system, as well as the methods for reconciliation of economic interests of structural elements using Nash equilibrium and vector optimization. The peculiar features for the modeling of low and high dimensions are discussed. A low-dimension model with a simple structure allows you to promptly check the main theoretical principles, while a high-dimension model is necessary for actual control over a company. **Practical relevance:** The formed system model can be used both for studying the planning process in a system and for direct planning in an automatized company control system which can work either in the traditional mode or in the adaptive mode of a quick switch to new production whose purposefulness was preliminarily determined.

Keywords — Modelling, System Model, Planning, Three-Level Structure, Adaptive Automatized Company Control System.

References

1. Kulga K. S. *Avtomatizatsiia tekhnicheskoi podgotovki i upravleniia na osnove PLM* [Automation of Technical Preparation and Control on PLM Bases]. Moscow, Mashinostroyeniye, 2008. 256 p. (In Russian).
2. Sovetov B. Y., Tsehanovskiy V. V., Chertovskoy V. D. Problems of Adaptive Automated Control of the Industrial Enterprise. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2009, no. 6, pp. 18–24 (In Russian).
3. Chertovskoy V. D. *Intellektualizatsiia avtomatizirovannogo upravleniia proizvodstvom* [Intellectualization of Automated Manufacturing Control]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2007. 164 p. (In Russian).
4. Myzon V. A. *Intellektual'nye metody upravleniia predpriatiem* [Intellectual Work Control Method]. Saint-Petersburg, Akademiia upravleniia i ekonomiki, 2008. 302 p. (In Russian).
5. Abdikeev N. M. *Upravlenie znaniiami korporatsii i reinzhiniring biznesa* [Knowledge Control by Corporation and Business Reengineering]. Moscow, Infra Publ., 2010. 352 p. (In Russian).
6. Novikov D. A. *Teoriia upravleniia organizatsionnymi sistemami* [Control Theory by Organization Systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 2012. 644 p. (In Russian).
7. Lenskiy V. E. *Evolutsiia predstavlenii ob upravlenii (metodologiya i filosofskii analiz)* [Evolution of by Control (Methodology and Philosophy Analysis)]. Kogito-Tsentr Publ., 2015. 197 p. (In Russian).
8. Chernyak L. I. From Adaptive Structure — to Adaptive Work. *Otkrytye sistemy*, 2004, no. 9, pp. 30–35 (In Russian).
9. *Integral'nye modeli i miagkie vychisleniia v iskusstvennom intellekte* [Integral Models and Soft Computation in Artificial Intelligence]. *Sbornik nauchnykh trudov VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Proc. VIII Int. Conf.], Kolomna, May 18–20, 2015, vol. 2, Moscow, Fizmatgiz Publ., 2015. 388 p. (In Russian).
10. Ohtilev M. Y., Sokolov B. V., Yusupov R. M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniia strukturoi dinamicheskoi slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov* [Intellectual Technology of Monitoring and Control by Dynamical Complex Technical Objects Structure]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 352 p. (In Russian).
11. Chertovskoy V. D. Modelling of Planning Processes in Intellectual Manufacturing Control System. *Materialy 9-i Rossiiskoi mul'tikonferentsii po problemam upravleniia "Informatsionnyye tekhnologii v upravlenii (ITU-2016)"*, 4–6 October [Proc. 9 Multiconference on Control Problems]. Saint-Petersburg, Elektropribor Publ., 2016, pp. 536–544 (In Russian).
12. Sovetov B. Y., Tsehanovskiy V. V., Chertovskoy V. D. Mathematical Description form of Multilevel Automated Manufacturing Control System. *Izvestiia SPbGETU "LETI"*, 2013, no. 8, pp. 27–31 (In Russian).
13. Chertovskoy V. D. Planning Perspective Methods of Production Output in Import Substitute. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2016, iss. 3, pp. 136–142 (In Russian).
14. Chertovskoy V. D., Nekrasov A. V. System Generation of Numerical Data for Adaptive Automated Manufacturing Control System. *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava GUMRF imeni admirala S. O. Makarova*, 2016, pp. 372–379 (In Russian).
15. Kogalovskiy M. N. *Perspektivy tekhnologii informatsionnykh sistem* [Perspectives of Information Systems Technology]. Moscow, DMK Press Publ., 2003. 288 p. (In Russian).
16. Grinev M. N., Kuznecov S. D. QML: Query Language to Integrated Data in UML Terms. *Programmirovanie*, 2002, no. 4, pp. 18–24 (In Russian).
17. *OWL Web Ontology Language Overview*. 2009. Available at: <http://www.w3.org/TR/owlfeatures/> (accessed 18 December 2012).

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.

**БАЛОНИН
Николай
Алексеевич**



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1982 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 90 научных публикаций, в том числе трех монографий. Область научных интересов — теория динамических систем, теория идентификации, теория операторов, теория матриц, вычислительные методы, интернет-робототехника, интернет-книги с исполняемыми алгоритмами, научные социальные сети. Эл. адрес: korbendfs@mail.ru

**БОГАЧЕВ
Илья
Владимирович**



Ассистент кафедры автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета, Хабаровск. В 2010 году окончил Тихоокеанский государственный университет по специальности «Управление и информатика в технических системах». Является автором пяти научных публикаций и шести свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Область научных интересов — искусственные нейронные сети, информационно-измерительные системы, сжатие информации. Эл. адрес: ilya.bogachev@yahoo.com

**БОРОДЬКО
Денис
Николаевич**



Старший преподаватель кафедры технологий и средств комплексной обработки и передачи информации в автоматизированных системах управления Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 1997 году окончил Военную инженерно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Системы управления космических аппаратов и наземное проверочно-пусковое оборудование». В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 12 научных публикаций. Область научных интересов — технологии программирования. Эл. адрес: borodkodenis@yandex.ru

**БЛАУНШТЕЙН
Натан
Шаевич**



Гражданин Израиля. Профессор Иерусалимского технологического института, профессор-эмеритус кафедры систем связи инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, 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.blauinstein@hotmail.com

**БОРИСОВ
Роман
Владимирович**



Аспирант кафедры информационной безопасности Сибирской автомобильно-дорожной академии, Омск. В 2009 году окончил Сибирскую государственную автомобильно-дорожную академию по специальности «Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем». Является автором девяти научных публикаций и одного свидетельства о регистрации программного продукта. Область научных интересов — искусственный интеллект, информационные технологии, информационная безопасность, распознавание образов. Эл. адрес: brv1986@yandex.ru

**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

**ЕПИФАНОВ
Андрей
Валерьевич**



Доцент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

В 2003 году окончил Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров по специальности «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов».

В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 37 научных публикаций.

Область научных интересов — нормирование антропогенной нагрузки на водные объекты, математическое моделирование.
Эл. адрес: epifandr@yandex.ru

**ЕРЕМЕНКО
Александр
Валерьевич**



Доцент кафедры инфокоммуникационных систем и информационной безопасности Омского государственного университета путей сообщения.

В 2006 году окончила Сибирскую государственную автомобильно-дорожную академию по специальности «Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем».

В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 30 научных публикаций.

Область научных интересов — искусственный интеллект, информационные технологии, информационная безопасность, распознавание образов.
Эл. адрес: nexus-@mail.ru

**КОПКИН
Евгений
Вениаминович**



Профессор кафедры технологий и средств комплексной обработки и передачи информации в автоматизированных системах управления Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 1987 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Системы управления летательных аппаратов».

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 40 научных публикаций.

Область научных интересов — контроль и диагностирование сложных систем.
Эл. адрес: kopkins@mail.ru

**ЕПИФАНОВА
Марина
Анатольевна**



Аспирант кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

В 2014 году окончила магистратуру Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров по специальности «Техносферная безопасность».

Является автором шести научных публикаций и одного свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Область научных интересов — математическое моделирование в водной среде, нормирование сбросов сточных вод, геoinформационные технологии.
Эл. адрес:

epif.marina@gmail.com

**ЖИЛЬНИКОВА
Наталья
Александровна**



Доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1992 году окончила Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности по специальности «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», в 2006 году — Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.

В 2012 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 59 научных публикаций.

Область научных интересов — эколого-технологическое нормирование.
Эл. адрес:

nataliazhilnikova@gmail.com

**ЛЕВЕНЕЦ
Алексей
Викторович**



Доцент кафедры автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета, Хабаровск.

В 1988 году окончил Хабаровский политехнический институт по специальности «Электронные вычислительные машины».

В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — цифровая обработка сигналов, сжатие информации, передача данных.
Эл. адрес: levelvi@bk.ru

МАРТЫНОВА
Любовь
Александровна



Старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра «Системы освещения обстановки» АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 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 90 научных публикаций. Область научных интересов — системный анализ, математическое моделирование, оценка эффективности, обработка разнородной информации. Эл. адрес: martynowa9991@bk.ru

МОЛЕВ
Алексей
Александрович



Адъюнкт НИИ РЭБ Военно-воздушной академии им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж. В 2005 году окончил магистратуру физического факультета Воронежского государственного университета по специальности «Физика». Является автором 30 научных публикаций, одного патента на изобретение и пяти свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Область научных интересов — вопросы имитационного моделирования и оценки эффективности функционирования радиоэлектронных систем в условиях конфликта. Эл. адрес: aadm@mail.ru

СЕРГЕЕВ
Михаил
Борисович



Профессор, директор Института вычислительных систем и программирования, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1980 году окончил ЛЭТИ по специальности «Электронные вычислительные машины». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и 14 патентов на изобретения. Область научных интересов — теория разрядных вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления и др. Эл. адрес: mbse@mail.ru

МИТРОФАНОВ
Сергей
Александрович



Аспирант кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2014 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Комплексная защита объектов информатизации». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — системы беспроводной передачи данных, LTE, широкополосная передача данных, методы имитационного моделирования. Эл. адрес: smtrfnv@gmail.com

ПАСТУХОВА
Кристина
Евгеньевна



Курсант кафедры технологий и средств комплексной обработки и передачи информации в автоматизированных системах управления Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. Область научных интересов — контроль и диагностирование сложных систем. Эл. адрес: shapowa.cristina@yandex.ru

СУЛАВКО
Алексей
Евгеньевич



Старший преподаватель кафедры комплексной защиты информации Омского государственного технического университета. В 2009 году окончил Сибирскую государственную автомобильно-дорожную академию по специальности «Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем». В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 35 научных публикаций и одного патента на изобретение. Область научных интересов — искусственный интеллект, информационные технологии, информационная безопасность, распознавание образов. Эл. адрес: sulavich@mail.ru

ТАНАЕВА
Елена
Геннадьевна



Аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета, врач-офтальмолог лазерного кабинета Республиканской офтальмологической больницы им. Г. И. Григорьева, Йошкар-Ола.
В 2005 году окончила Нижегородскую государственную медицинскую академию по специальности «Лечебное дело», в 2015 году — магистратуру Поволжского государственного технологического университета по специальности «Биотехнические системы и технологии».
Является автором трех научных публикаций.
Область научных интересов — обработка и распознавание медицинских изображений в офтальмологии.
Эл. адрес: elena-309@mail.ru

ТОЛКАЧЕВА
Елена
Викторовна



Доцент кафедры информационной безопасности Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии, Омск.
В 2003 году окончила Омский государственный университет по специальности «Математика».
В 2012 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором 15 научных публикаций, трех свидетельств о регистрации алгоритма и одного свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.
Область научных интересов — нечеткая логика, Data Mining, машинное обучение.
Эл. адрес: tolkacheva_ev@mail.ru

ХАРЧЕНКО
Александр
Викторович



Доцент, начальник кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.
В 1987 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы».
В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором более 100 научных публикаций.
Область научных интересов — цифровая обработка сигналов, космические радиотехнические комплексы управления, сбора и передачи информации, методы борьбы с помехами.
Эл. адрес: 89112124893@ya.ru

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

УШАКОВ
Илья
Алексеевич



Адъюнкт кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.
В 2012 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы».
Является автором 16 научных публикаций и одного свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.
Область научных интересов — космические радиотехнические комплексы (системы), технологии управления космическими аппаратами, командно-ретрансляционные системы.
Эл. адрес: kadet.ilia@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

**ХАФИЗОВ
Динар
Гафиятуллович**



Доцент кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета, Йошкар-Ола.
В 2001 году окончил факультет информатики и вычислительной техники Марийского государственного технического университета по специальности «Вычислительные машины, системы, сети и комплексы».
В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 30 научных публикаций и трех авторских свидетельств.
Область научных интересов — цифровая обработка сигналов и изображений.
Эл. адрес:
hafizovdg@volgatech.net

**ХАФИЗОВ
Ринат
Гафиятуллович**



Профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем Поволжского государственного технологического университета, Йошкар-Ола.
В 1994 году окончил Марийский государственный технический университет по специальности «Радиотехника».
В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором более 130 научных публикаций и четырех монографий.
Область научных интересов — цифровая обработка сигналов, обработка и распознавание изображений.
Эл. адрес:
HafizovRG@volgatech.net

**ЧЕРТОВСКОЙ
Владимир
Дмитриевич**



Профессор кафедры вычислительных систем и информатики Санкт-Петербургского государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова.
В 1962 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика».
В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором более 300 научных публикаций.
Область научных интересов — информационные технологии.
Эл. адрес:
vdchertows@mail.ru

**ЧЬЕ
Ен
Ун**



Профессор, заведующий кафедрой автоматизации и системотехники Тихоокеанского государственного университета, Хабаровск.
В 1976 году окончил Хабаровский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Автоматика, телемеханика и связь».
В 1995 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором более 200 научных публикаций и 13 патентов на изобретения.
Область научных интересов — измерительные преобразователи и системы.
Эл. адрес: chye@ais.khstu.ru

**ШИШКИН
Александр
Ильич**



Профессор кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.
В 1964 году окончил Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности по специальности «Инженер-тепломеханик по автоматизации».
В 1974 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Является автором более 300 научных публикаций и двух авторских свидетельств.
Область научных интересов — математическое моделирование, прогнозирование и управление качеством водных объектов.
Эл. адрес:
aishishkin@yandex.ru

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, рекомендуется 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 в текст не заверстываются и предоставляются отдельными исходными файлами, подающимися 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 по образцам lit.dot 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»

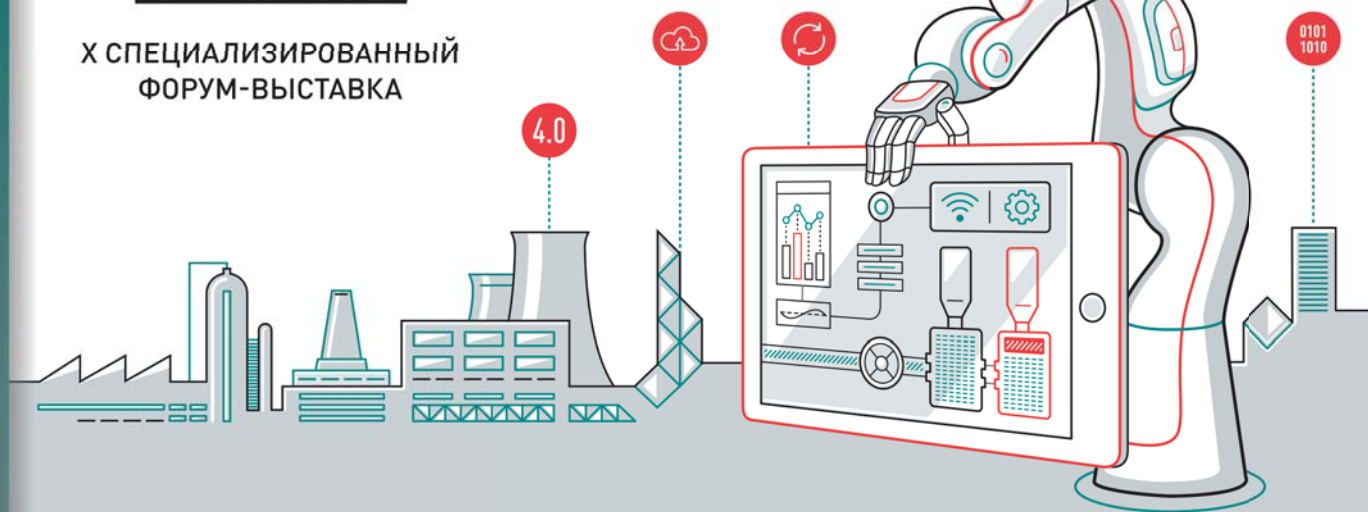
Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: i-us.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru



X СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ
ФОРУМ-ВЫСТАВКА



ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПТА - САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2017

6-8 ИЮНЯ / КОНФЕРЕНЦ-ЦЕНТР «КОНГРЕСС», ул. ШПАЛЕРНАЯ, 56, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ



Автоматизация
зданий и инженерных
систем



Автоматизация
промышленного
предприятия



Автоматизация
технологических
процессов



ИКТ в
промышленности

В ДЕЛОВОЙ ПРОГРАММЕ:

- Автоматизация в эпоху Индустрии 4.0
- Диспетчерское управление инфраструктурными объектами
- Практика автоматизации инженерных систем зданий
- Промышленная автоматизация в проектах и решениях
- Интеллектуальные системы безопасности
- Круглые столы и семинары компаний

ISSN 1684-8853



WWW.PTA-EXPO.RU

г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

☎ (812) 448-03-38

✉ info@pta-expo.ru

ОРГАНИЗАТОР

ЭкспоПромТек

г. МОСКВА

☎ (495) 234-22-10

✉ info@pta-expo.ru

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ