

ISSN 1684-8853 (print); ISSN 2541-8610 (online)

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

6(103)/2019

6(103)/2019

PEER REVIEWED JOURNAL

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

**Founder**

«Information and Control Systems», Ltd.

**Publisher**Saint-Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**

M. Sergeev

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

**Deputy Editor-in-Chief**

E. Krouk

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

**Executive secretary**

O. Muravtsova

**Editorial Board**

S. Andreev

Dr. Sc., Tampere, Finland

V. Anisimov

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc., Professor, Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc., Professor, Beer-Sheva, Israel

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

A. Dudin

Dr. Sc., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD., Professor, Riverside, USA

M. Favorskaya

Dr. Sc., Professor, Krasnoyarsk, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

A. Hramov

Dr. Sc., Professor, Innopolis, Russia

L. Jain

PhD, Professor, Canberra, Australia

V. Khimenko

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

G. Maltsev

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

G. Matvienko

Dr. Sc., Professor, Tomsk, Russia

A. Myllari

PhD, Professor, Grenada, West Indies

Y. Podoplyokin

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

K. Samouylov

Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

J. Seberry

PhD, Professor, Wollongong, Australia

A. Shalyto

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Novosibirsk, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

T. Sutikho

PhD, Associate Professor, Yogyakarta, Indonesia

Z. Yuldashev

Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Professor, Vologda, Russia

**Editor:** A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** M. Chernenko, Y. Umnitsina**Layout and composition:** Y. Umnitsina**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.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, 2019

**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL**

**Pimenov V. I., Voronov M. V., Pimenov I. V.** *The cognitive visualization of classifying rules extracted from data based on binary solver matrix model* 2

**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS**

**Mironovsky L. A., Solov'eva T. N., Shintyakov D. V.** *Fault detection optimization for controllable dynamic systems* 12

**SYSTEM AND PROCESS MODELING**

**Parshutkin A. V., Levin D. V., Galandzovskiy A. V.** *Simulation model of radar data processing in a station network under signal-like interference* 22

**INFORMATION SECURITY**

**Malikov A. V., Avramenko V. S., Saenko I. B.** *Model and method for diagnosing computer incidents in information and communication systems based on deep machine learning* 32

**INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM**

**Juwiler I., Bronfman I., Blaunstein N.** *Analysis of total signal decay and capacity of information data in wireless atmospheric communication links. Part 1* 43

**Matveev N. V., Turlikov A. M.** *Review of random multiple access methods for massive machine type communication* 54

**INFORMATION INSTRUMENTATION AND EDUCATION**

**Komarov V. A., Sarafanov A. V., Tumkovskiy S. R.** *Comparison of the effectiveness of methods to increase the throughput of experimental equipment with remote access* 68

**CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS**

**Kurkin S. A., Pitsik E. N., Hramov A. E.** *Classifying electrical activity of the brain during imaginary movements of untrained subjects using artificial neural networks* 77

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Contents of the journal «Informatisionno-upravliaiushchie sistemy (Information and Control Systems)» for 2019* 89

Submitted for publication 07.11.19. Passed for printing 24.12.19. Format 60×84<sub>1/8</sub>.  
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 «Pressa Rossi» catalogue: № 15385 — semiannual subscript.

6(103)/2019

ИНФОРМАЦИОННО-  
УПРАВЛЯЮЩИЕ  
СИСТЕМЫ

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

Учредитель  
ООО «Информационно-управляющие системы»  
Издатель  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
Главный редактор  
М. Б. Сергеев,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Зам. главного редактора  
Е. А. Крук,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ  
Ответственный секретарь  
О. В. Муравцова  
Редакционная коллегия:  
С. Д. Андреев,  
д-р техн. наук, Тампере, Финляндия  
В. Г. Анисимов,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Б. П. Безручко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ  
Н. Блаунштейн,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль  
Л. С. Джайн,  
д-р наук, проф., Канберра, Австралия  
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  
К. Кристоделу,  
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США  
Г. Н. Мальцев,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Г. Г. Матвиенко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ  
А. А. Мюллер,  
д-р наук, профессор, Гренада, Вест-Индия  
Ю. Ф. Подоплёкин,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
К. Е. Самуилов,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ  
Д. Себерри,  
д-р наук, проф., Волонгонг, Австралия  
А. В. Смирнов,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Т. Суткиноу,  
д-р наук, доцент, Джокьякарта, Индонезия  
М. Н. Фаворская,  
д-р техн. наук, проф., Красноярск, РФ  
Л. Фортуна,  
д-р наук, проф., Катания, Италия  
А. Л. Фрадков,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
В. И. Хименко,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
А. Е. Храмов,  
д-р физ.-мат. наук, Иннополис, РФ  
А. А. Шальто,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
А. П. Шепета,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Ю. И. Шокин,  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ  
З. М. Юлдашев,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Р. М. Юсупов,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Редактор: А. Г. Ларионова  
Корректор: Т. В. Звертановская  
Дизайн: М. Л. Черненко, Ю. В. Умницына  
Компьютерная верстка: Ю. В. Умницына  
Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ  
Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,  
сайт: http://i-us.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.  
© Коллектив авторов, 2019

## ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

**Пименов В. И., Воронов М. В., Пименов И. В.** Когнитивная  
визуализация классифицирующих правил, извлеченных из данных,  
на основе модели бинарной решающей матрицы 2

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

**Мироновский Л. А., Соловьева Т. Н., Шинтяков Д. В.** Оптимизация  
терминального контроля управляемых динамических систем 12

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

**Паршуткин А. В., Левин Д. В., Галандзовский А. В.** Имитационная  
модель обработки радиолокационной информации в сети  
радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех 22

## ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

**Маликов А. В., Авраменко В. С., Саенко И. Б.** Модель и метод  
диагностирования компьютерных инцидентов в информационно-  
коммуникационных системах, основанные на глубоком машинном  
обучении 32

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

**Juwiler I., Bronfman I., Blaunstein N.** Analysis of total signal decay  
and capacity of information data in wireless atmospheric communication  
links. Part 1 43

**Матвеев Н. В., Тюрликов А. М.** Обзор методов случайного  
множественного доступа к общему каналу для сценариев массовой  
межмашинной связи 54

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАЗОВАНИЕ

**Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р.** Сравнение  
эффективности методов повышения пропускной способности  
экспериментального оборудования с удаленным доступом 68

## УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

**Куркин С. А., Пицик Е. Н., Храмов А. Е.** Использование искусственных  
нейронных сетей для классификации электрической активности  
головного мозга в процессе воображения движений  
у нетренированных испытуемых 77

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Содержание журнала «Информационно-управляющие системы»  
за 2019 г. [№ 1–6] 89

Журнал входит в БД SCOPUS, в RSCI на платформе Web of Science  
и в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы  
основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени  
кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Сдано в набор 07.11.19. Подписано в печать 24.12.19. Формат 60×84<sup>1/8</sup>.  
Гарнитура SchoolBookC. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 10,8. Уч.-изд. л. 11,7. Тираж 1000 экз (1-й завод 68 экз.). Заказ № 576.  
Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.  
Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить  
в любом отделении связи по каталогу «Пресса России»:  
№ 15385 — полугодовой индекс.

## Когнитивная визуализация классифицирующих правил, извлеченных из данных, на основе модели бинарной решающей матрицы

В. И. Пименов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-7228-3009](https://orcid.org/0000-0002-7228-3009), [v\\_pim@mail.ru](mailto:v_pim@mail.ru)

М. В. Воронов<sup>б</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-0691-7245](https://orcid.org/0000-0002-0691-7245)

И. В. Пименов<sup>в</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-1954-6463](https://orcid.org/0000-0002-1954-6463)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Б. Морская ул., 18, Санкт-Петербург, 191186, РФ

<sup>б</sup>Московский государственный психолого-педагогический университет, Открытое ш., 24, стр. 27, Москва, 107143, РФ

<sup>в</sup>Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, Двинская ул., 5/7, Санкт-Петербург, 198035, РФ

**Введение:** огромные объемы данных генерируются в интернет-пространстве и из внутренней информации организаций. Для получения набора выходных данных с четкой структурой, их разделения на значимые части и построения классифицирующих правил применяются методы машинного обучения. Большая часть индуктивных методов моделирует в многомерном пространстве промежуточные и высокоуровневые абстрактные категории, которые сложно интерпретировать. **Цель:** разработка модели машинного обучения в виде «белого ящика», объясняющего выбранное решение при помощи обычных продукционных правил, и когнитивных визуализаторов для характеристики классов объектов. **Методы:** построение бинарной решающей матрицы, предоставляющей информацию о комплексе значений выбранных свойств объектов, которые имплицируют заданные классы. **Результаты:** бинарная решающая матрица формируется автоматически по результатам кластерного и дискриминантного анализов. Процесс обучения ограничивается выставлением пороговых уровней и единичных элементов матрицы, что обеспечивает возможность семантической интерпретации решающего правила. Процедура распознавания сводится к поэлементной конъюнкции тех строк матрицы, которые определяются атрибутами объекта. Выделенный единичный элемент указывает номер класса. Для интерпретации правила разработан универсальный алгоритм обработки бинарной матрицы, использующий вводимые пользователем значения признаков. Размерность просмотренного пространства определяется кольцами мерности на визуализаторе распознавания. Азимут иницированной ячейки диаграммы, имеющей наибольшую размерность, указывает принадлежность объекта с установленными признаками целевому классу. Для характеристики классов разработаны визуализаторы, демонстрирующие как их отличительные свойства, так и свойства, общие для нескольких классов. Во многих случаях распознавание типа объекта останавливается при существенно меньшей глубине просмотренного пространства признаков, чем при полном переборе. **Практическая значимость:** предложенные методы когнитивного анализа и визуализации данных выполняют не только классификацию данных, упорядочивание и отбор значимых признаков, но и построение правил, раскрывающих причинно-следственные связи между комбинацией факторов и типом принимаемого решения.

**Ключевые слова** — большие данные, когнитивные технологии, многомерный анализ данных, машинное обучение, решающее правило, бинарная решающая матрица, визуализатор.

**Для цитирования:** Пименов В. И., Воронов М. В., Пименов И. В. Когнитивная визуализация классифицирующих правил, извлеченных из данных, на основе модели бинарной решающей матрицы. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 6, с. 2–11. doi:10.31799/1684-8853-2019-6-2-11

**For citation:** Pimenov V. I., Voronov M. V., Pimenov I. V. The cognitive visualization of classifying rules extracted from data based on binary solver matrix model. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-2-11

### Введение

Умение эффективно обрабатывать неструктурированные данные — один из факторов успеха в науке, медицине, бизнесе и других сферах, где генерируются большие объемы информации. Целью изучения и анализа больших данных является получение организованного набора выходных данных с четкой структурой и обнаружение закономерностей.

Системы поддержки принятия решений, использующие большие объемы гетерогенных много-

мерных данных, находят применение при планировании стратегического развития предприятия, оценке текущей ситуации, стратегических альтернатив и интегральной эффективности управления корпорацией. Когнитивный анализ и визуализация данных используются для выявления техносферных опасностей, сетевого оперативного мониторинга, категоризации сочетания симптомов как некоторого заболевания, стратификации вузов по стоимости обучения и качеству обучения, представления кредитных историй клиентов банка, контроля состояния сложного технического объекта [1–4].

Когнитивный анализ данных включает изучение и внедрение методов, с помощью которых эксперт оценивает текущую ситуацию, обнаруживает влияние скрытых факторов, описывает выявленные закономерности, использует их для получения новых знаний, принятия решений и прогнозирования развития ситуации. Использование когнитивных технологий позволяет ослабить усилия по развитию методов хранения информации, заменив их методами автоматизированного построения баз знаний [5–6].

Основной проблемой когнитивного анализа является кластеризация данных, их разделение на значимые части, определение законов, правил и алгоритмов, по которым происходит отнесение объекта к определенному классу. Реализованные в разрабатываемых методах принципы должны быть по возможности когнитивно валидными, соответствовать потенциальной когнитивной структуре [7].

Для успешного решения различных задач анализа данных, от агрегации, группировки объектов до характеристики классов объектов с помощью их атрибутов, модель должна быть универсальной и основанной на способах обработки информации человеком. Универсальный психофизиологический механизм познания [8] использует способность человека оценивать сходство между объектами, его стремление к компактному представлению содержательно близких объектов и обобщению их описаний в терминах выбранной меры подобия.

Вместе с тем во многих ситуациях эксперт в состоянии выполнить прогноз поведения сложной системы, если на нее воздействует не более 3–5 слабо зависимых факторов внешней среды. Если входные переменные взаимосвязаны, то их влияние не способен учесть даже опытный специалист [9].

Задачи количественного анализа предшествующего опыта, отраженного в рядах накопленных данных, формирование множества вариантов решений и прогностических сценариев развития событий должны решаться с применением систем когнитивного анализа данных.

Основные требования к таким системам:

- обработка данных сверхбольшого объема;
- разнородность данных;
- значительная глубина анализа;
- интерпретируемость результатов анализа;
- доступность и простота инструментария.

Инструментальной основой для извлечения закономерностей из информации об окружающем мире являются методы машинного обучения и многомерного анализа данных, применимые для широкого спектра объектов исследования. Принадлежность объекта к одному из альтернативных классов определяется с помощью построенного в процессе обучения алгоритма распознавания посредством геометрического представления.

Проблемой остается построение модели «белого ящика», обеспечивающей семантическую интерпретацию решений на основе формальных правил.

### Обучение «белого ящика»

Трудность вербализации результатов глубокого обучения нейросетевой модели и объяснений, почему она приняла то или иное решение, несмотря на широкий спектр задач, решаемых нейронными сетями, связана с подходом «черного ящика» [10–12].

Интерпретируемые результаты показывают деревья решений. Однако автоматически построенные для больших данных деревья представляют собой громоздкие конструкции, в которых большинство промежуточных концептов являются абстрактными группами, не поддающимися семантической интерпретации. Построение же оптимального дерева решений, необходимого для получения обобщающих правил, является NP-полной задачей [13].

Опираясь на гипотезу, согласно которой закономерности обработки информации человеком выражаются нейронными кодами, а сущности предметной области могут быть представлены кодовыми обозначениями, примем построение дискретных моделей знаний как основу когнитивной обработки многомерных данных. Связь между кодовыми комбинациями значений признаков и возможными классами в явной форме устанавливают таблицы принятия решений и таблицы истинности [14].

В первом случае таблица составляется для всех комбинаций многоградационных признаков. Обученные алгоритмически на основе больших данных таблицы являются избыточными и требуют дополнительной редукции набора признаков [15]. Неоднозначность, при которой число найденных классов может быть больше одного, объясняется интерпретацией классов как решений о последовательности действий. Во втором случае таблицы ограничены применением булевых переменных и двумя классами объектов.

Целесообразным является использование модели «белого ящика», представляющей результаты машинного обучения в виде сокращенной бинарной решающей матрицы (БРМ) [16] и диаграммы многовариантного решения, объясняющих выбранный вариант при помощи булевой логики. Процедуры сокращения позволяют исключить построение промежуточных концептов для реализации последовательных методов поиска [17], а процесс распознавания выполнить в момент получения значений для достаточного числа признаков объекта.

Исходный массив данных исследуется в глобальном пространстве измеримых свойств нако-

пленных объектов. Данные о многомерных объектах  $\omega_i, i = \overline{1, n}$ , представляются вектором значений  $(x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iN_a})$  признаков априорного словаря  $\mathbf{X}_a, \mathbf{X}_a = \{X_j | j = \overline{1, N_a}\}$ , содержащего перечень измеримых свойств объектов, и сведениями о принадлежности объектов обучающей выборки к одному из установленных попарно непересекающихся классов  $\Omega_m, \Omega_m \subset \Omega, \Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \dots \cup \Omega_M$ , которые описываются классификационной переменной  $Y$ .

Бинарная решающая матрица формируется автоматически по данным, полученным в ходе кластеризации данных и дискриминантного анализа (рис. 1) [16]. БРМ выполняет адаптивное квантование признакового пространства и предоставляет информацию о кластерах в виде интерпретируемых бинарных кодов. В ней содержатся сведения о комбинации тех значений выбранных информативных признаков предъявляемых объектов, которые имплицитно выделяют классы.

Процесс обучения включает в себя квантование признаков методом, обеспечивающим разделение всех непересекающихся по каждому при-

знаку классов с использованием минимального числа порогов, и их отбор методами целочисленного программирования, при котором сокращенное описание классов сохраняет дискриминирующую силу исходного признакового пространства. Координаты элементов матрицы являются декартовым произведением множества градаций  $\{t_j | j = \overline{1, N_p}\}$  сокращенного (рабочего) словаря признаков  $\mathbf{X}_p = \{X_j | j = \overline{1, N_p}\}$  на множество классов  $\{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_M\}$ .

В отличие от таблиц принятия решений, сокращенная БРМ предоставляет в явном виде для каждой градации признака бинарную кодовую комбинацию классов, что позволяет алгоритмизировать интерпретацию принимаемого решения и визуализировать найденный образ.

Параметрическая идентификация матрицы заключается в назначении единичных значений элементам матрицы  $x_{ij}$ , если у объектов  $m$ -го класса установлен бинарный признак либо значения количественного признака  $X_j$  принадлежат интервалу с номером  $t$ :

$$x_{ij}(m) = \begin{cases} 1, \exists \omega \in \Omega_m, x_j \in (d_{(i-1)j}, d_{ij}), m = \overline{1, M}, i = \overline{1, t_j}; \\ 0 \text{ в противоположном случае.} \end{cases}$$

Число приведенных к бинарному виду (бинаризованных) признаков априорного словаря  $T_a = \sum_{j=1}^{N_a} t_j$ , где  $t_j$  — число уровней (интервалов кодирования) признака  $X_j$ . Число строк  $T_p$  сокращенной БРМ, содержащих элементы  $x_{ij}$ , равно  $\sum_{j=1}^{N_p} t_j$ , где  $N_p$  — число признаков рабочего словаря,  $N_p \leq N_a$ . Записи в БРМ упорядочены по убыванию разделяющей способности бинаризованных признаков в соответствии с их рангом  $R$ .

Возможность легкой семантической интерпретации решающего правила (РП) обеспечивается процессом обучения, который сводится к выставлению пороговых уровней и единичных элементов матрицы. При распознавании достаточно выполнить логические операции конъюнкции и импликации в сокращенном пространстве бинарных признаков рабочего словаря  $X_{T_p}$ .

### Интерпретация «белого ящика»

В отличие от таблицы и дерева решений, конструируемых по описаниям разделяемых подмножеств объектов через диапазоны признаков, БРМ настраивается через интервалы кодирования признаков как характеристические свойства, указывающие на номера классов объектов.



■ **Рис. 1.** Параметрическая идентификация решающего правила  
 ■ **Fig. 1.** Parametric identification of the solving rule

Интерпретация «белого ящика» осуществляется в процессе ввода пользователем когнитивной системы значений признаков с помощью универсального алгоритма обработки БРМ (рис. 2). Предъявляемый объект распознается в дискретизированном при обучении пространстве. Процедура распознавания сводится к поэлементной конъюнкции тех строк матрицы, которые определяются атрибутами объекта. Выделенный единственный элемент указывает номер класса.

Решающее правило осуществляет выбор класса объектов на основе комбинации установленных значений бинаризованных признаков  $(X_1, X_2, \dots, X_N)_{\text{РП}(X_1, X_2, \dots, X_N)} \Omega_m$ ,  $N$  — глубина поиска,  $N \leq N_p$ . Наличие единого алгоритма преобразования пространства признаков большой размерности в пространство решений позволяет выполнить визуализацию класса в форме когнитивного образа.

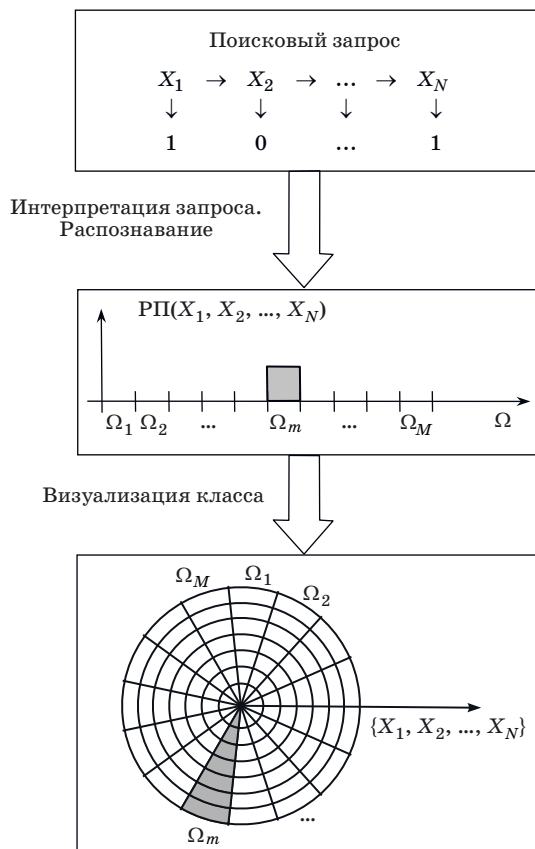
Целью разработки метода визуализации является однозначное и точное отображение класса объекта и возможность отображения характерных и общих признаков классов [18, 19].

Метод визуализации решения с использованием когнитивного облака точек может выпол-

няться после преобразования признакового пространства в пространство главных компонент [20] либо после проецирования данных на заданную пользователем плоскость. Однако многомерность данных требует значительных усилий по поиску оптимальной ориентации плоскости проекции.

Для целостного восприятия когнитивного образа вводимые пользователем значения признаков следует интегрировать в простую геометрическую фигуру, такую как круг или правильный многоугольник. Представление кластерной структуры данных и сокращение объема описаний объектов должны базироваться на образе «мишень» в виде круговой диаграммы, разбитой на сектора, и «калейдоскоп» [21].

Предлагаемый метод визуализации класса выполняет построение когнитивной круговой диаграммы. Ячейка диаграммы определяет отношение между комбинацией значений текущего подмножества признаков  $\{X_1, X_2, \dots, X_j\}$  и классом объектов  $\Omega_m$ . Инициализированные сегменты диаграммы указывают множество возможных решений. Для итогового решения выводятся характеристики выбранного класса.



■ Рис. 2. Распознавание и визуализация класса  
 ■ Fig. 2. Recognition and visualization of a class

### Когнитивная диаграмма-визуализатор классов

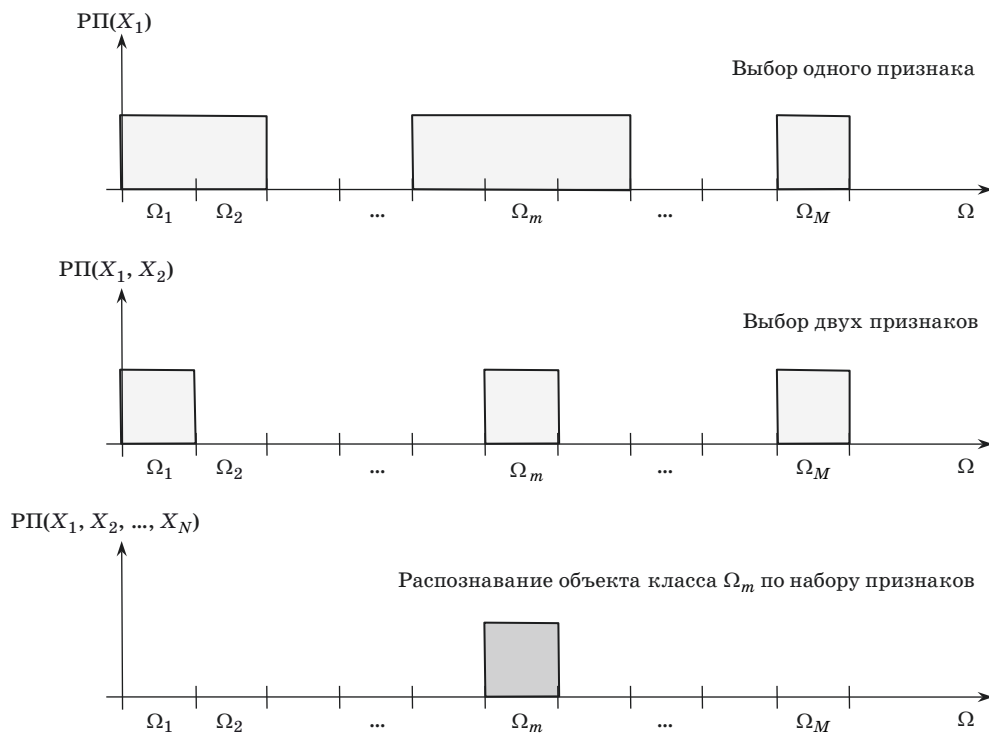
Использование визуализатора классов является заключительным этапом при выборе шаблона, прототипа решения с помощью когнитивной системы анализа данных. Для быстрого поиска объекта характерного типа формируется соответствующая последовательность запросов на ввод пользователем значений признаков.

При задании интервала кодирования очередного признака с наибольшей разделяющей силой из решающей матрицы выбирается строка с указателями на номера классов объектов. Ее поэлементная конъюнкция с установленными ранее ячейками сужает подмножество классов — потенциальных претендентов. Таким образом, допустимое множество решений последовательно уточняется через набор указателей классов, значения признаков которых соответствуют выбранному сочетанию интервалов (рис. 3).

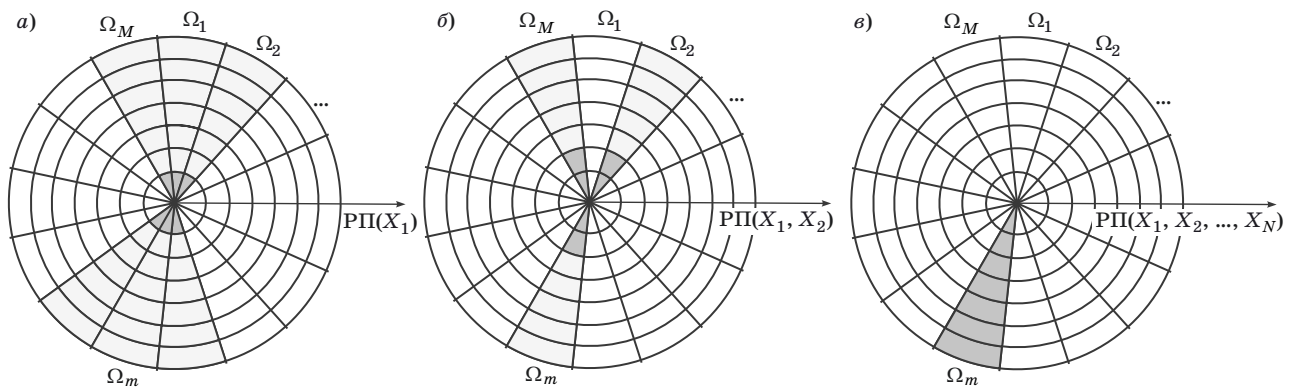
Если на  $N$ -м шаге в кодовой строке установлен один элемент, то его положение указывает номер выделенного класса. При упорядоченном рабочем словаре

$$\mathbf{X}_p = \{X_1, \dots, X_j, \dots, X_{T_p} | I(X_1) \geq I(X_2) \geq \dots \geq I(X_j) \geq \dots \geq I(X_{T_p})\},$$

где  $T_p = |\mathbf{X}_p|$ ;  $I(X_j)$  — дискриминирующая сила  $X_j$  [22–23], решение находится без перебора значе-



■ **Рис. 3.** Распознавание объекта по набору бинаризованных признаков  
 ■ **Fig. 3.** Object recognition by a set of binarized features



■ **Рис. 4.** Визуализатор распознавания: а — выбор одного признака; б — выбор двух признаков; в — распознавание объекта класса  $\Omega_m$  по набору признаков  
 ■ **Fig. 4.** Recognition visualizer: а — single feature selection; б — choice of two features; в — recognition of a class  $\Omega_m$  object by a set of features

ний всех признаков. В большинстве случаев распознавание типа объекта останавливается при глубине просмотренного пространства признаков 7–8 % [24].

Визуализатор распознавания демонстрирует на каждом шаге инициированные сегменты диаграммы и соответствующее сужение в подмножестве классифицирующих признаков пространства поиска «подмножество классов» (рис. 4):

$$X_1 \overline{\text{PП}(X_1)} \{ \Omega_1, \Omega_2, \Omega_{m-1}, \Omega_m, \Omega_{m+1}, \Omega_M \};$$

$$(X_1, X_2) \overline{\text{PП}(X_1, X_2)} \{ \Omega_2, \Omega_m, \Omega_M \};$$

$$(X_1, X_2, \dots, X_N) \overline{\text{PП}(X_1, X_2, \dots, X_N)} \Omega_m.$$

Размерность просмотренного пространства определяется кольцами мерности [25]. Азимут инициированной ячейки диаграммы, имеющей наибольшую размерность, указывает принадлежность объекта с установленными признаками целевому классу.



Инициированной ячейке соответствует продукционное правило:

если  $((x_1 \in (d_{(i-1)1}, d_{i1})_m$  и ...  $x_j \in (d_{(i-1)j}, d_{ij})_m$   
и ...  $x_N \in (d_{(i-1)N}, d_{iN})_m)$ , то  $\omega \in \Omega_m$ ,

где  $x_j$  — значение  $j$ -го признака,  $j = \overline{1, N}$ ;  $(d_{(i-1)j}, d_{ij})_m$  —  $i$ -й интервал значений для объектов класса  $\Omega_m$ .

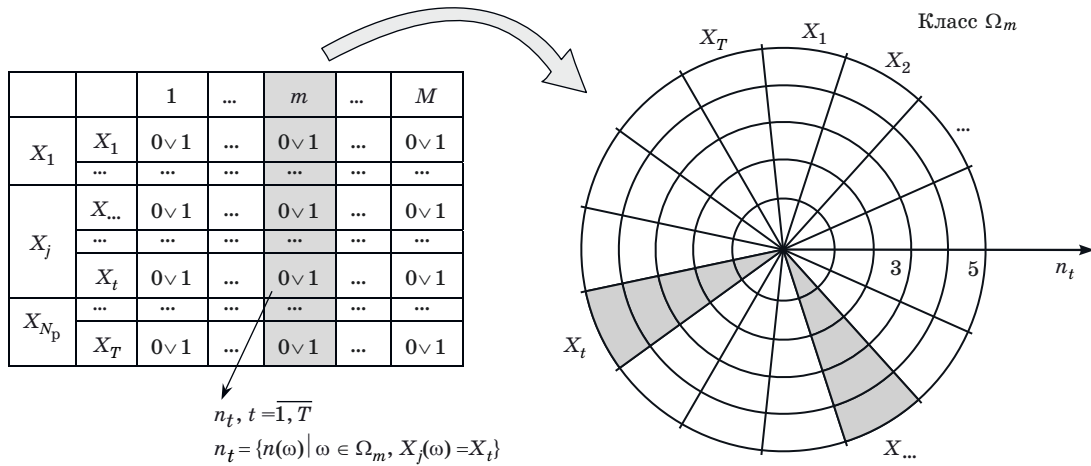
Дальнейшая интерпретация когнитивной диаграммы выполняется в терминах исходных признаков. Совокупность названий интервальных (номинальных) признаков и их значения раскрывают в установленном кластере морфологическое описание типового объекта. Его атрибуты являются наиболее частыми значениями признаков объектов в кластере и определяются как величина моды  $M_o$ .

Также указываются количество образцов в найденном кластере и их характерные особенности, отражающие индивидуальность кластера. Для этого рассматривается фрагмент матрицы с объектами целевого кластера.

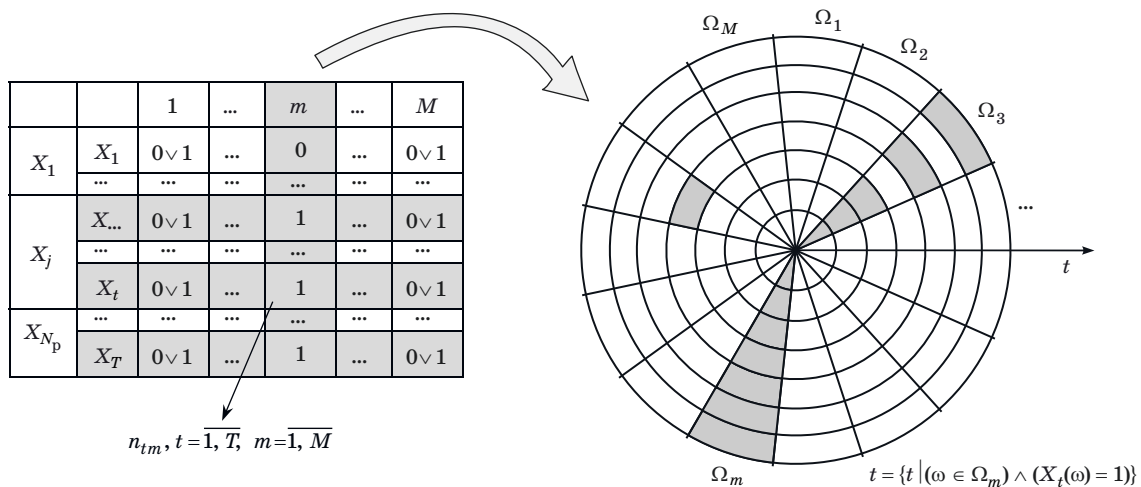
**Визуализация характерных и общих признаков**

При интерпретации выделенного класса важно указать его отличительные свойства, присущие большинству объектов класса, и те признаки, которые указывают на общие свойства классов.

Характерные особенности объектов класса  $\Omega_m$  определяются на основе запроса к ячейкам БРМ  $t$ -го столбца (рис. 5). В них подсчитывается число объектов обучающей выборки  $n_t$ , для которых



■ **Рис. 5.** Визуализатор «Характерные особенности объектов класса  $\Omega_m$ »  
 ■ **Fig. 5.** Visualizer “Characteristic features of class  $\Omega_m$  objects”



■ **Рис. 6.** Визуализатор «Общие признаки базового класса  $\Omega_m$  и остальных классов»  
 ■ **Fig. 6.** Visualizer “General features of base class  $\Omega_m$  and other classes”

признак  $X_j$  попал в  $t$ -й интервал,  $t = \overline{1, T}$ . На диаграмме число объектов  $n_t$  оценивается кольцами мерности. Инициализация сегментов диаграммы происходит при превышении  $n_t$  порогового значения  $n_{\text{пор}}$ , равного 4...6. Из диаграммы следует, что для класса  $\Omega_m$  характерными являются значения признака  $X_j = x_{\dots}$  и  $X_j = x_t$ ,  $j = \overline{1, N_p}$ .

Интерпретация значений исходных признаков, характерных для большинства объектов класса, выполняется на основе запроса к ячейкам тех строк БРМ, которые соответствуют набору установленных бинарных признаков  $X_t$  базового класса  $\Omega_m$  (рис. 6). В каждом классе определяется число тех объектов  $n_{tm}$ , у которых также имеется бинарный признак базового класса.

На диаграмме кольцами мерности оценивается номер  $t$  установленного бинарного признака базового класса. Инициализация ячеек диаграммы происходит при превышении  $n_{tm}$  порогового значения  $n_{\text{пор}}$ . Значение  $n_{\text{пор}}$  подбирается таким образом, чтобы максимально исключить сегменты, заполненные инициализированными ячейками менее чем на 10 %.

Диаграмма демонстрирует наличие признаков  $X_t$  объектов класса  $\Omega_m$  у других классов. Общие, межклассовые свойства  $X_1, X_2, X_3, X_{T-2}$  и  $X_T$  наблюдаются у объектов класса  $\Omega_m$  и класса  $\Omega_3$ .

## Заключение

Развитие информационного подхода как основы информационного моделирования связано с использованием данных и внедрением методов решения прикладных задач, управляемых данными, когда обученная на выборке система вы-

полняет процедуру распознавания вместо выполнения детерминированного алгоритма.

Хорошие результаты, которые показывают методы глубокого машинного обучения в задачах технического зрения, обработки текста и распознавания речи, получены благодаря иерархической организации признаков, с использованием многочисленных нелинейных преобразований признаков более низкого уровня в признаки более высокого уровня. Как и автоматически построенные на больших данных деревья решений, такие методы моделируют промежуточные и высокоуровневые абстрактные категории, которые сложно интерпретировать.

Особенность сокращенной БРМ, которая обеспечивает представление в явном виде для каждой градации признака бинарной кодовой комбинации классов, позволяет алгоритмизировать интерпретацию принимаемого решения и визуализировать найденный образ. Выбранный вариант визуализации в наибольшей степени адаптирован к данной особенности, отличающей матрицу от таблицы решений. Предложенные в работе модель машинного обучения в виде сокращенной БРМ и диаграмма-визуализатор многовариантного решения просты в понимании и интерпретации. Построенная модель «белого ящика» объясняет выбранный вариант при помощи обычных продукционных правил. Диаграммы-визуализаторы признаков предоставляют сведения об отличительных свойствах класса, присущих большинству объектов класса, и о тех признаках, которые указывают на общие свойства классов. Во многих случаях распознавание типа объекта останавливается при существенно меньшей глубине просмотренного пространства признаков, чем при полном переборе.

## Литература

1. Биктимиров М. Р., Елизаров А. М., Щербаков А. Ю. Тенденции развития технологий обработки больших данных и инструментария хранения разноразмерных данных и аналитики. *Электронные библиотеки*, 2016, т. 19, № 5, с. 390–407. [ojs.kpfu.ru/index.php/elbib/article/download/207/60](http://ojs.kpfu.ru/index.php/elbib/article/download/207/60) (дата обращения: 16.04.2019).
2. Подберезкин А. И. и др. *Стратегическое прогнозирование и планирование внешней и оборонной политики: монография. Т. 1: Теоретические основы системы анализа, прогноза и планирования внешней и оборонной политики*. М., МГИМО–Университет, 2015. 796 с.
3. Мамедова Г. А., Зейналова Л. А., Меликова Р. Т. Технологии больших данных в электронном образовании. *Открытое образование*, 2017, т. 21, № 6, с. 41–48. doi:<http://dx.doi.org/10.21686/1818-4243-2017-6-41-48>

4. Болбаков Р. Г. Большие данные в информационных науках. *Образовательные ресурсы и технологии*, 2017, № 1 (18), с. 30–35. doi:[10.21777/2312-5500-2017-1-30-35](https://doi.org/10.21777/2312-5500-2017-1-30-35)
5. Пименов И. В., Пименов В. И. Методы анализа данных и приобретения знаний при проектировании многомерных объектов дизайна. *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки*, 2017, № 2, с. 3–7.
6. Воронов М. В. Модель технологического действия. *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки*, 2016, № 1, с. 47–52.
7. Одинцова М. А., Радчикова Н. П. Разработка методики самоактивации личности. *Психологические исследования*, 2018, т. 11, № 58. <http://psystudy.ru/index.php/num/2018v11n58/1558-odintsova58.html> (дата обращения: 16.04.2019).

8. Загоруйко Н. Г., Борисова И. А., Кутненко О. А., Дюбанов В. В., Леванов Д. А. Конкурентное сходство как универсальный базовый инструмент когнитивного анализа данных. *Онтология проектирования*, 2015, т. 5, № 1(15), с. 7–18.
9. Мусаев А. А., Нозик А. А., Русинов Л. А. Прогностический анализ безопасности промышленного предприятия. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*, 2016, № 34(60), с. 87–93. doi:10.15217/issn1998984-9.2016.34.87
10. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview. *Neural Networks*, 2015, vol. 61, pp. 85–117. doi:10.1016/j.neunet.2014.09.003
11. Xuan L., Xiaoguang W., Stan M. Improving the interpretability of deep neural networks with knowledge distillation. *IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, 2018, pp. 905–912. doi:10.1109/IJCNN.2018.8489172
12. Богачев И. В., Левенец А. В., Чье Ен Ун. Применение искусственной нейронной сети для классификации телеметрических данных в системах сжатия. *Информационно-управляющие системы*, 2016, № 3, с. 2–7. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.2
13. Jankowski D., Jackowski K., Cyganek B. Learning decision trees from data streams with concept drift. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 80, pp. 1682–1691. doi:10.1016/j.procs.2016.05.508
14. Etinger D., Simić S. D., Buljubašić L. Automated decision-making with DMN: from decision trees to decision tables. *42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 2019, pp. 1514–1518. doi:10.23919/MIPRO.2019.8756694
15. Rong Geng, Xiaojie Wang, Ning Ye, Jun Liu. A fault prediction algorithm based on rough sets and back propagation neural network for vehicular networks. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 74984–74992. doi:10.1109/ACCESS.2018.2881890
16. Пименов И. В., Макаров А. Г. Многомерный анализ и обработка данных при извлечении знаний в области дизайна. *Информатизация образования и науки*, 2015, № 4(28), с. 83–96.
17. Фридман А. Я. Управление комбинированным выводом в дискретных интеллектуальных системах. *Информационно-управляющие системы*, 2015, № 3, с. 35–39. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.35
18. Ying Zhao, Feng Luo, Minghui Chen, Yingchao Wang, Jiazhi Xia, Fangfang Zhou, Yunhai Wang, Yi Chen, Wei Chen. Evaluating multi-dimensional visualizations for understanding fuzzy clusters. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2019, vol. 25, iss. 1, pp. 12–21. doi:10.1109/TVCG.2018.2865020
19. Annie Preston, Kwan-Liu Ma. Cluster-based visualization for merger tree data: The challenge of missing expectations. *IEEE Scientific Visualization Conference (SciVis)*, 2018, October 21–26, pp. 42–47. doi:10.1109/SciVis.2018.8823586
20. Лазутин О. Г. Методика доведения информации о техническом состоянии космических средств с использованием алгоритмов сжатия данных и когнитивного графического представления. *Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского*, 2016, вып. 650, с. 11–17.
21. Емельянова Ю. Г., Фраленко В. П. Методы когнитивно-графического представления информации для эффективного мониторинга сложных технических систем. *Программные системы: теория и приложения*, 2018, т. 9, № 4(39), с. 117–158.
22. Носов А. Л. Системы искусственного интеллекта принятия оптимальных решений в экономике. *Концепт*, 2015, № 11, с. 1–5. <http://e-koncept.ru/2015/15375.htm> (дата обращения: 17.04.2019).
23. Хименко В. И., Охтилев М. Ю., Ключарев А. А., Матьяш В. А. Анализ информативных признаков в задачах обработки данных аэрокосмического мониторинга. *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 2, с. 2–12. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.2
24. Пименов И. В., Ермин Д. А. Автоматизация поиска оптимального дизайн-решения на основе методологии инженерии знаний. *Известия вузов. Технология легкой промышленности*, 2016, № 1, с. 47–50.
25. Staffin T., Flynn B. EVM data visualization: The technomics radar tool (TRT). *ICEAA Professional Development & Training Workshop*, 2019, May 14–17, Tampa, Florida. <http://www.iceaaonline.com/ready/wp-content/uploads/2019/06/SP05-Paper-EVM-Visualization-The-Radar-Tool-Staffin.pdf> (дата обращения: 16.04.2019).

UDC 004.89

doi:10.31799/1684-8853-2019-6-2-11

**The cognitive visualization of classifying rules extracted from data based on binary solver matrix model**V. I. Pimenov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-7228-3009, v\_pim@mail.ruM. V. Voronov<sup>b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-0691-7245I. V. Pimenov<sup>c</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-1954-6463<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 18, B. Morskaya St., 191186, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>Moscow State University of Psychology & Education, 24, bld. 27, Otkrytoye Hwy., 107143, Moscow, Russian Federation<sup>c</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya St., 198035, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Huge volumes of data are generated in cyberspace or from internal information of various organizations. In order to obtain a set of output data with a clear structure, divide it into significant parts and develop rules of classification, machine learning methods are used. Most inductive methods simulate intermediate and high-level abstract categories in multidimensional space which are difficult to interpret. **Purpose:** Developing a model of machine learning in the form of a “white box” which explains the chosen solution using conventional production rules, along with cognitive visualizers for characterizing classes of objects. **Methods:** Formation of a binary decision matrix containing information about a combination of the selected informative sign values which imply the specified classes. **Results:** A binary decision matrix is formed automatically according to the results of cluster and discriminant analyzes. The learning procedure is reduced to setting interval thresholds and matrix elements, which makes it easy to implement a semantic interpretation of a solving rule. The object is recognized by elementwise conjunction of the matrix cells to which the values of the attributes are pointing, and by selection of a single cell corresponding to the class code. To interpret a rule, a universal algorithm for processing a binary matrix has been developed, which applies user-entered attribute values. The dimension of the viewed space is specified by adjustment rings on the recognition visualizer. The azimuth of an initiated diagram cell with the greatest dimensionality indicates the belonging of an object with the set features to a target class. For the characterization of classes, visualizers have been developed, demonstrating both the distinctive properties of a class and properties that several classes share. In many cases, the object type recognition stops when the depth of the scanned features space is significantly less than with a full search. **Practical relevance:** The proposed methods of cognitive analysis and data visualization provide not only the classification of data, determination of the significance of features, their ranking and selection, but also the development of rules which reveal the cause-and-effect relationship between the combination of factors and the type of a made decision.

**Keywords** — big data, cognitive technologies, multivariate data analysis, machine learning, solving rule, binary decision matrix, visualizer.

**For citation:** Pimenov V. I., Voronov M. V., Pimenov I. V. The cognitive visualization of classifying rules extracted from data based on binary solver matrix model. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-2-11

**References**

1. Biktimirov M. R., Elizarov A. M., Scherbakov A. Yu. Technology trends handling of big data and tools storage of multiformat data and analytics. *Russian Digital Libraries Journal*, 2016, vol. 19, no. 5, pp. 390–407. Available at: ojs.kpfu.ru/index.php/elbib/article/download/207/60 (accessed 16 April 2019) (In Russian).
2. Podberезkin A. I., et al. *Strategicheskoe prognozirovanie i planirovanie vneshnej i oboronnoj politiki: monografiya. T. 1: Teoreticheskie osnovy sistemy analiza, prognoza i planirovaniya vneshnej i oboronnoj politiki* [Strategic forecasting and planning of foreign and defense policy: monograph. Vol. 1. Theoretical foundations of a system for analyzing, forecasting, and planning foreign and defense policy]. Moscow, MGIMO–Universitet Publ., 2015. 796 p. (In Russian).
3. Mamedova G. A., Zeynalova L. A., Melikova R. T. Big data technologies in e-learning. *Open Education*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 41–48 (In Russian). doi:http://dx.doi.org/10.21686/1818-4243-2017-6-41-48
4. Bolbakov R. G. Big data in information sciences. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii*, 2017, no. 1 (18), pp. 30–35 (In Russian). doi:10.21777/2312-5500-2017-1-30-35
5. Pimenov I. V., Pimenov V. I. Methods of data analysis and knowledge extraction at the projecting of multivariate design objects. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna. Seriya 1. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 2, pp. 3–7 (In Russian).
6. Voronov M. V. Modeling of technological processes. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna. Seriya 1. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 1, pp. 47–52 (In Russian).
7. Odintsova M. A., Radchikova N. P. The development of personal self-activation inventory. *Psikhologicheskie issledovaniya*, 2018, vol. 11, no. 58. Available at: http://psystudy.ru/index.php/num/2018v11n58/1558-odintsova58.html (accessed 16 April 2019) (In Russian).
8. Zagoruiko N. G., Borisova I. A., Kutenko O. A., Dyubanov V. V., Levanov D. A. Rival similarity as an universal basic tool of cognitive data mining. *Ontology of Designing*, 2015, vol. 5, no. 1(15), pp. 7–18 (In Russian).
9. Musaev A. A., Nozick A. A., Rusinov L. A. Predictive analysis of safety of an industrial enterprise. *Bulletin of the Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2016, no. 34(60), pp. 87–93 (In Russian). doi:10.15217/issn1998984-9.2016.34.87
10. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview. *Neural Networks*, 2015, vol. 61, pp. 85–117. doi:10.1016/j.neunet.2014.09.003
11. Xuan L., Xiaoguang W., Stan M. Improving the interpretability of deep neural networks with knowledge distillation. *IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*, 2018, pp. 905–912. doi:10.1109/IJCNN.2018.8489172
12. Bogachev I. V., Levenets A. V., Chye En Un. Artificial neural networks in classifying telemetry data for compression systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 3, pp. 2–7 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.3.2
13. Jankowski D., Jackowski K., Cyganek B. Learning decision trees from data streams with concept drift. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 80, pp. 1682–1691. doi:10.1016/j.procs.2016.05.508
14. Etinger D., Simić S. D., Buljubašić L. Automated decision-making with DMN: from decision trees to decision tables. *42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 2019, pp. 1514–1518. doi:10.23919/MIPRO.2019.8756694
15. Rong Geng, Xiaojie Wang, Ning Ye, Jun Liu. A fault prediction algorithm based on rough sets and back propagation neural network for vehicular networks. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 74984–74992. doi:10.1109/ACCESS.2018.2881890

16. Pimenov I. V., Makarov A. G. The multidimensional analysis and data processing at knowledge extraction in the field of design. *Informatizaciya obrazovaniya i nauki*, 2015, no. 4(28), pp. 83–96 (In Russian).
17. Fridman A. Ya. Control of combined inference in discrete intelligence systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 3, pp. 35–39 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.35
18. Ying Zhao, Feng Luo, Minghui Chen, Yingchao Wang, Jiazhi Xia, Fangfang Zhou, Yunhai Wang, Yi Chen, Wei Chen. Evaluating multi-dimensional visualizations for understanding fuzzy clusters. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2019, vol. 25, iss. 1, pp. 12–21. doi:10.1109/TVCG.2018.2865020
19. Annie Preston, Kwan-Liu Ma. Cluster-based visualization for merger tree data: The challenge of missing expectations. *IEEE Scientific Visualization Conference (SciVis)*, 2018, October 21–26, pp. 42–47. doi:0.1109/SciVis.2018.8823586
20. Lazutin O. G. Technique of communicating information about the technical state of space vehicles using data compression algorithms and cognitive graphical representation. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhajskogo*, 2016, vol. 650, pp. 11–17 (In Russian).
21. Emelyanova Ju. G., Fralenko V. P. Methods of cognitive-graphical representation of information for effective monitoring of complex technical systems. *Program Systems: Theory and Applications*, 2018, vol. 9, no. 4(39), pp. 117–158 (In Russian).
22. Nosov A. L. Artificial intelligence systems for optimal decision making in the economy. *Koncept*, 2015, no. 11, pp. 1–5. Available at: <http://e-koncept.ru/2015/15375.htm> (accessed 17 April 2019) (In Russian).
23. Khimenko V. I., Okhtilev M. Yu., Klucharev A. A., Matish V. A. Informative feature analysis in data processing for aerospace monitoring. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 2, pp. 2–12 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.2
24. Pimenov I. V., Ermin D. A. Automation of optimum design decision search on the basis of knowledge engineering methodology. *The News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry*, 2016, no. 1, pp. 47–50 (In Russian).
25. Staffin T., Flynn B. EVM data visualization: The technomics radar tool (TRT). *ICEAA Professional Development & Training Workshop*, 2019, May 14–17, Tampa, Florida. Available at: <http://www.iceaaonline.com/ready/wp-content/uploads/2019/06/SP05-Paper-EVM-Visualization-The-Radar-Tool-Staffin.pdf> (accessed 16 April 2019).

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы зарегистрируетесь 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.

## Оптимизация терминального контроля управляемых динамических систем

Л. А. Мироновский<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0003-3584-7095](https://orcid.org/0000-0003-3584-7095)

Т. Н. Соловьева<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-6371-8373](https://orcid.org/0000-0002-6371-8373), [al2tn@yandex.ru](mailto:al2tn@yandex.ru)

Д. В. Шинтяков<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-7950-0694](https://orcid.org/0000-0002-7950-0694)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** удобным с точки зрения простоты контроля тестовым методом диагностирования отклонений параметров управляемых динамических систем является метод Шрайбера, использующий в качестве тестового сигнала набор прямоугольных импульсов равной длительности. Так как для одного объекта может быть построено множество тестовых сигналов, отличающихся числом импульсов, возникает задача минимизации числа тестовых импульсов при контроле системы методом Шрайбера. **Цель:** упрощение процедуры тестового контроля и диагностики линейных управляемых динамических систем. **Результаты:** показано, что множество векторов амплитуд тестовых импульсов является ядром матрицы управляемости дискретного аналога объекта диагностирования. Сформулирована задача поиска оптимальной длины тестового импульса для минимизации числа импульсов тестового сигнала. Показано, что при заданной длине импульса амплитуды импульсов оптимального тестового сигнала равны коэффициентам минимального полинома вектора управления дискретного аналога объекта относительно системной матрицы дискретного аналога объекта. Показано, что сокращение числа тестовых импульсов возможно за счет выбора длительности импульса, рассчитанной из мнимой составляющей полюсов объекта. В частности, при наличии у объекта хотя бы одной пары комплексно-сопряженных полюсов число тестовых импульсов как минимум не превышает порядок объекта. Разработан соответствующий алгоритм расчета тестового сигнала для диагностирования линейного управляемого объекта методом Шрайбера. Входными данными алгоритма является системная матрица объекта, а выходными — длина тестового импульса и вектор амплитуд импульсов. Работоспособность алгоритма проиллюстрирована на примере диагностирования двух технических объектов. **Практическая значимость:** результаты исследования могут быть применены для проведения тестового контроля статических параметров управляемых динамических объектов, допускающих линейное описание в пространстве состояний.

**Ключевые слова** — контроль, диагностика, метод Шрайбера, комплементарный сигнал, минимальный полином, оптимизация.

Для цитирования: Мироновский Л. А., Соловьева Т. Н., Шинтяков Д. В. Оптимизация терминального контроля управляемых динамических систем. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 6, с. 12–21. doi:10.31799/1684-8853-2019-6-12-21

For citation: Mironovsky L. A., Solov'eva T. N., Shintyakov D. V. Fault detection optimization for controllable dynamic systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 12–21 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-12-21

### Введение

Одной из важных прикладных отраслей теории управления является техническая диагностика управляемых динамических систем.

К основным задачам, решаемым при диагностировании, т. е. при оценке технического состояния объекта, относятся обнаружение наличия дефекта (контроль), его локализация (диагностика, определение неисправного элемента объекта) и идентификация (определение величины дефекта).

К настоящему времени разработано большое количество методов диагностирования [1–18]. Эти методы по режиму диагностирования можно разделить на два класса: тестовые и функциональные. При функциональном диагностировании оценка состояния объекта происходит в рабочем режиме. Преимуществом такого подхода является возможность контроля объекта в процессе его эксплуатации. Однако в рабочем режиме могут

быть выявлены не все неисправности на ранней стадии их возникновения. В связи с этим во многих случаях тестовое диагностирование, при котором объект снимается с эксплуатации и подвергается воздействию специальных тестовых сигналов, является более информативным по сравнению с функциональным.

В основу ряда методов тестового диагностирования динамических систем положена задача терминального управления, которая состоит в расчете управляющего воздействия, переводящего объект из одной заданной точки пространства состояний в другую [19]. Преимуществом такого подхода является простота контроля и малое число необходимых тестовых измерений. Одним из таких методов диагностирования является метод комплементарного сигнала, который по имени его создателя также называют методом Шрайбера [20, 21]. Среди множества терминальных методов метод Шрайбера выделяется про-

стойкой процедуры диагностирования: удобной формой тестового сигнала, нулевыми начальным и конечным состояниями объекта в случае отсутствия дефектов. Однако следует отметить, что метод не чувствителен к дефектам параметров, не влияющих на системную матрицу объекта диагностирования.

Тестовый сигнал при диагностировании методом Шрайбера представляет собой конечную последовательность прямоугольных импульсов. При этом для одного и того же объекта существует множество нетривиальных комплементарных сигналов, отличающихся числом импульсов, их длительностью и амплитудами. Выбор комплементарного сигнала из множества целесообразно производить путем решения оптимизационной задачи. Для этого необходимо:

- описать множество комплементарных сигналов;
- сформулировать критерий оптимизации;
- разработать алгоритм поиска оптимального комплементарного сигнала;
- оценить качество контроля при использовании оптимального сигнала.

В статье предлагаются решения поставленных задач для оптимизации числа диагностических импульсов комплементарного сигнала. Полученные результаты подтверждаются данными компьютерного моделирования.

### Постановка задачи оптимизации комплементарного сигнала

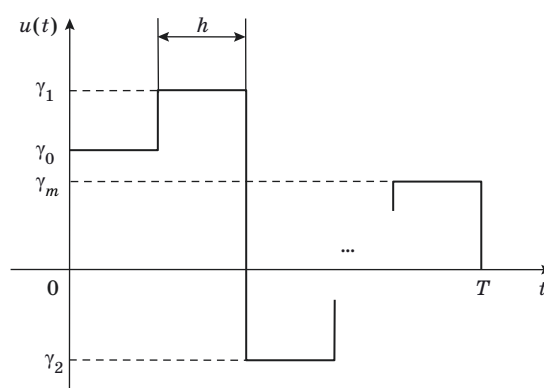
Основная идея метода Шрайбера заключается в расчете нетривиального кусочно-постоянного терминального управления, переводящего объект из нулевого начального состояния в нулевое конечное состояние. Рассчитанное воздействие называют *комплементарным сигналом*. Если при подаче комплементарного сигнала на объект задача терминального управления не выполняется, объект считается неисправным.

Определим множество комплементарных сигналов для управляемого и наблюдаемого линейного динамического объекта, заданного описанием в пространстве состояний:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t); \\ y(t) &= \mathbf{c}\mathbf{x}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$  — вектор переменных состояния;  $u(t)$  — скалярный входной сигнал;  $y(t)$  — скалярный выходной сигнал;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{b}$ ,  $\mathbf{c}$  — матрицы соответствующих размеров.

Кусочно-постоянный сигнал (рис. 1), состоящий из  $m + 1$  импульсов, может быть описан следующим образом:



■ Рис. 1. Вид тестового сигнала при контроле методом Шрайбера

■ Fig. 1. Test signal for Schreiber fault detection and isolation (FDI) method

$$u(t) = \gamma_0 \eta(t) + \gamma_1 \eta(t-h) + \dots + \gamma_m \eta(t-mh), \quad (2)$$

где  $\eta(t) = 1(t) - 1(t-h)$  — диагностический импульс конечной длительности  $h$ ,  $1(t)$  — функция Хевисайда;  $\gamma_0, \dots, \gamma_m$  — постоянные коэффициенты. Длительность управляющего воздействия составляет  $T = (m + 1)h$ .

По определению, сигнал (2) является комплементарным для объекта (1), если он переводит объект из состояния  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{0}$  в состояние  $\mathbf{x}(T) = \mathbf{0}$ . Расчет комплементарного сигнала сводится к определению амплитуд  $\gamma_0, \dots, \gamma_m$  диагностических импульсов и выбору длительности  $h$ .

*Утверждение 1.* Амплитуды диагностических импульсов комплементарного сигнала (2) для объекта (1) равны коэффициентам аннулирующего полинома вектора  $\mathbf{p}(h) = (e^{\mathbf{A}h} - \mathbf{I})\mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$  относительно матрицы  $e^{\mathbf{A}h}$ .

*Доказательство:*

□ Как известно, реакция  $\mathbf{x}(t)$  линейного объекта (1) на единичный скачок  $1(t)$  определяется формулой

$$\mathbf{p}(t) = \left( \int_0^t e^{\mathbf{A}\tau} d\tau \right) \mathbf{b} = (e^{\mathbf{A}t} - \mathbf{I})\mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{I}$  — единичная матрица.

Из (3) следует, что при входном сигнале (2) состояние объекта в момент времени  $h$  (по окончании первого импульса) будет иметь вид

$$\mathbf{x}(h) = \gamma_0 \mathbf{p}(h).$$

Состояние объекта в момент окончания второго импульса будет складываться из результата свободного движения объекта из состояния  $\mathbf{x}(h)$  и реакции на второй импульс:

$$\mathbf{x}(2h) = e^{\mathbf{A}h} \mathbf{x}(h) + \gamma_1 \mathbf{p}(h) = \left( \gamma_0 e^{\mathbf{A}h} + \gamma_1 \mathbf{I} \right) \mathbf{p}(h).$$

Рассуждая аналогичным образом, получим состояние объекта в момент окончания третьего импульса

$$\mathbf{x}(3h) = e^{Ah}\mathbf{x}(2h) + \gamma_2\mathbf{p}(h) = (\gamma_0 e^{2Ah} + \gamma_1 e^{Ah} + \gamma_2 \mathbf{I})\mathbf{p}(h).$$

По окончании входного воздействия (2) в момент времени  $T = (m + 1)h$  состояние объекта будет иметь вид

$$\mathbf{x}(T) = (\gamma_0 \Phi^m + \gamma_1 \Phi^{m-1} + \dots + \gamma_{m-1} \Phi + \gamma_m \mathbf{I})\mathbf{p}(h), \quad (4)$$

где  $\Phi = e^{Ah}$ .

Из (4) следует, что для того, чтобы нетривиальный сигнал (2) переводил объект (1) в состояние  $\mathbf{x}(T) = \mathbf{0}$ , необходимо и достаточно, чтобы полином

$$P(\mu) = \gamma_0 \mu^m + \gamma_1 \mu^{m-1} + \dots + \gamma_{m-1} \mu + \gamma_m \quad (5)$$

был аннулирующим полиномом вектора  $\mathbf{p}(h)$  относительно матрицы  $\Phi$ . ■

Из равенства (4) следует, что расчет коэффициентов комплементарного сигнала при заданной длительности импульса  $h$  сводится к поиску вектора

$$\boldsymbol{\gamma} = [\gamma_m \dots \gamma_0]^T, \quad \boldsymbol{\gamma} \in \ker \mathbf{R}(h)\boldsymbol{\delta},$$

где  $\mathbf{R}(h) = [\mathbf{p}(h), \Phi\mathbf{p}(h), \dots, \Phi^m\mathbf{p}(h)]$ ;  $\boldsymbol{\delta} \in \mathbb{R}^{m+1}$ .

Отметим, что для дискретного аналога объекта диагностирования (1) вектор  $\mathbf{p}(h)$  является вектором управления, матрица  $\Phi$  — системной матрицей, а матрица  $\mathbf{R}(h)$  — матрицей управляемости.

Обозначим  $\mathbf{H}(t, h) = [\eta(t + mh), \dots, \eta(t + h), \eta(t)]$ . Тогда множество комплементарных сигналов для объекта диагностирования (1) можно определить как

$$U = \{u(t, h) = \mathbf{H}(t, h)\boldsymbol{\gamma} \mid \boldsymbol{\gamma} \in \ker \mathbf{R}(h)\boldsymbol{\delta}\}.$$

Один из способов расчета сигнала (2), описанный в работе [21], состоит в использовании в качестве полинома (5) характеристического полинома матрицы  $e^{Ah}$ .

Для проведения диагностического эксперимента целесообразно использовать комплементарный сигнал с минимально возможным числом диагностических импульсов. Согласно утверждению 1, решение этой задачи эквивалентно поиску минимального полинома вектора  $\mathbf{p}(h)$  относительно матрицы  $\Phi = e^{Ah}$ :

$$P_{\Phi(h), \mathbf{p}(h)}(\mu) = \arg \min_{P \in \Gamma_{\Phi(h), \mathbf{p}(h)}} (\deg(P(\mu))), \quad (6)$$

где  $\Gamma_{\Phi(h), \mathbf{p}(h)}$  — множество аннулирующих полиномов вектора  $\mathbf{p}(h)$  относительно матрицы  $\Phi$ .

Порядок полинома (6) и значения его коэффициентов для объекта (1) зависят от длительности диагностического импульса  $h$ . Таким образом, получаем следующую оптимизационную задачу:

$$h_{\min} = \arg \min_{h > 0} (\deg(P_{\Phi(h), \mathbf{p}(h)}(\mu))). \quad (7)$$

Задача (7) заключается в поиске значения  $h$ , при котором порядок полинома (6), а следовательно, и число диагностических импульсов сигнала (2) будут минимальны.

### Решение задачи оптимизации комплементарного сигнала

Для решения задачи (7) рассмотрим вспомогательную задачу

$$h_{\min} = \arg \min_{h > 0} (\deg(P_{\Phi(h)}(\mu))), \quad (8)$$

где  $P_{\Phi(h)}(\mu)$  — минимальный полином матрицы  $\Phi = e^{Ah}$ .

Заметим, что поскольку минимальный полином вектора по отношению к матрице делит минимальный полином этой матрицы, решение задачи (8) является решением и для задачи (7).

Для вычисления минимального полинома матрицы  $e^{Ah}$  удобно использовать представление матрицы  $\mathbf{A}$  в блочно-диагональной форме Жордана

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \mathbf{A}_k & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & \mathbf{A}_s \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Тогда матрица  $e^{Ah}$  также будет иметь блочно-диагональный вид

$$\Phi = e^{Ah} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \Phi_k & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & \Phi_s \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $\Phi_k = e^{\mathbf{A}_k h}$ .

Количество, размер и структура блоков матрицы  $\mathbf{A}$  в форме (9) зависят от собственных чисел матрицы (полюсов объекта диагностирования).

Пользуясь представлением матрицы  $\mathbf{A}$  объекта диагностирования в форме Жордана, удобно сформулировать следующие утверждения.



**Утверждение 2.** Минимальный полином матрицы  $e^{Ah}$  для управляемого и наблюдаемого объекта (1), имеющего полюсы  $\lambda_1, \dots, \lambda_s$  с кратностями  $r_1, \dots, r_s$  соответственно, равен

$$P(\mu) = \prod_{\omega \in \Omega} (\mu - \omega)^{r(\omega)}, \quad (11)$$

где  $\Omega = \{e^{\lambda_1 h}, \dots, e^{\lambda_s h}\}$ ;  $r(\omega) = \max_{j=1}^s \{r_j \mid e^{\lambda_j h} = \omega\}$ .

**Доказательство:**

□ Каждому полюсу  $\lambda_j$  кратности  $r_j$  управляемого и наблюдаемого объекта диагностирования (1) соответствует в матрице (9) блок  $A_j$  порядка  $r_j$ :

$$A_j = \begin{bmatrix} \lambda_j & 1 & & 0 \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & 1 \\ 0 & & & \lambda_j \end{bmatrix}.$$

Соответствующий блок матрицы (10) будет иметь вид

$$\Phi_j = e^{\lambda_j h} \begin{bmatrix} 1 & h & \frac{h^2}{2!} & \dots & \frac{h^{r_j-1}}{(r_j-1)!} \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & \ddots & \frac{h^2}{2!} \\ 0 & & & \ddots & h \\ & & & & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Очевидно, что минимальный полином матрицы (12) имеет порядок  $r_j$  и равен

$$P_j(\mu) = |\mu I - \Phi_j| = (\mu - e^{\lambda_j h})^{r_j}. \quad (13)$$

Известно, что минимальный полином блочно-диагональной матрицы равен наименьшему общему кратному минимальных полиномов ее диагональных блоков. Таким образом, наименьшее общее кратное полиномов (13) имеет вид (11). ■

**Следствие 2.1.** Порядок минимального полинома матрицы  $e^{Ah}$  для объекта (1) не превышает  $n$ .

**Следствие 2.2.** Если все полюсы объекта (1) вещественны, порядок минимального полинома матрицы  $e^{Ah}$  не зависит от величины  $h$  и равен  $n$ .

**Утверждение 3.** Порядок минимального полинома матрицы  $e^{Ah}$  для объекта (1) может быть меньше  $n$ , если и только если среди полюсов объекта найдется пара  $\alpha_j + i\beta_j$  и  $\alpha_k + i\beta_k$  такая, что  $\alpha_j = \alpha_k$ .

**Доказательство:**

□ Согласно утверждению 2, порядок полинома (11) будет меньше  $n$ , если и только если после-

довательность  $e^{\lambda_1 h}, \dots, e^{\lambda_s h}$  содержит повторяющиеся элементы, т. е. среди полюсов объекта  $\lambda_1, \dots, \lambda_s$  найдется хотя бы одна пара  $\lambda_j = \alpha_j + i\beta_j$  и  $\lambda_k = \alpha_k + i\beta_k$ , для которой выполняется условие

$$e^{(\alpha_j + i\beta_j)h} = e^{(\alpha_k + i\beta_k)h}.$$

Это равенство можно переписать в виде

$$e^{(\alpha_j - \alpha_k)h + i(\beta_j - \beta_k)h} = 1. \quad (14)$$

Поскольку  $h > 0$ , равенство (14) выполняется, если и только если  $\alpha_j - \alpha_k = 0$  и  $|\beta_j - \beta_k|h = 2\pi z$ ,  $z \in \mathbb{N}$ . ■

**Следствие 3.1.** Если объект (1) имеет полюс  $\alpha_j + i\beta_j$  кратности  $r_j$  и полюс  $\alpha_k + i\beta_k$  кратности  $r_k$

такие, что  $\alpha_j = \alpha_k$ , то при  $h = \frac{2\pi z}{|\beta_j - \beta_k|}$ ,  $z \in \mathbb{N}$  поряд-

док полинома (11) не превышает  $n - \min(r_j, r_k)$ .

**Следствие 3.2.** Если объект диагностирования (1) имеет хотя бы одну пару комплексно-сопряженных полюсов  $\alpha_j \pm i\beta_j$  кратности  $r_j$ , порядок минимального полинома матрицы  $e^{Ah}$  при выборе  $h = \frac{\pi z}{\beta_j}$ ,  $z \in \mathbb{N}$ , не превышает  $n - r_j$ .

Таким образом, задача выбора значения  $h$ , при котором порядок минимального полинома матрицы  $e^{Ah}$  будет наименьшим, носит комбинаторный характер. Ниже предлагается алгоритм ее решения.

### Алгоритм расчета тестового комплементарного сигнала с минимальным числом импульсов

Сформулированные утверждения использованы для формирования алгоритма расчета тестового комплементарного сигнала с минимальным числом диагностических импульсов.

**Входные данные:** матрица  $A$  описания объекта диагностирования (1).

**Выходные данные:**  $\gamma_0, \dots, \gamma_m$  — амплитуды диагностических импульсов,  $h_{\min}$  — длительность диагностических импульсов.

**Шаг 1.** Рассчитать собственные числа матрицы  $A$ , сгруппировать их по алгебраической кратности и записать их в виде  $\lambda_1 = \alpha_1 + i\beta_1, \dots, \lambda_s = \alpha_s + i\beta_s$  с кратностями  $r_1, \dots, r_s$ .

**Шаг 2.** Собственные числа  $\lambda_1, \dots, \lambda_s$  разбить на  $d$  групп, где  $1 \leq d \leq s$ , так, чтобы числа, находящиеся в одной группе, имели одинаковое значение действительной части:

$$(\alpha_1 + \beta_{11}i, \alpha_1 + \beta_{12}i, \dots), \dots, (\alpha_d + \beta_{d1}i, \alpha_d + \beta_{d2}i, \dots).$$

**Шаг 3.** Множество подходящих значений длительности импульса инициализировать пустым:  $H = \emptyset$ .

**Шаг 4.** Для каждой группы собственных чисел, индекс группы  $k = 1, \dots, d$ , выполнить поиск подходящих значений шага по следующему алгоритму. Обозначим количество чисел в  $k$ -й группе как  $n_k$ .

Для  $k = 1, \dots, d$ :

**Шаг 4.1.** Составить список  $L$  всех различных (неупорядоченных) пар мнимых частей собственных чисел, содержащихся в  $k$ -й группе:

$$L = \{(\beta_{ki}, \beta_{kj}) : i = 1, \dots, n_k; j = i + 1, \dots, n_k\}.$$

Общее количество пар в списке равно  $(n_k^2 - n_k)/2$ . Таким образом, если  $k$ -я группа содержит только одно число, список  $L$  оказывается пустым, и шаги 4.1–4.3 для данного значения  $k$  могут быть пропущены.

**Шаг 4.2.** Разбить список пар на непересекающиеся классы эквивалентности:  $L = L_1 \cup L_2 \cup \dots \cup L_K$ , где  $1 \leq K \leq (n_k^2 - n_k)/2$ .

Будем называть две пары  $(\beta_1, \beta_2), (\beta_3, \beta_4)$  совместимыми, если отношение их разностей — рациональное число:

$$\frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_3 - \beta_4} \in \mathbb{Q}.$$

Совместимость задает отношение эквивалентности на множестве пар.

**Шаг 4.3.** Найти значение длительности импульса  $h$  для каждого из классов  $L_1, \dots, L_K$ . (Все пары собственных чисел в пределах одного класса эквивалентности совместимы, что означает, что существует такое общее для всего класса значение шага  $h$ , которое отобразит каждую пару на одно комплексное число.)

Для  $g = 1, \dots, K$ :

**Шаг 4.3.1.** Вычислить модули отношений разностей пар в классе  $L_g$  к разности первой пары (отношения по построению являются рациональными числами):

$$\frac{p_2}{q_2} = \left| \frac{\beta_2 - \beta'_2}{\beta_1 - \beta'_1} \right|, \frac{p_3}{q_3} = \left| \frac{\beta_3 - \beta'_3}{\beta_1 - \beta'_1} \right|, \dots, \quad (15)$$

где  $(\beta_1, \beta'_1), \dots, (\beta_M, \beta'_M)$  — пары мнимых частей собственных чисел в классе эквивалентности  $L_g$ ,  $M$  — количество пар в этом классе;  $p_2, \dots, p_M \in \mathbb{Z}$ ;  $q_2, \dots, q_M \in \mathbb{Z}$ .

**Шаг 4.3.2.** Вычислить наименьшее общее кратное  $z$  числителей рациональных чисел:

$$z = \text{НОК}(p_2, p_3, \dots, p_M).$$

Если  $L_g$  содержит только одну пару, то  $z = 1$ .

**Шаг 4.3.3.** Вычислить значение  $h$ , которое отображает каждую пару из класса в одну точку:

$$h = \frac{2\pi}{\beta_1 - \beta'_1} z.$$

**Шаг 4.3.4.** Добавить  $h$  во множество  $H$ , инициализированное на шаге 3.

**Шаг 5.** Если  $H = \emptyset$ , задать  $H = \{h\}$ , где  $h$  — любое.

**Шаг 6.** Для каждого значения  $h \in H$  определить порядок минимального полинома вектора  $\mathbf{p}(h) = (e^{Ah} - \mathbf{I})\mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$  для матрицы  $e^{Ah}$ . Этот порядок равен рангу матрицы  $\mathbf{R}(h) = [\mathbf{p}(h), \Phi\mathbf{p}(h), \dots, \Phi^{n-1}\mathbf{p}(h)]$ :

$$r(h) = \text{rank}(\mathbf{R}(h)).$$

**Шаг 7.** Среди всех  $h \in H$  выбрать  $h_{\min}$ :

$$h_{\min} = \arg \min_{h \in H} (r(h)).$$

**Шаг 8.** Рассчитать вектор  $[\gamma_m, \dots, \gamma_0]^T$ , принадлежащий ядру матрицы

$$\mathbf{R}(h_{\min}) = \left[ \mathbf{p}(h_{\min}), \Phi\mathbf{p}(h_{\min}), \dots, \Phi^{r(h_{\min})}\mathbf{p}(h_{\min}) \right],$$

и завершить работу алгоритма.

*Замечание 1.* Для выполнения последнего шага алгоритма удобно использовать функцию *null* пакета MATLAB.

*Замечание 2.* При реализации алгоритма следует учесть, что задачи поиска отношений (15) и определения кратности являются плохо обусловленными. В связи с этим максимально возможное количество вычислений необходимо производить в символьном виде при высокой точности задания исходных данных.

*Замечание 3.* При использовании алгоритма следует учесть, что длительность диагностического импульса, превышающая время переходного процесса или пренебрежимо малая в сравнении с этим временем, является неинформативной с точки зрения контроля дефектов.

*Замечание 4.* Комплементарный сигнал рассчитывается таким образом, чтобы к моменту времени  $T$  вектор состояний объекта диагностирования стал нулевым. Это означает, что дефекты матрицы с выходов объекта (1) являются необнаружимыми данным методом. Расчет комплементарного сигнала производится на основе собственных чисел матрицы  $\mathbf{A}$  объекта, матрица  $\mathbf{b}$  используется для выбора оптимального сигнала из множества. Таким образом, предложенный алгоритм позволяет расширить класс обнаружи-

мых дефектов для метода Шрайбера, поскольку в случае отличия минимального полинома  $p(h_{\min})$  относительно матрицы  $e^{Ah_{\min}}$  от минимального полинома матрицы  $e^{Ah_{\min}}$  обнаруживаются дефекты не только матрицы  $A$ , но и матрицы  $b$ .

### Примеры терминального контроля технических объектов

Рассмотрим несколько примеров контроля динамических систем методом Шрайбера и проиллюстрируем работу изложенного алгоритма расчета оптимального комплементарного сигнала.

**Пример 1.** Объект диагностирования четвертого порядка имеет следующие матрицы описания в пространстве состояний (1):

$$A = \begin{bmatrix} -0,1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -0,1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & -4 & 0 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad c = I.$$

Выполним расчет комплементарного сигнала в соответствии с алгоритмом, предложенным в работе [21].

Время переходного процесса составляет около 30 с, следовательно, можно выбрать длительность импульса, например,  $h = 2\pi$  [с].

Полюсы объекта диагностирования представляют собой две комплексно-сопряженные пары

$$\lambda_{1,2} = -0,1 \pm i; \quad \lambda_{3,4} = \pm 4i. \quad (16)$$

Этим парам отвечают собственные числа матрицы  $\Phi$

$$\mu_{1,2} = e^{-0,1h \pm ih}; \quad \mu_{3,4} = e^{\pm 4ih}.$$

Подставляя  $h = 2\pi$  [с], получаем

$$\mu_{1,2} = e^{-0,2\pi \pm 2\pi i} = e^{-\frac{\pi}{5}}; \quad \mu_{3,4} = e^{\pm 2\pi i} = 1.$$

Характеристический полином матрицы  $\Phi$  имеет порядок 4, его коэффициенты находим по формулам Виета

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= 1; \quad \gamma_1 = -2 - 2e^{-\frac{\pi}{5}}; \quad \gamma_2 = 1 + e^{-\frac{2\pi}{5}} + 4e^{-\frac{\pi}{5}}; \\ \gamma_3 &= -2e^{-\frac{2\pi}{5}} - 2e^{-\frac{\pi}{5}}; \quad \gamma_4 = e^{-\frac{2\pi}{5}}. \end{aligned}$$

Численные значения коэффициентов составляют  $\gamma_0 = 1$ ;  $\gamma_1 \approx -3,067$ ;  $\gamma_2 \approx 3,419$ ;  $\gamma_3 \approx -1,636$ ;  $\gamma_4 \approx 0,285$ .

Таким образом, с помощью алгоритма из [21] рассчитан тестовый комплементарный сигнал, содержащий пять импульсов. На рис. 2, а представлены графики комплементарного сигнала и реакции исправного объекта на этот сигнал.

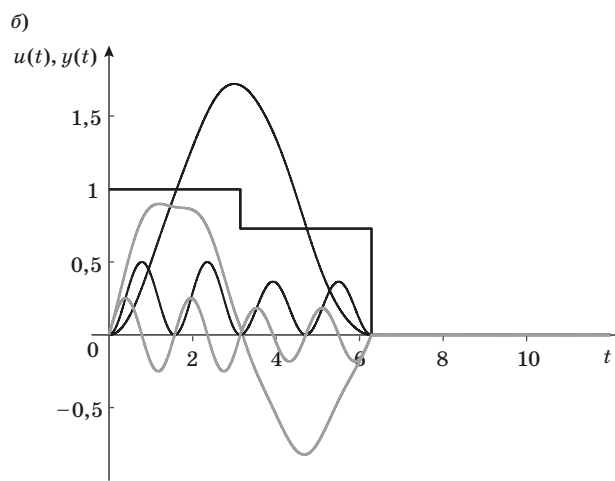
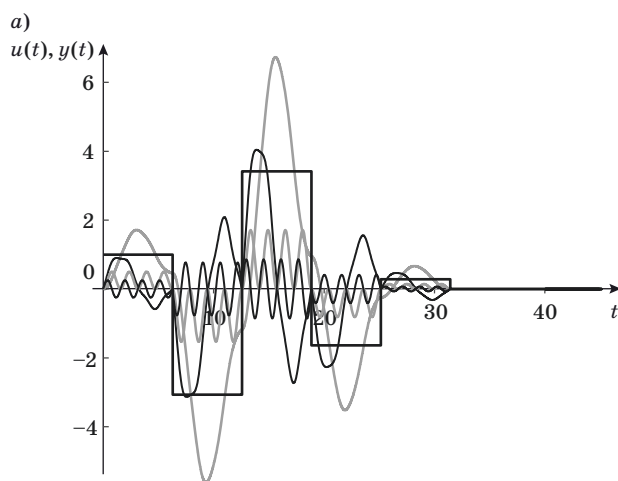
Рассчитаем комплементарный сигнал, содержащий минимальное число импульсов, используя предложенный алгоритм.

Полюсы объекта диагностирования представляют собой две комплексно-сопряженные пары (16), т. е. на шаге 2 получаем две группы  $(-0,1 + i; -0,1 - i)$ ,  $(4i; -4i)$ .

На шаге 4 для первой группы получаем список  $L = \{(i, -i)\}$ . Список содержит единственную пару, для которой вычисляем  $h_1 = \pi$  [с].

Для второй группы получаем  $L = \{(4i, -4i)\}$ ,  $h_2 = \pi/4$  [с].

Определим порядок минимального полинома вектора  $p(h)$  для каждого значения  $h$ .



■ **Рис. 2.** Реакция исправного объекта на комплементарный сигнал из пяти (а) и двух (б) импульсов  
 ■ **Fig. 2.** Fault-free object response to a complementary signal of five (a) and two (б) pulses

При  $h_1 = \pi$  [с] получаем

$$R(h_1) = \begin{bmatrix} 1,7117 & -1,2503 & 0,9132 & -0,6670 \\ 0,0561 & -0,0409 & 0,0299 & -0,0218 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$r(h_1) = 1.$$

При  $h_2 = \pi/4$  [с]

$$R(h_2) = \begin{bmatrix} 0,3232 & 0,6384 & 0,5640 & 0,1862 \\ 0,7911 & 0,0867 & -0,1414 & -0,6803 \\ 0,5 & -0,5 & 0,5 & -0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$r(h_2) = 3.$$

Наименьший порядок минимального полинома равен 1 и достигается при  $h = \pi$  [с]. На шаге 8 получаем  $\gamma_0 = 1; \gamma_1 = e^{-\frac{\pi}{10}}$ .

Численные значения коэффициентов составляют  $\gamma_0 = 1; \gamma_1 \approx 0,73$ .

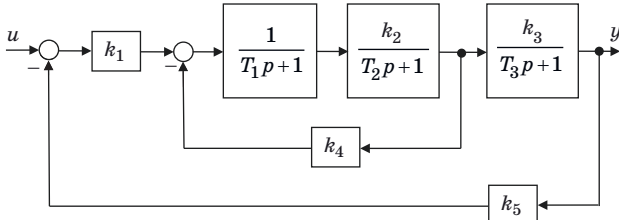
На рис. 2, б приведены графики соответствующего комплементарного сигнала, содержащего два импульса, и реакции исправного объекта на этот сигнал.

Таким образом, предложенный алгоритм позволил рассчитать комплементарный сигнал для диагностирования объекта четвертого порядка, содержащий всего два импульса длительностью  $\pi$  [с].

**Пример 2.** На рис. 3 показана структурная схема автоматизированного электропривода постоянного тока.

Номинальные значения параметров электропривода составляют  $k_1 = 2; k_2 = 35,2; k_3 = 0,512; k_4 = 1,8; k_5 = 0,016; T_1 = 0,5; T_2 = 0,44; T_3 = 0,2$ .

Для описания объекта в пространстве состояний (1) в качестве переменных состояния выберем выходные сигналы аperiодических звеньев. Тогда структурной схеме (см. рис. 3) будет соответствовать описание в пространстве состояний (1) с матрицами



■ Рис. 3. Структурная схема электропривода  
 ■ Fig. 3. The block diagram of the electric drive

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} & -\frac{k_4}{T_1} & -\frac{k_1 k_5}{T_1} \\ \frac{k_2}{T_2} & -\frac{1}{T_2} & 0 \\ 0 & \frac{k_3}{T_3} & -\frac{1}{T_3} \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{T_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad c = [0 \ 0 \ 1].$$

На основании импульсной характеристики электропривода (рис. 4) можно предположить, что для контроля электропривода методом Шрайбера целесообразно выбрать длину импульса  $h$  в диапазоне от 0,1 до 1,7 с.

Для расчета комплементарного сигнала воспользуемся предложенным алгоритмом.

Электропривод имеет один вещественный полюс  $\lambda_1 = -5,0442$  и комплексно-сопряженную пару полюсов  $\lambda_{2,3} = -2,1142 \pm 16,9738i$ . На шаге 2 получаем две группы полюсов  $(-5,0442), (-2,1142 + 16,9738i; -2,1142 - 16,9738i)$ .

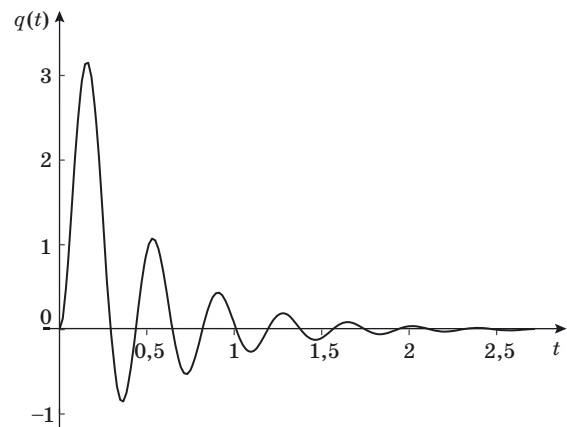
Первая группа содержит только одно число, поэтому, согласно алгоритму, переходим к рассмотрению второй группы.

Для второй группы получаем список  $L = \{(16,9738i; -16,9738i)\}$ . Список содержит единственную пару, для которой вычисляем

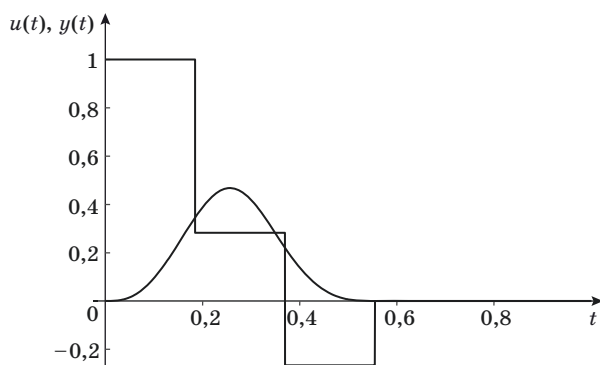
$$h = \frac{2\pi}{2 \cdot 16,9738} \approx 0,185 \text{ с.}$$

Определим порядок минимального полинома вектора  $p(h)$ :

$$R(h) = \begin{bmatrix} 0,0513 & -0,0345 & -0,0158 \\ 1,8273 & -1,2417 & -0,5670 \\ 0,3451 & 0,1219 & 0,0162 \end{bmatrix}; \quad r(h) = 2.$$



■ Рис. 4. Импульсная весовая характеристика электропривода  
 ■ Fig. 4. Impulse response of the electric drive



■ **Рис. 5.** Реакция исправного электропривода на комплементарный сигнал

■ **Fig. 5.** Fault-free electric drive response to a complementary signal

Порядок минимального полинома равен двум. На шаге 8 получаем следующие значения коэффициентов:  $\gamma_0 = 1$ ;  $\gamma_1 \approx 0,283$ ;  $\gamma_2 \approx -0,2658$ .

Графики полученного комплементарного сигнала и реакции исправного объекта на этот сигнал представлены на рис. 5.

Евклидова норма выходного сигнала исправного объекта на интервале  $3h \leq t \leq 6h$  составляет  $6,2533 \cdot 10^{-5}$ .

Рассмотрим следующие однократные дефекты электропривода:

№ 1–5 — увеличение на 20 % коэффициента усиления  $k_1, \dots, k_5$  соответственно;

№ 6–8 — увеличение на 20 % постоянной времени  $T_1, \dots, T_3$  соответственно.

Будем поочередно вносить в объект диагностирования указанные однократные дефекты, подавать на объект комплементарный сигнал (см. рис. 5) и рассчитывать евклидову норму выходного сигнала на интервале  $3h \leq t \leq 6h$ . Результаты расчетов представлены в таблице.

Номер дефекта	$\ y(t)\ _{3h \leq t \leq 6h}$	Номер дефекта	$\ y(t)\ _{3h \leq t \leq 6h}$
1	0,1775	5	0,148
2	38,5157	6	49,6201
3	0,1775	7	49,986
4	32,021	8	17,9484

### Литература

1. Мальцев Г. Н., Назаров А. В., Якимов В. Л. Имитационное моделирование процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования. *Информационно-управляющие системы*, 2016, № 4, с. 34–43. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.34

При наличии каждого из дефектов норма выходного сигнала на контрольном интервале существенно отлична от нуля по сравнению с нормой выходного сигнала исправного объекта. Это означает, что все рассмотренные дефекты являются диагностируемыми с помощью построенного комплементарного сигнала.

### Заключение

В статье рассмотрена задача минимизации числа тестовых импульсов при диагностировании управляемых и наблюдаемых линейных динамических систем методом Шрайбера за счет выбора длительности импульса. Произведено математическое описание множества комплементарных тестовых сигналов.

Сформулирована задача оптимизации на описанном множестве. Сформулированы и доказаны утверждения о минимальном числе тестовых импульсов для управляемого и наблюдаемого линейного объекта диагностирования. Описан соответствующий алгоритм расчета комплементарного сигнала с минимальным числом импульсов. Работоспособность алгоритма проиллюстрирована на примерах.

Полученные результаты могут быть использованы для поиска неисправностей динамических объектов, допускающих линейное описание, в частности, электрических цепей, механических систем, систем автоматического управления и др.

В качестве направлений для дальнейшего исследования можно указать две задачи. Первая состоит в обобщении полученных результатов на более широкие классы объектов диагностирования, в частности, на неуправляемые и ненаблюдаемые объекты. Вторая — в оптимальном выборе длительности импульса в случае, когда минимизация числа импульсов тестового сигнала за счет выбора длительности импульса невозможна или нецелесообразна.

### Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00244).

2. Жирабок А. Н., Шумский А. Е., Павлов С. В. Диагностирование линейных динамических систем непараметрическим методом. *Автоматика и телемеханика*, 2017, № 7, с. 3–21.

3. **Аксенова Г. П.** Локализация кратных неисправностей при групповом контроле в дискретном устройстве. *Автоматика и телемеханика*, 2017, № 12, с. 118–130.
4. **Ягодников Д. А., Рудинский А. В.** Диагностика ракетных и реактивных двигателей по характеристикам собственного электромагнитного поля продуктов сгорания. *Теплофизика высоких температур*, 2017, № 5, с. 828–845.
5. **Козырев Г. И., Хамагов А. А., Лоскутов А. И., Клыков В. А.** Диагностирование бортовой аппаратуры космических аппаратов на основе нечеткой логики. *Нечеткие системы и мягкие вычисления*, 2018, № 2, с. 126–146. doi:10.26456/fssc43
6. **Prakash O., Samantaray A. K., Bhattacharyya R.** Model-based diagnosis of multiple faults in hybrid dynamical systems with dynamically updated parameters. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, no. 6, pp. 1053–1072. doi:10.1109/TSMC.2017.2710143
7. **Gautam S., Tamboli P. K., Patankar V. H., Roy K., Duttagupta S. P.** Sensors incipient fault detection and isolation using Kalman filter and Kullback — Leibler divergence. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, no. 5, pp. 782–794. doi:10.1109/TNS.2019.2907753
8. **Su J., Chen W.** Model-based fault diagnosis system verification using reachability analysis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, no. 4, pp. 742–751. doi:10.1109/TSMC.2017.2710132
9. **Jeong H., Park B., Park S., Min H., Lee S.** Fault detection and identification method using observer-based residuals. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, vol. 184, pp. 27–40. doi:10.1016/j.res.2018.02.007
10. **Zarch M. G., Puig V., Poshtan J., Shoorehdeli M. A.** Fault detection and isolation using viability theory and interval observers. *International Journal of Systems Science*, 2018, no. 7, pp. 1445–1462. doi:10.1080/00207721.2018.1454536
11. **Lan J., Patton R. J.** A new strategy for integration of fault estimation within fault-tolerant control. *Automatica*, 2016, vol. 69, pp. 48–59. doi:10.1016/j.automatica.2016.02.014
12. **Zhang Z., Li S., Yan H., Fan Q.** Sliding mode switching observer-based actuator fault detection and isolation for a class of uncertain systems. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2019, vol. 33, pp. 322–335. doi:10.1016/j.nahs.2019.04.001
13. **Li J., Pan K., Zhang D., Su Q.** Robust fault detection and estimation observer design for switched systems. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2019, vol. 34, pp. 30–42. doi:10.1016/j.nahs.2019.05.001
14. **Åslund J., Frisk E., Jung D.** Asymptotic behavior of a fault diagnosis performance measure for linear systems. *Automatica*, 2019, vol. 106, pp. 143–149. doi:10.1016/j.automatica.2019.04.041
15. **Kammammettu S., Li Z.** Change point and fault detection using Kantorovich distance. *Journal of Process Control*, 2019, vol. 80, pp. 41–59. doi:10.1016/j.jprocont.2019.05.012
16. **Saucedo-Dorantes J. J., Delgado-Prieto M., Romero-Troncoso R. D. J., Osornio-Rios R. A.** Multiple-fault detection and identification scheme based on hierarchical self-organizing maps applied to an electric machine. *Applied Soft Computing Journal*, 2019, vol. 81. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105497> (дата обращения: 24.06.2019). doi:10.1016/j.asoc.2019.105497
17. **Hatem N. R. B., Mostefai M., El Kheir Aktouf O.** Extended Kalman observer based sensor fault detection. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 1546–1552. doi:10.11591/ijece.v9i3.pp1546-1552
18. **Han H., Cui X., Fan Y., Qing H.** Least squares support vector machine (LS-SVM)-based chiller fault diagnosis using fault indicative features. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 154, pp. 540–547. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.03.111
19. **Бритов Г. С.** Терминальное диагностирование динамических систем. *Информационно-управляющие системы*, 2017, № 4, с. 18–24. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.18
20. **Schreiber H. H.** Fault dictionary based upon stimulus design. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1979, vol. CAS-26, no. 7, pp. 529–537.
21. **Мироновский Л. А.** Диагностирование линейных систем методом комплементарного сигнала. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, 2002, № 5, с. 52–57.

UDC 681.518.5

doi:10.31799/1684-8853-2019-6-12-21

**Fault detection optimization for controllable dynamic systems**L. A. Mironovsky<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-3584-7095T. N. Solov'eva<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-6371-8373, al2tn@yandex.ruD. V. Shintyakov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-7950-0694<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** When diagnosing the deviations of controllable dynamic system parameters, it is convenient in terms of control simplicity to apply the Schreiber method which uses a set of rectangular pulses of equal duration as a test signal. Since for a single object you can construct many test signals which differ in the number of pulses, the problem arises how to minimize the number of test pulses when using the Schreiber method. **Purpose:** Simplification of test control and diagnostics of linear controllable dynamic systems. **Results:** It has been shown that a set of test pulse amplitude vectors is a kernel of the controllability matrix of a discrete analogue of the object under test. The problem is formulated of finding the optimal length of a test pulse in order to minimize the number of pulses in the test signal. For a given pulse length, the pulse amplitudes of an optimal test signal are equal to the coefficients of the control vector minimal polynomial for the discrete analog of the object relative to its system matrix. The number of test pulses can be reduced by choosing the pulse duration calculated from the imaginary component of the object poles. In particular, if an object has at least one pair of complex-conjugate poles, the number of test pulses does not at least exceed the order of the object. An algorithm has been developed for calculating a test signal for linear controllable object FDI by the Schreiber method. The input to the algorithm is the system matrix of the object, and the output is the length of the test pulse and the pulse amplitude vector. The efficiency of the algorithm is illustrated by FDI for two technical objects. **Practical relevance:** The results of the study can be applied to static parameter FDI of controllable dynamical objects which allow a linear description in their state space.

**Keywords** — FDI, control, diagnostics, Schreiber method, complementary signal, minimal polynomial, optimization.

**For citation:** Mironovsky L. A., Solov'eva T. N., Shintyakov D. V. Fault detection optimization for controllable dynamic systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 12–21 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-12-21

**References**

- Maltsev G. N., Nazarov A. V., Yakimov V. L. Simulation modeling of diagnostics of a highly autonomous complex technical system. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 4, pp. 34–43 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.34
- Zhurabok A. N., Shumsky A. E., Pavlov S. V. Diagnosis of linear dynamic systems by the nonparametric method. *Automation and Remote Control*, 2017, no. 7, pp. 1173–1188 (In Russian). doi:10.1134/S0005117917070013
- Aksenova G. P. Localization of multiple faults with group control on a discrete device. *Automation and Remote Control*, 2017, no. 12, pp. 2193–2202 (In Russian). doi:10.1134/S0005117917120074
- Yagodnikov D. A., Rudinskii A. V. Diagnostics of rocket and jet engines through characteristics of the intrinsic electromagnetic field of combustion products. *High Temperature*, 2017, no. 5, pp. 808–824 (In Russian). doi:10.1134/S0018151X17050200
- Kozyrev G. I., Khamatov A. A., Klykov V. A., Loskutov A. I. Diagnostics on-Board equipment of spacecrafts on the basis of fuzzy logic. *Fuzzy Systems and Soft Computing*, 2018, no. 2, pp. 126–146 (In Russian). doi:10.26456/fssc43
- Prakash O., Samantaray A. K., Bhattacharyya R. Model-based diagnosis of multiple faults in hybrid dynamical systems with dynamically updated parameters. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, no. 6, pp. 1053–1072. doi:10.1109/TSMC.2017.2710143
- Gautam S., Tamboli P. K., Patankar V. H., Roy K., Duttagupta S. P. Sensors incipient fault detection and isolation using Kalman filter and Kullback — Leibler divergence. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, no. 5, pp. 782–794. doi:10.1109/TNS.2019.2907753
- Su J., Chen W. Model-based fault diagnosis system verification using reachability analysis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, no. 4, pp. 742–751. doi:10.1109/TSMC.2017.2710132
- Jeong H., Park B., Park S., Min H., Lee S. Fault detection and identification method using observer-based residuals. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, vol. 184, pp. 27–40. doi:10.1016/j.ress.2018.02.007
- Zarch M. G., Puig V., Poshtan J., Shoorehdeli M. A. Fault detection and isolation using viability theory and interval observers. *International Journal of Systems Science*, 2018, no. 7, pp. 1445–1462. doi:10.1080/00207721.2018.1454536
- Lan J., Patton R. J. A new strategy for integration of fault estimation within fault-tolerant control. *Automatica*, 2016, vol. 69, pp. 48–59. doi:10.1016/j.automatica.2016.02.014
- Zhang Z., Li S., Yan H., Fan Q. Sliding mode switching observer-based actuator fault detection and isolation for a class of uncertain systems. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2019, vol. 33, pp. 322–335. doi:10.1016/j.nahs.2019.04.001
- Li J., Pan K., Zhang D., Su Q. Robust fault detection and estimation observer design for switched systems. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2019, vol. 34, pp. 30–42. doi:10.1016/j.nahs.2019.05.001
- Åslund J., Frisk E., Jung D. Asymptotic behavior of a fault diagnosis performance measure for linear systems. *Automatica*, 2019, vol. 106, pp. 143–149. doi:10.1016/j.automatica.2019.04.041
- Kammammettu S., Li Z. Change point and fault detection using Kantorovich distance. *Journal of Process Control*, 2019, vol. 80, pp. 41–59. doi:10.1016/j.jprocont.2019.05.012
- Saucedo-Dorantes J. J., Delgado-Prieto M., Romero-Troncoso R. D. J., Osornio-Rios R. A. Multiple-fault detection and identification scheme based on hierarchical self-organizing maps applied to an electric machine. *Applied Soft Computing Journal*, 2019, vol. 81. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105497> (accessed 24 June 2019). doi:10.1016/j.asoc.2019.105497
- Hatem N. R. B., Mostefai M., El Kheir Aktouf O. Extended Kalman observer based sensor fault detection. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2019, vol. 9, no. 3, pp. 1546–1552. doi:10.11591/ijece.v9i3.pp1546-1552
- Han H., Cui X., Fan Y., Qing H. Least squares support vector machine (LS-SVM)-based chiller fault diagnosis using fault indicative features. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 154, pp. 540–547. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.03.111
- Britov G. S. Terminal diagnostics of discrete dynamical systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 4, pp. 18–24 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.18
- Schreiber H. H. Fault dictionary based upon stimulus design. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1979, vol. CAS-26, no. 7, pp. 529–537.
- Mironovsky L. A. FDI of linear systems using the complementary signal method. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2002, no. 5, pp. 52–57 (In Russian).

## Имитационная модель обработки радиолокационной информации в сети радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех

А. В. Паршуткин<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-7535-4880](https://orcid.org/0000-0001-7535-4880)

Д. В. Левин<sup>а</sup>, канд. техн. наук, преподаватель, [orcid.org/0000-0002-3480-087X](mailto:dm.181@yandex.ru), [dm.181@yandex.ru](mailto:dm.181@yandex.ru)

А. В. Галандзовский<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший преподаватель, [orcid.org/0000-0002-2648-458X](https://orcid.org/0000-0002-2648-458X)

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

**Постановка проблемы:** радиолокационные станции при слежении за целями в сложной помеховой обстановке формируют не только отметки целей, но и ложные отметки. Хорошо развитая теория и техника обеспечения помехоустойчивости оказываются малоприменимыми в условиях сигналоподобных помех, образованных в результате переотражений, многолучевого распространения или ретрансляции зондирующих сигналов. Повышение достоверности обработки радиолокационной информации в условиях сигналоподобных помех может быть достигнуто путем совместной обработки данных нескольких разнесенных постов в сети радиолокационных станций. **Цель:** разработка имитационной модели, позволяющей оценивать результативность селекции целей по пространственному разнесу ее измеренных положений при совместной обработке радиолокационной информации, получаемой от двух разнесенных радиолокационных станций. **Результаты:** реализован принцип совместной обработки радиолокационной информации для селекции целей в сети радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех, основанный на использовании информации о совпадении измеренных разнесенными радиолокационными станциями координат целей. Разработана имитационная модель для оценивания вероятности селекции целей в условиях сигналоподобных помех при совместной обработке радиолокационной информации от двух радиолокационных станций за счет анализа совпадения измеренных ими координат целей. Получены зависимости вероятности селекции целей от мощности шумовых помех и средней плотности ложных отметок в каналах дальности двух разнесенных радиолокационных станций. **Практическая значимость:** результаты имитационного моделирования демонстрируют возможность повышения дальности обнаружения целей сетью радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех при использовании информации о совпадении измеренных разнесенными радиолокационными станциями координат целей по сравнению с ситуацией применения только сигнальных признаков селекции целей на фоне ложных отметок.

**Ключевые слова** – радиолокационная станция, сигналоподобные помехи, селекция целей, ложные отметки.

**Для цитирования:** Паршуткин А. В., Левин Д. В., Галандзовский А. В. Имитационная модель обработки радиолокационной информации в сети радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 6, с. 22–31. doi:10.31799/1684-8853-2019-6-22-31

**For citation:** Parshutkin A. V., Levin D. V., Galandzovskiy A. V. Simulation model of radar data processing in a station network under signal-like interference. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 22–31 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-22-31

### Введение

В настоящее время основными информационными средствами в наземных системах обзора пространства являются радиолокационные станции (РЛС). Информация о местоположении и параметрах движения радиолокационных целей (РЛЦ) получается путем облучения и приема отраженных от них зондирующих сигналов. В реальных условиях применения РЛС слежение за множеством целей реализуется в условиях наличия естественных шумов и воздействия различных источников помех. При увеличении плотности ложных отметок (ЛО) алгоритмы обработки радиолокационной информации (РЛИ) имеют тенденцию к завязке ложных траекторий [1–4].

В современных РЛС обзора пространства для борьбы с помехами реализуется комплекс мер обеспечения помехозащиты. Основным направ-

лением борьбы с шумовыми помехами является повышение отношения сигнал/шум (ОСШ) на выходе схем накопителей радиолокационных сигналов в приемном тракте РЛС. Для этого увеличивают энергию излучаемых зондирующих сигналов и расширяют интервалы накапливаемых отраженных радиолокационных сигналов, а также применяют методы селекции сигналов на фоне помех, пространственной и спектральной режекции мешающих излучений [4–7]. Сложность защиты от сигналоподобных помех связана с тем, что изменение энергии зондирующего сигнала, его структуры и параметров не позволяет уменьшить воздействие таких помех. Методы селекции сигналов, режекции и компенсации помех при этом также не обеспечивают полное устранение ложных обнаружений [5–8].

Для ослабления воздействия помех может применяться совместная обработка РЛИ от не-



скольких разнесенных РЛС. Такой подход позволяет обеспечить рост достоверности обнаружения целей и повышение помехоустойчивости радиолокационной системы в целом за счет многокурсового наблюдения целей и различного характера воздействия помех на разнесенные РЛС [6, 7]. Поэтому исследования в области совершенствования методов совместной обработки РЛИ в сети РЛС в условиях сигналоподобных помех являются актуальными.

Рассмотренная в статье имитационная модель обработки РЛИ от двух разнесенных РЛС позволяет оценить вероятность селекции целей в области пространства с высокой плотностью ЛО, обусловленных наличием сигналоподобных помех. В основе разработки имитационной модели заложена возможность проведения многократных статистических испытаний измерения координат целей, наблюдаемых парой разнесенных РЛС, с учетом потенциальных точностей измерений каждой РЛС векторов положения и скорости целей, а также совместной обработки синхронизированных единичных результатов измерений, приведенных в единую систему координат.

### Принцип совместной обработки РЛИ в сети РЛС для селекции целей в условиях сигналоподобных помех

Рассмотрим ситуацию, в которой цель, движущаяся по некоторой траектории, одновременно наблюдается несколькими разнесенными РЛС, объединенными в единую информационную сеть. Такая радиолокационная система подразумевает наличие центра обработки РЛИ и линий связи с каждой отдельной РЛС. Для обеспечения совместной когерентной обработки сигналов и помех каналы связи радиолокационной системы должны позволять передавать потоки данных описания широкополосных отраженных сигналов большого объема [3, 6, 7], что затрудняет техническую реализацию данного подхода к совместной обработке РЛИ от нескольких РЛС. Другим подходом к совместной обработке РЛИ от нескольких РЛС, рассматриваемым в настоящей работе, является объединение только результатов одиночных радиолокационных измерений параметров положения и движения целей, для чего достаточно линий связи с малой пропускной способностью [3, 6, 7].

Пусть на вход приемного устройства каждой РЛС поступает смесь шумовых и сигналоподобных помех. При этом появляются сигналоподобные помехи в различных элементах разрешения РЛС. Результатом такого воздействия является отсутствие интерференционных наложений сигналоподобных помех и резкое увеличение коли-

чества ЛО в канале дальности РЛС, учитываемых при обработке РЛИ. Пусть территориальный и частотный разнос РЛС обеспечивает различие проявлений помех для различных РЛС. Наличие перекрытия зон обзора в сети РЛС позволяет реализовать совместную обработку РЛИ о РЛЦ, наблюдаемых с различных ракурсов. Оба фактора способствуют повышению достоверности селекции целей на фоне помех.

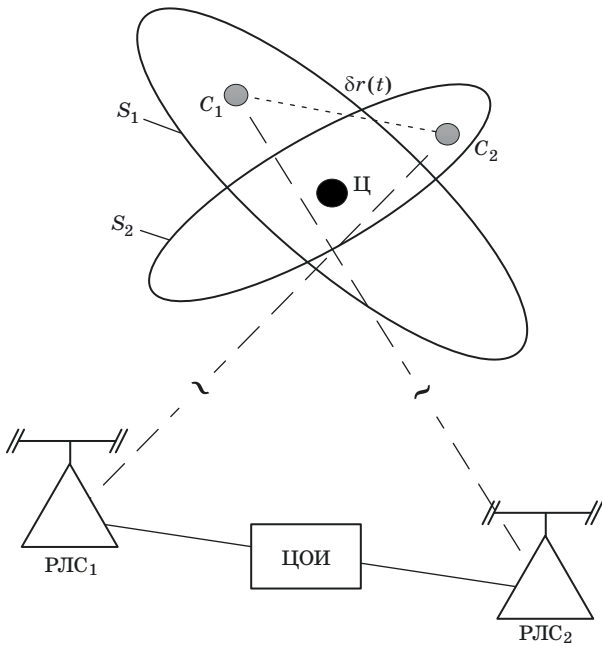
В результате радиолокационных измерений местоположения цели в каждой  $i$ -й РЛС формируется вектор состояния  $\mathbf{R}_i = \langle R(t), \alpha(t), \beta(t), V_R(t), V_\alpha(t), V_\beta(t) \rangle$ , где  $R(t), \alpha(t), \beta(t)$  — наклонная дальность от РЛС до цели, угол азимута и угол места в топоцентрической системе координат РЛС;  $V_R(t), V_\alpha(t), V_\beta(t)$  — составляющие вектора скорости по каждой координате.

В процессе радиолокационного наблюдения за движущимися целями возникает эффект Доплера, отражающий изменение в динамике составляющих вектора скорости. Поскольку при наблюдении целей в условиях сигналоподобных помех истинная цель и ЛО имеют соразмерные скорости, то наиболее информативной для селекции будет являться координатная информация о местоположении всех наблюдаемых целей [2–4].

Возможность объединения информации о целях в сети РЛС позволяет увеличить количество признаков их селекции на фоне помех, в частности за счет многокурсового наблюдения целей [3, 6, 7, 9–13]. По результатам выполненных радиолокационных измерений местоположения целей совместная обработка информации проводится в ЦОИ — центре обработки информации, находящемся или в одной из задействованных РЛС, или в вынесенной точке. При этом на первом этапе совместной обработки РЛИ выполняются операции группирования и отождествления отметок, полученных разнесенными РЛС. Группируются те отметки, которые находятся в соизмеримых областях пространства с размерами области неопределенности одиночных измерений РЛС, обусловленных собственными шумами и внешними помехами.

При группировании отметок с координатами, измеренными относительно точек стояния РЛС, после пересчета в единую систему координат появляется возможность сравнения измеренных координат целей по величине  $\delta r(t)$ , характеризующей разнос между измерениями, отнесенными к одной цели, т. е. расстояние между  $C_1$  и  $C_2$  (рис. 1). Оценка параметра  $\delta r(t)$  может использоваться в качестве признака селекции целей на фоне ЛО [3, 6, 7].

Точками  $C_1$  и  $C_2$  на рис. 1 показаны измеренные РЛС<sub>1</sub> и РЛС<sub>2</sub> положения цели, находящейся в точке Ц. Области пространства  $S_1$  и  $S_2$  — обла-



■ **Рис. 1.** Оценка положения цели, наблюдаемой парой разнесенных РЛС  
 ■ **Fig. 1.** Assessment of radar target position observed by two spaced radar stations

сти возможных измеренных положений цели по результатам одиночных радиолокационных измерений для РЛС<sub>1</sub> и РЛС<sub>2</sub>. Размеры областей S<sub>1</sub> и S<sub>2</sub> обусловлены собственными внутренними шумами РЛС и внешними аддитивными помехами.

Для вычисления расстояния  $\delta r(t)$  рассмотрим порядок измерения местоположения целей и будем считать, что текущие значения наклонной дальности от РЛС до цели  $R(t)$ , а также углы азимута  $\alpha(t)$  и углы места  $\beta(t)$  определяются в соответствии со следующими выражениями [2, 3]:

$$\begin{aligned} R(t) &= R_{\text{ц}}(t) + \xi_R(t); \\ \alpha(t) &= \alpha_{\text{ц}}(t) + \xi_{\alpha}(t); \\ \beta(t) &= \beta_{\text{ц}}(t) + \xi_{\beta}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R_{\text{ц}}(t)$ ,  $\alpha_{\text{ц}}(t)$ ,  $\beta_{\text{ц}}(t)$  — истинные значения наклонной дальности до цели и углы азимута и места;  $\xi_R(t)$ ,  $\xi_{\alpha}(t)$ ,  $\xi_{\beta}(t)$  — ошибки измерений соответствующих координат. Также предполагается, что в каждой РЛС случайные ошибки измерений дальности  $\xi_R(t)$ , угла азимута  $\xi_{\alpha}(t)$  и угла места  $\xi_{\beta}(t)$  независимы между собой и распределены по нормальному закону с нулевыми средними и  $(\sigma_R, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta})$  среднеквадратическими ошибками (СКО).

Для синхронизации измерений, выполняемых разнесенными РЛС, по результатам  $m$  измерений сферических координат целей  $R(t)$ ,  $\alpha(t)$  и  $\beta(t)$ , проводимых в пределах интервала време-

ни  $T_m$ , по методу наименьших квадратов формируются единичные измерения  $(\tilde{R}, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta})$  [2, 3]. Момент времени  $t'$ , на который пересчитываются  $(\tilde{R}, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta})$ , задается из условия  $t' < T_m$ .

После синхронизации измерений координаты целей, наблюдаемых каждой РЛС, для дальнейшей обработки преобразуются в единую систему координат (в геоцентрическую систему координат) по формуле

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{D}_{\text{РЛС}} \begin{bmatrix} \tilde{R} \cdot \sin(\tilde{\beta}) \cdot \cos(\tilde{\alpha}) \\ \tilde{R} \cdot \sin(\tilde{\beta}) \cdot \sin(\tilde{\alpha}) \\ \tilde{R} \cdot \cos(\tilde{\beta}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{РЛС}}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{D}_{\text{РЛС}}$  — матрица перевода в топоцентрическую систему координат РЛС;  $(X, Y, Z)_{\text{РЛС}}$  — координаты местоположения РЛС в геоцентрической системе координат.

Значение величины  $\delta r$  определяется по формуле

$$\delta r = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}, \quad (3)$$

где  $(X_1, Y_1, Z_1)$  и  $(X_2, Y_2, Z_2)$  — приведенные к единому моменту времени координаты целей, измеренные РЛС<sub>1</sub> и РЛС<sub>2</sub> соответственно.

Значения  $(\sigma_R, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta})$  определяются в соответствии с потенциальными точностями измерения одиночных параметров отраженных от цели сигналов, таких как запаздывание и частота [1–4, 7]. Точность измерения угловых координат во многом зависит от ошибок измерения направляющих косинусов и от направления пеленгования. У РЛС с фазированными антенными решетками точность измерения угловых координат убывает при смещении направления пеленгования от нормали к раскрытию. Это происходит из-за возрастания ошибки по углу при постоянной ошибке по направляющему косинусу, а также из-за снижения ОСШ [2, 8]. Потенциальные ошибки измерений траекторных параметров целей  $(\sigma_R, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta})$  характеризуют предельно достижимую точность определения местоположения цели и зависят от ОСШ на выходе согласованного фильтра РЛС  $(q_{\text{с/ш}})_{\text{вых}}$ , ширины спектра зондирующего сигнала РЛС  $\Delta f_{\text{с}}$ , положения цели относительно нормали к раскрытию антенны РЛС  $\nu$  и других.

Потенциальная ошибка измерения дальности  $\sigma_R$  определяется по формуле [4]

$$\sigma_R = \frac{c}{\Delta f_{\text{с}} \sqrt{(q_{\text{с/ш}})_{\text{вых}}}}, \quad (4)$$

где  $c$  — скорость света;  $(q_{\text{с/ш}})_{\text{вых}}$  — ОСШ на выходе схем накопителей радиолокационных сигналов в приемном тракте РЛС:

$$(q_{\text{с/ш}})_{\text{вых}} = (P_{\text{с}} / P_{\text{п}})_{\text{вх}} \cdot B. \quad (5)$$

Здесь  $(P_c / P_{\Pi})_{\text{вх}}$  — ОСШ по мощности в точке приема отраженного от цели зондирующего сигнала РЛС;  $B$  — база сигнала:  $B = \Delta f_c \tau_{\text{и}}$ , где  $\tau_{\text{и}}$  — длительность импульса.

С учетом выражений (4) и (5) формула для расчета СКО измерения дальности  $\sigma_R$  принимает вид [4]

$$\sigma_R = \frac{c}{\sqrt{(P_c / P_{\Pi})_{\text{вх}} \cdot \Delta f_c^3 \tau_{\text{и}}}}. \quad (6)$$

Среднеквадратическая ошибка измерения угловых координат  $\sigma_{\alpha, \beta}$  определяется по формуле

$$\sigma_{\alpha, \beta} = \frac{k_{\text{ДН}} \theta_{0,5}}{\sqrt{(q_{\text{с/ш}})_{\text{вых}}}}, \quad (7)$$

где  $k_{\text{ДН}}$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от формы диаграммы направленности (ДН) антенны и способа измерения угловых координат (при измерении угловых координат методом парциальных диаграмм  $k_{\text{ДН}} = 0,6 \dots 1$ );  $\theta_{0,5}$  — ширина приемной ДН РЛС по уровню половинной мощности в горизонтальной и угломестной плоскостях, град [4].

Для фазированной антенной решетки ширина приемной ДН по уровню половинной мощности определяется по формуле [8]

$$\theta_{0,5} = 2 \arcsin \left( \frac{0,45\lambda}{L_{x,y}} \right), \quad (8)$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $L_{x,y}$  — геометрические размеры антенны в горизонтальной (вертикальной) плоскости (длина, ширина).

При отклонении вектора положения цели от вектора нормали эффективный размер апертуры антенны фазированной антенной решетки, участвующей в приеме отраженного от цели зондирующего сигнала, определяется по формуле [1–3]

$$L_{\alpha, x,y} = L_{x,y} \cos(\nu). \quad (9)$$

При увеличении угла отклонения цели от нормали  $\nu$  уменьшается эффективная площадь приема зондирующего сигнала. Поэтому чем больше эффективная поверхность антенны фазированной антенной решетки, тем меньше величина СКО на выходе оптимального фильтра. С учетом выражений (5), (7)–(9) формула расчета СКО угловых координат принимает вид

$$\sigma_{\alpha, \beta} = 2 \arcsin \left( \frac{0,45\lambda}{L_{x,y} \cdot \cos(\nu)} \right) \frac{k_{\text{ДН}}}{\sqrt{(P_c / P_{\Pi})_{\text{вх}} \cdot \Delta f_c^3 \tau_{\text{и}}}}. \quad (10)$$

Критерием принятия решения об истинности наблюдаемой цели является превышение величины  $\delta r(t)$  над пороговым значением  $\mu_{\text{обн}}$ . Для заданных условий радиолокационного наблюдения

(т. е. с учетом положения цели относительно места стояния РЛС и раскрытия ее антенны, ОСШ на выходе приемного устройства РЛС и др.) значение порога селекции  $\mu_{\text{обн}}$  задается на основе критерия Неймана — Пирсона [7, 8].

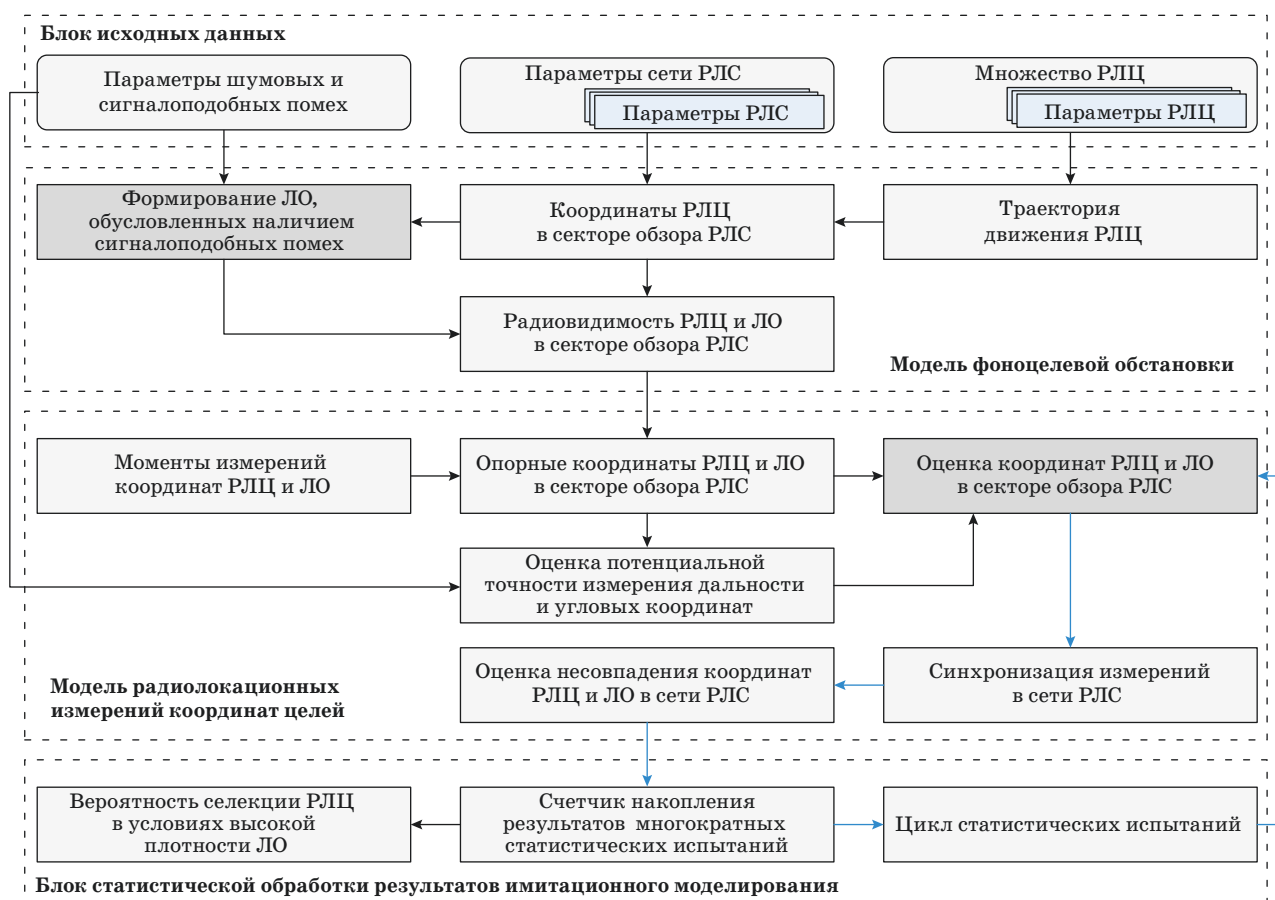
### Структура имитационной модели оценивания пространственного положения РЛЦ в условиях сигналоподобных помех

Для оценивания возможностей РЛС обзора пространства по селекции целей в различных условиях радиоэлектронного наблюдения разработана имитационная модель (рис. 2).

В блоке исходных данных задаются пространственные, энергетические и сигнальные характеристики РЛС, РЛЦ, а также шумовых и сигналоподобных помех. Под пространственными характеристиками РЛС понимаются данные о месте размещения РЛС, размер и ориентация лоцируемой области пространства. Местоположение РЛС задается географическими координатами (широтой  $\varphi_{\text{РЛС}}$  и долготой  $\theta_{\text{РЛС}}$ ). Зона обзора РЛС определяется шириной сектора пространства в азимутальной и угломерной плоскостях. Ориентация сектора обзора пространства относительно северного направления задается углом поворота нормали к раскрытию антенны РЛС в азимутальной плоскости [1–3].

Под энергетическими параметрами РЛС понимаются данные о средней мощности излучения зондирующих сигналов  $P_c$ , коэффициент усиления приемной и передающей антенн РЛС. В качестве сигнальных характеристик РЛС используются данные о несущей частоте излучения  $f_c$ , ширине спектра зондирующих сигналов  $\Delta f_c$ , длительности импульсов  $\tau_{\text{и}}$  и т. д. Пространственными параметрами РЛЦ являются координаты ее траектории полета и количество объектов  $N_{\text{ц}}$ , наблюдаемых РЛС в зоне обзора. Задаваемым параметром РЛЦ является среднее значение эффективной поверхности рассеяния  $\sigma_{\text{ц}}$ .

В модели фоновой обстановки задаются траектории движения РЛЦ множеством прямоугольных координат в геоцентрической системе координат для рассматриваемого интервала времени. Затем отбираются координаты траектории полета РЛЦ, попадающие в зону обзора РЛС. Для этих координат по величине отношения мощности отраженного сигнала и суммарной мощности помех и внутренних шумов на выходе схем накопителей радиолокационных сигналов приемного тракта РЛС при заданной вероятности ложной тревоги выбираются те координаты, которые удовлетворяют условию радиовидимости целей в зоне обзора РЛС. Далее для РЛЦ, обнаруживаемых с требуемым качеством, и ЛЮ, обусловлен-



■ **Рис. 2.** Структура имитационной модели оценивания вероятности селекции целей в условиях сигналоподобных помех

■ **Fig. 2.** Structure of simulation model estimation of selection probability of radar targets under conditions of signal-like interference

ных наличием сигналоподобных помех, задаются их опорные координаты.

Учитывая режимы функционирования РЛС и параметры излучения зондирующих сигналов, в модели задаются моменты времени, на которые методом экстраполяции уточняются опорные координаты РЛЦ и ЛО [11–13]. На выходе модели фоноцелевой обстановки РЛЦ и ЛО представляются наборами координат в сферических системах координат всех участвующих в измерениях РЛС.

В модели радиолокационных измерений на основе данных о параметрах РЛС, положения целей в зоне обзора РЛС, условий радиолокационного наблюдения и параметров шумовых помех задаются оценки потенциальных точностей измерения сферических координат, т. е. СКО измерения дальности и угловых координат. Суммирование опорных дальностей и угловых координат целей со случайными реализациями ошибок измерений образуют оценки координат целей в секторе обзора РЛС. Для обеспечения совместной обработки результатов радиолокационных измерений

в сети РЛС все измерения синхронизируются путем пересчета измеренных координат целей, наблюдаемых разнесенными РЛС, на фиксированные моменты времени [11–16]. Далее проводится анализ совпадения измеренных координат целей в сети РЛС и сравнение величины несовпадения с пороговым значением.

После завершения одиночных измерений проводится изменение случайных ошибок измерений дальности и угловых координат наблюдаемых РЛЦ и ЛО. Для оценки статистических характеристик селекции целей в условиях сигналоподобных помех в модели реализован цикл многократных радиолокационных измерений. В блоке статистической обработки результатов имитационного моделирования определяется количество верно принятых решений об истинности целей, наблюдаемых сетью РЛС, и в графическом виде представляется зависимость изменения вероятности селекции целей на фоне ЛО от расстояния.

В основном шумовые помехи проявляются в виде мешающих сигналов, не коррелирован-

ных с зондирующими сигналами РЛС, и образуют в приемном тракте РЛС аддитивную смесь с напряжением принимаемого сигнала. Сигналоподобные помехи образуются, как правило, путем многократных переотражений зондирующих сигналов на неоднородностях рассеяния радиоволн в окружающей среде или в результате применения систем ретрансляции. При этом искажается фронт распространения радиоволны, а в точке приема возникает сложная интерференционная картина замираний, когда напряженность поля зависит от несущей частоты сигнала, времени и вектора координат точки приема [5, 17–20]. Поэтому задаваемыми параметрами шумовых помех являются средняя мощность их излучения  $P_{\Pi}$  и ширина спектра помехи  $\Delta f_{\Pi}$ . Сигналоподобные помехи в  $i$ -й РЛС описываются плотностью  $\rho_i$  размещения ЛО и общим количеством ЛО  $N_{ЛО i}$ .

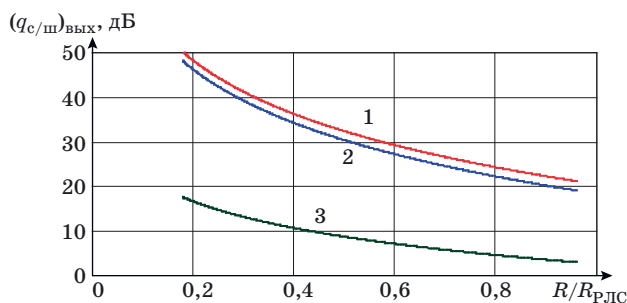
Для построения траектории движения целей на основе данных о траектории полета и данных о количестве ЛО  $N_{ЛО i}$ , обусловленных наличием сигналоподобных помех, рассчитывается трехмерный массив координат для  $i$ -й РЛС  $(\tilde{X}_{i n}, \tilde{Y}_{i n}, \tilde{Z}_{i n})$ , где  $i = 1, 2, n \in [0, N]$ ,  $N_i = N_{\Sigma} + N_{ЛО i}$ .

При обнаружении целей в зоне обзора РЛС проводится оценивание отношения мощности полезного сигнала к аддитивной смеси внешних помех и внутренних шумов приемника  $P_{\Sigma\Pi}$  и проверяется возможность обнаружения целей при использовании в РЛС оптимального к воздействию белого гауссова шума приемного устройства [5, 18, 19]. Применение такого подхода возможно при соблюдении условия обнаружения целей, т. е. в условиях неподавления РЛС шумовыми помехами. Значения отношения сигнал/помеха влияют на точность радиолокационных измерений, которые в имитационной модели учитываются именно как результаты измерений, т. е. как данные с выхода радиолокационного измерителя. Величина ОСШ учитывается при определении потенциальных ошибок измерений координат целей.

Имитационное моделирование измерения координат целей  $(\tilde{X}_{i n}, \tilde{Y}_{i n}, \tilde{Z}_{i n})$  на фоне шумовых помех направлено на формирование нормально распределенных случайных ошибок измерений  $(\xi_R, \xi_{\alpha}, \xi_{\beta})$ , возникающих в угловых каналах и канале дальности РЛС, имеющих нулевое математическое ожидание и СКО  $(\sigma_R, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta})$ .

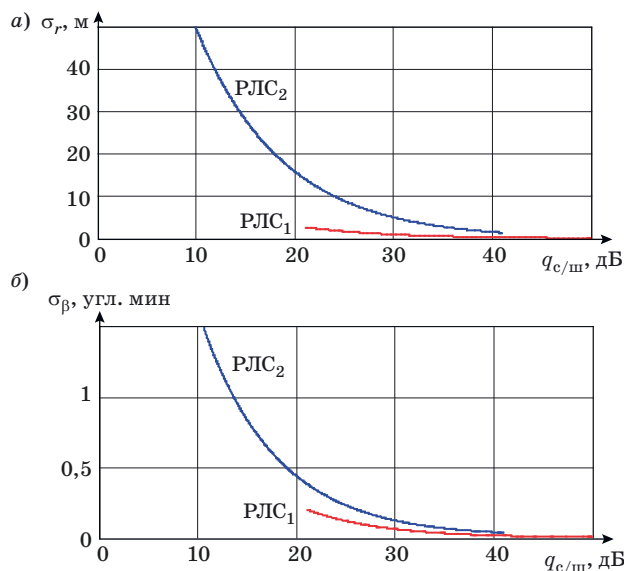
При увеличении интенсивности воздействия на РЛС шумовых помех для фиксируемого значения  $R / R_{РЛС}$  происходит снижение ОСШ  $(q_{с/ш})_{\text{ВЫХ}}$  по мощности на выходе приемного устройства (рис. 3).

В пределах одного цикла измерений для каждой РЛС вычисляется отношение мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех



■ **Рис. 3.** Изменение ОСШ по мощности при функционировании РЛС на фоне внутренних тепловых шумов 1, при воздействии шумовых помех по боковым 2 и по основному 3 лепесткам приемной ДН РЛС

■ **Fig. 3.** Change signal/noise of power ratio during radar operation against the background of internal thermal noise 1 and under influence of noise interference on side 2 and main 3 lobes of receiving radar radiation pattern



■ **Рис. 4.** Изменение точности измерения дальности (а) и угловых координат цели (б) при штатном функционировании РЛС

■ **Fig. 4.** Changing accuracy of measuring range (а) and angular coordinates target (б) in normal operation radar station

$(q_{с/ш})_{\text{ВЫХ}}$  на выходе приемного устройства РЛС и уточняются оценки СКО измерения сферических координат, как это показано на рис. 4.

Величина  $\delta r$  при проведении многократных статистических испытаний рассчитывается в каждом отдельном цикле работы имитационной модели. Причем случайные ошибки измерений дальности и угловых координат изменяются для каждого статистического испытания в зависимости от СКО измерения координат  $(\sigma_R, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta})$ , рассчитанных для данных условий радиолокационного наблюдения.

### Результаты имитационного моделирования селекции по пространственному разнесу измеренных положений целей

Несмотря на протяженные зоны обзора современных сетей РЛС, трех и более кратное пересечение зон видимости отдельных станций встречается довольно редко. При наличии многократных пересечений зон обзора всегда могут быть выбраны одна или несколько наиболее информативных пар РЛС [6], поэтому в процессе имитационного моделирования рассматривается только пара разнесенных РЛС из состава сети.

Решение задачи селекции целей в условиях воздействия на РЛС сигналоподобных помех зависит от многих факторов. При моделировании были фиксированы такие характеристики, как взаимное положение двух разнесенных РЛС и ракурс наблюдения цели. Исследовалась зависимость результативности селекции целей от интенсивности воздействия шумовых помех, количества  $N_{\text{ЛО } i}$  и средней плотности ЛО, обусловленных наличием сигналоподобных помех. Для оценивания вероятности селекции целей  $P_{\text{сел}}$  в условиях сигналоподобных помех на основе совместной обработки результатов радиолокационных измерений двух разнесенных РЛС рассматривалась следующая ситуация.

В зоне совместного действия двух разнесенных РЛС находится одна РЛЦ. На каждую РЛС воздействуют шумовые маскирующие и сигналоподобные помехи. Шумовые маскирующие помехи создаются в диапазоне рабочих частот РЛС и воздействуют на приемные устройства РЛС как по основному, так и по боковым лепесткам ДН. Под моделью шумовой маскирующей помехи понимается ограниченный в пределах полосы пропускания приемника РЛС белый гауссов шум [5, 17, 20]. Воздействие на РЛС сигналоподобных помех приводит к образованию множества ЛО. Увеличение плотности ЛО приводит к завязке множества ложных траекторий [5, 9, 20]. Описание помех, образованных в результате многократной ретрансляции зондирующих сигналов РЛС, задавалось плотностью ЛО в наблюдаемой области пространства. При этом число ЛО соответствует количеству каналов ретрансляции. В зоне образования сигналоподобных помех ЛО формируются с равномерным законом распределения по дальности.

Оценивание вероятности селекции целей проводится путем многократных статистических испытаний. При этом использовались следующие допущения.

Во-первых, от испытания к испытанию измеренное положение РЛЦ изменяется исходя из того, что ошибки измерений в канале дальности и угловых каналах распределены по нормальному

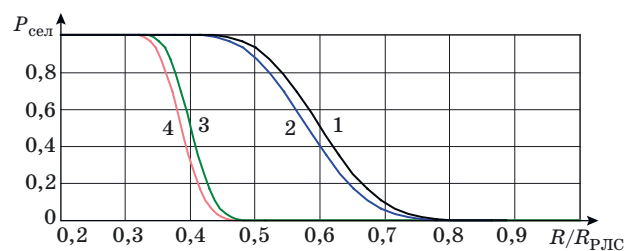
закону с нулевым математическим ожиданием и СКО, зависящей от величины отношения мощности принятого сигнала к суммарной мощности внутренних шумов и внешних шумовых помех  $P_{\Sigma\text{п}}$  на выходе приемного устройства РЛС.

Во-вторых, ЛО распределены в пределах наблюдаемой области пространства по равномерному закону. В рамках одного цикла испытаний положение ЛО, обусловленных наличием сигналоподобных помех, остается неизменным или движется прямолинейно в случайном направлении.

В условиях шумовых помех  $P_{\Sigma\text{п}}$ , уровень которых на выходе согласованного фильтра РЛС значительно превышает по мощности уровень внутренних шумов приемника  $P_{\text{ш}}$ , дальность действия РЛС  $R_{\text{РЛС}}$  обзора пространства снижается (рис. 5).

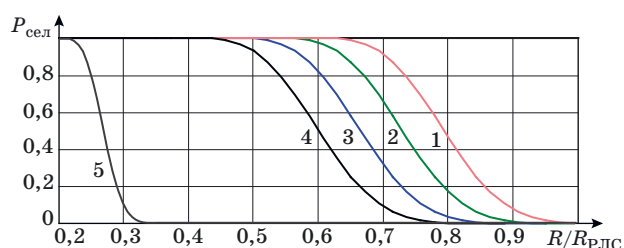
График 1 показывает изменение вероятности селекции цели со сниженной эффективной поверхностью рассеяния  $\sigma_{\text{ц}}$  по сравнению с эффективной поверхностью рассеяния эталонного объекта наблюдения  $\sigma_{\text{ц}}^*$ . Паспортная дальность действия РЛС  $R_{\text{РЛС}}$  задается при наблюдении цели с эффективной поверхностью рассеяния  $\sigma_{\text{ц}}^*$  [1–4]. Воздействие шумовых помех по боковым лепесткам приемной ДН РЛС (линия 2) приводит к увеличению уровня фонового шума. Поэтому происходит незначительное снижение дальности селекции целей на фоне ЛО. В условиях воздействия шумовых помех по основному лепестку приемной ДН РЛС (линия 3) даже в условиях реализации методов защиты и компенсации помех происходит резкое снижение дальности действия РЛС. Изменение вероятности селекции целей в условиях шумовых маскирующих помех, воздействующих по основному и боковым лепесткам ДН, представлено графиком 4.

При совместном воздействии шумовых маскирующих и сигналоподобных помех задача селекции целей будет усложняться резким ухудшением фоноцелевой обстановки [10–12, 15, 16], т. е. количество целей, обнаруживаемых с требуемым качеством функционирования РЛС, будет значи-



■ **Рис. 5.** Изменение вероятности селекции целей на фоне ложных отметок при различных уровнях шумовых помех

■ **Fig. 5.** Changing probability of radar target selection against background of false marks at different noise levels



■ **Рис. 6.** Изменение вероятности селекции целей при различных плотностях ложных отметок и разных методах селекции сигналов на фоне помех

■ **Fig. 6.** Changing probability of radar target selection at different densities of false marks and different methods of signal selection on background of noise

тельно больше по сравнению с физически существующими объектами, находящимися в области пространства, наблюдаемой двумя РЛС.

На рис. 6 представлены графики изменения вероятности селекции целей на фоне ложных отметок для разных значений средней плотности ЛО. Под средней плотностью распределения ЛО в канале дальности РЛС понимается их среднее количество  $N_{ЛО}$ , размещаемое на единицу дальности, выраженную в некотором числе элементов разрешения  $i$ -й РЛС по дальности  $\Delta r_i$ ,  $i = 1, 2$  [3, 5, 7]. При моделировании предполагалось, что средняя плотность ЛО в первой и второй РЛС изменялась кратно величинам  $\rho_{01} = \frac{1}{50\Delta r_1}$  и  $\rho_{02} = \frac{1}{250\Delta r_2}$  для РЛС<sub>1</sub> и РЛС<sub>2</sub> соответственно.

График зависимости 1 получен при отсутствии ЛО, что соответствует наличию только шумовых маскирующих помех и  $\rho_{1,2} = 0$ . Графики 5 и 4 — для  $\rho_{1,2} = \rho_{01,02}$ , причем 5 соответствует реализации в каждой отдельной РЛС селекции по сигнальным признакам. Графики зависимостей 2, 3 и 4 получены при реализации селекции по

расстоянию между измеренными координатами для  $\rho_{1,2} = \rho_{01,02} / 3$ ,  $\rho_{1,2} = \rho_{01,02} / 2$  и  $\rho_{1,2} = \rho_{01,02}$  соответственно. Результаты моделирования показали, что снижение средней плотности ЛО приводит к пропорциональному увеличению дальности обнаружения целей на фоне ЛО.

Таким образом, при воздействии шумовых маскирующих и сигналоподобных помех, существенно снижающих дальность уверенного обнаружения целей в РЛС, задача селекции целей может быть решена с требуемым качеством на больших расстояниях за счет анализа несовпадения измеренных координат целей и ЛО.

### Заключение

Представлено описание имитационной модели совместной обработки РЛИ о целях, наблюдаемых парой разнесенных РЛС из сети РЛС, в условиях шумовых и сигналоподобных помех. Рассмотрены процессы сведения данных о результатах радиолокационных измерений разнесенных РЛС в единую систему координат с единой временной шкалой проводимых измерений, вычисление расстояния между измеренными координатами, отнесенными к одной цели, и последующая селекция целей по величине пространственного разнеса измеренных положений для разных РЛС.

Получены сравнительные оценки результативности селекции целей на фоне ЛО для различных условий наблюдения. Результаты имитационного моделирования демонстрируют возможность повышения дальности обнаружения целей в условиях высокой плотности ЛО по сравнению с ситуацией применения только сигнальных признаков селекции целей за счет использования информации о совпадении измеренных координат целей.

### Литература

1. *Антенны и радары с электронным управлением лучом* / под ред. А. И. Синани и Г. В. Кауфмана. М., Радиотехника, 2016. 234 с.
2. Бакулев П. А. *Радиолокационные системы*. М., Радиотехника, 2015. 440 с.
3. Skolnik M. I. *Radar handbook*. N. Y., McGraw-Hill, 2008. 1351 p.
4. Хансен Р. С. *Фазированные антенные решетки*. М., Техносфера, 2012. 566 с.
5. Куприянов А. И., Перунов Ю. М. *Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка*. М., Вузовская книга, 2016. 190 с.
6. Черняк В. С. *Многопозиционная радиолокация*. М., Радио и связь, 1993. 416 с.

7. Кузьмин С. З. *Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации*. М., Сов. радио, 1974. 432 с.
8. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. *Устройства СВЧ и антенны*. М., Радиотехника, 2016. 608 с.
9. Паршуткин А. В., Левин Д. В., Лоскутов А. И., Дунников А. С. Использование метода селекции целей при работе многопозиционных информационно-измерительных систем. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2015, т. 58, № 7, с. 515–519.
10. Хомяков А. В., Филипченков В. И., Мамон Ю. И. Алгоритмы совместной траекторной обработки в многопозиционном радиолокационном комплексе. *Известия Тульского государственного университета: технические науки*, 2016, № 2, с. 305–314.

11. Лучков Н. В. Анализ объединения данных РЛС, их временная и пространственная привязка. *Автоматизированные системы управления*, 2015, № 1 (39), с. 21–26.
12. Сергунов К. Ю., Грицык П. А. Применение радиолокационных станций для решения задачи селекции сложных активных целей. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2015, № 3, с. 16–22.
13. Сергунов К. Ю. Применение пространственно-разнесенных радиолокационных станций для решения задач селекции. *Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей»*, 2015, № 1, с. 59–64.
14. Азука К. К., Столяров А. А. Моделирование функционирования РЛС дальнего обнаружения диапазона УКВ в условиях воздействия естественных пассивных помех, обусловленных влиянием ионосферы. *Фундаментальные исследования: технические науки*, 2016, № 6, ч. 1, с. 9–13.
15. Chenguang S., Jianjiang Z., Fei W. Adaptive resource management algorithm for target tracking in radar network based on low probability of intercept. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2018, vol. 29, no. 4, pp. 1203–1226.
16. Jarez S., Fioranelli F., Ritchie M., Griffiths H. Multistatic radar classification of armed vs unarmed personnel using neural networks. *Evolving Systems*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 135–144.
17. Великанова Е. П., Рогожников Е. В., Ворошилин Е. П. Обзор методов борьбы с пассивными помехами в радиолокационных системах. *Изв. МГТУ «МАМИ»: естественные науки*, 2014, т. 4, № 3 (21), с. 29–37.
18. Акиншин Н. С., Быстров Р. П., Меньшиков В. Л., Потапов А. А. Особенности и методы повышения помехозащищенности радиоэлектронных средств. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2018, № 2, с. 3–21.
19. Лихачев В. П., Семенов В. В., Веселков А. А. Показатель помехоустойчивости РЛС с синтезированной апертурой антенны к параметрически формируемым помехам, имитирующим точечные объекты. *Антенны*, 2017, № 12 (44), с. 31–37.
20. Бикенин Р. Р., Андрюков А. А. Подавление ответных (ретранслированных) помех при обработке псевдослучайных сигналов с относительной фазовой модуляцией. *Информация и космос*, 2016, № 2, с. 27–32.

UDC 621.396.965

doi:10.31799/1684-8853-2019-6-22-31

### Simulation model of radar data processing in a station network under signal-like interference

A. V. Parshutkin<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-7535-4880

D. V. Levin<sup>a</sup>, PhD, Tech., Lecturer, orcid.org/0000-0002-3480-087X, dm.181@yandex.ru

A. V. Galandzovskiy<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Lecturer, orcid.org/0000-0002-2648-458X

<sup>a</sup>A. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Radar stations, when tracking targets in a complex interference environment, form not only target marks but also false marks. A well-developed theory and technique of noise stability is not useful under signal-like interference caused by re-reflections, multi-path propagation or retransmission of the probing signals. The reliability of radar information processing under signal-like interference can be improved by joint processing of data from several spaced posts in a radar station network. **Purpose:** development of a simulation model which would allow you to estimate the effectiveness of radar target selection by spatial rating of its measured positions, with joint processing of the radar information obtained from two spaced radar stations. **Results:** We have implemented the framework of joint radar data processing for target selection in a radar station network under signal-like interference. The selection is based on using the information about the coincidence of radar target coordinates measured by spaced radar stations. A simulation model is developed to estimate the target selection probability under signal-like interference during the joint processing of data from two spaced radar stations, by analyzing the coincidence of the measured coordinates of the targets. It has been found out how the target selection probability depends on the noise interference power and the average density of false marks in the range channels of two spaced radar stations. **Practical relevance:** The simulation results demonstrate the possibility of increasing the range of radar target detection by network radar stations under signal-like interference, and the efficiency of using the information about coincidence of radar target coordinates measured by spaced radar stations, which is better than using only the signal features of radar target selection on the background of false marks.

**Keywords** — radar station, signal-like interference, radar target selection, false marks.

**For citation:** Parshutkin A. V., Levin D. V., Galandzovskiy A. V. Simulation model of radar data processing in a station network under signal-like interference. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 22–31 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-22-31

### Reference

1. *Antenny i radary s elektronnyim upravleniem luchom* [Antenna systems with electronic beam control]. Eds. A. I. Sinani and G. V. Kaufman. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016. 234 p. (In Russian).
2. Bakulev P. A. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radiolocation systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 440 p. (In Russian).
3. Skolnik M. I. *Radar handbook*. N. Y., McGraw-Hill, 2008. 1351 p.
4. Hansen R. S. *Fazirovannyye anteny i reshetki* [Phased array antennas]. Moscow, Texnosfera Publ., 2012. 566 p. (In Russian).
5. Kupriyanov A. I., Perunov Yu. M. *Radioelektronnaya borba: radiotekhnicheskaya razvedka* [Radioelectronic warfare:



- radioelectronic intelligence]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2016. 190 p. (In Russian).
6. Chernyak V. S. *Mnogopozitsionnaya radiolokaciya* [Multiposition radiolocation]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1993. 416 p. (In Russian).
  7. Kuzmin S. Z. *Osnovy teorii cifrovoy obrabotki radiolokatsionnoy informacii* [Theory fundamentals of digital processing of radar information]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 432 p. (In Russian).
  8. Voskresenskij D. I., Gostyuxin V. L., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. *Ustrojstva SVCh i anteny* [Microwave devices and antennas]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016. 608 p. (In Russian).
  9. Parshutkin A. V., Levin D. V., Loskutov A. I., Dunikov A. S. Application of a target selection method in operation of multiposition information and measuring system. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, vol. 58, no. 7, pp. 515–519 (In Russian).
  10. Khomyakov A. V., Filipchenkov V. I., Mamon Yu. I. Algorithms joint trajectory processing in multiposition radar complex. *Proc. of the TSU*, 2016, no. 2, pp. 305–314 (In Russian).
  11. Luchkov N. V. An analysis of radar data multiplexing, time and spatial bindings. *Automation of Control Processes*, 2015, no. 1 (39), pp. 21–26 (In Russian).
  12. Sergunov K. Yu., Gricik P. A. The use of radar for solving the problem of discrimination complex active decoys. *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*, 2015, no. 3, pp. 16–22 (In Russian).
  13. Sergunov K. Yu. The use of space-spaced radar for solving the problem of selection. *Bulletin of Concern PVO «Almaz-Antey»*, 2015, no. 1, pp. 59–64 (In Russian).
  14. Azuka K. K., Stolyarov A. A. Modeling of functioning of long-range radar VHF under influence of natural clutter caused by the influence of the ionosphere. *Fundamental Research*, 2016, no. 6, ch. 1, pp. 9–13 (In Russian).
  15. Chenguang S., Jianjiang Z., Fei W. Adaptive resource management algorithm for target tracking in radar network based on low probability of intercept. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2018, vol. 29, no. 4, pp. 1203–1226.
  16. Jarez S., Fioranelli F., Ritchie M., Griffiths H. Multistatic radar classification of armed vs unarmed personnel using neural networks. *Evolving Systems*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 135–144.
  17. Velikanova E. P., Rogozhnikov E. V., Voroshilin E. P. Review of methods to combat clutter in radar systems. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2014, vol. 4, no. 3 (21), pp. 29–37 (In Russian).
  18. Akinshin N. S., Bystrov R. P., Menshikov V. L., Potapov A. A. Distinctive features and techniques of radio electronic means interference immunity enhancing. *Achievements of Modern Radioelectronics*, 2018, no. 2, pp. 3–21 (In Russian).
  19. Likhachev V. P., Semenov V. V., Veselkov A. A. Noise immunity index of synthetic aperture radar against parametric jamming which simulate point objects. *Antennas*, 2017, no. 12 (44), pp. 31–37 (In Russian).
  20. Bikkenin R. R., Andrukov A. A. Suppressing response (retranslated) interference in the course of processing pseudo-random signals with relative phase modulation. *Information and Space*, 2016, no. 2, pp. 27–32 (In Russian).

## Модель и метод диагностирования компьютерных инцидентов в информационно-коммуникационных системах, основанные на глубоком машинном обучении

А. В. Маликов<sup>а</sup>, адъюнкт, [orcid.org/0000-0002-4285-5360](https://orcid.org/0000-0002-4285-5360)

В. С. Авраменко<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, профессор, [orcid.org/0000-0002-2452-0380](https://orcid.org/0000-0002-2452-0380)

И. Б. Саенко<sup>а, б</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-9051-5272](https://orcid.org/0000-0002-9051-5272), [ibsaen@comsec.spb.ru](mailto:ibsaen@comsec.spb.ru)

<sup>а</sup>Военная академия связи, Тихорецкий пр., 3, Санкт-Петербург, 194064, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

**Введение:** модели и методы диагностирования компьютерных инцидентов, фиксируемых в информационно-коммуникационных системах, являются важнейшими компонентами математического обеспечения систем защиты информации. Основным требованием, предъявляемым к процессу диагностирования, является оперативность выявления характеристик нарушения безопасности. Сложность этой задачи обусловлена объемностью и вариативностью исходных данных о нарушении безопасности информации. **Цель:** разработка модели диагностирования компьютерного инцидента и метода, позволяющего оперативно определять значения характеристик нарушения безопасности. **Результаты:** определение значений характеристик нарушения безопасности, важных для принятия решения по реагированию на выявленный компьютерный инцидент, осуществляется с использованием глубоких искусственных нейронных сетей. Особенностью структуры предложенной глубокой искусственной нейронной сети является то, что она объединяет кодирующую часть автоэнкодера и многослойный перцептрон. Кроме того, метод реализует параллельный режим обработки информативных событий, произошедших в информационно-коммуникационной системе до обнаружения компьютерного инцидента, путем использования для каждой вторичной характеристики нарушения безопасности отдельной предложенной искусственной нейронной сети. Метод определения значений вторичных характеристик нарушения безопасности позволяет достигнуть достаточно высокого значения показателя оперативности диагностирования при приемлемых значениях показателей точности и полноты для искомым характеристик нарушения безопасности. Исследована зависимость значений показателей полноты и точности классификации от числа нейронов скрытого слоя. Экспериментально определено достаточное число нейронов скрытого слоя для достижения требуемой оперативности обучения. **Практическая значимость:** разработанные модель и метод могут быть реализованы на типовых программно-аппаратных средствах (серверах) информационно-коммуникационной системы организации. Их совместное использование с существующими моделями и методами мониторинга и диагностирования позволяет значительно повысить эффективность системы защиты информации.

**Ключевые слова** — компьютерный инцидент, диагностический признак, искусственная нейронная сеть, перцептрон, автоэнкодер.

**Для цитирования:** Маликов А. В., Авраменко В. С., Саенко И. Б. Модель и метод диагностирования компьютерных инцидентов в информационно-коммуникационных системах, основанные на глубоком машинном обучении. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 6, с. 32–42. doi:10.31799/1684-8853-2019-6-32-42

**For citation:** Malikov A. V., Avramenko V. S., Saenko I. B. Model and method for diagnosing computer incidents in information and communication systems based on deep machine learning. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 32–42 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-32-42

### Введение

Увеличение количества, форм и способов вредоносных воздействий на информационно-коммуникационные системы как государственных организаций, так и коммерческого сектора, отражаемое в отчетах различных компаний сферы информационной безопасности [1, 2], стало катализатором совершенствования методов и средств защиты информации. На первый план стали выходить системы управления событиями, регистрируемыми от разнообразных средств защиты информации и элементов информационно-коммуникационных систем.

Помимо основных средств защиты информации, таких как средства антивирусной защиты, межсе-

тевые экраны, системы обнаружения атак, средства разграничения и управления доступом, возможно применение дополнительных средств — сканеров защищенности, анализаторов журналов событий, SIEM-систем [3] и т. д. Возникает достаточно актуальная проблема эффективной обработки и анализа предоставляемой ими информации о нарушении.

Острота этой проблемы обусловлена следующими причинами:

- различием форматов отчетов об одном и том же виде нарушения, формируемых различными средствами (для автоматизации процесса диагностирования необходимо сведения о событиях приводить к единому формату);

- сложностью задачи определения взаимосвязи событий;

— наличием скрытых и распределенных во времени событий безопасности и т. д.

При этом оперативность принятия решения по реагированию на выявленный компьютерный инцидент зависит от эффективности процесса диагностирования. Под *диагностированием компьютерного инцидента* будем понимать процесс определения значений характеристик нарушения безопасности.

Существуют объективные трудности в построении системы диагностирования компьютерных инцидентов, которые вызваны:

- сложностью структуры информационных потоков в системе защиты;
- разнородностью средств защиты и автоматизации;
- необходимостью анализа большого количества событий и диагностических признаков.

В силу этого оперативное диагностирование компьютерных инцидентов является одной из актуальных ключевых задач мониторинга и управления системой защиты информации информационно-коммуникационной системы.

В настоящей статье рассматривается новый подход к диагностированию компьютерных инцидентов в информационно-коммуникационной системе, основанный на применении глубоких искусственных нейронных сетей (ИНС). При этом метод глубокого обучения используется совместно с существующими подходами к диагностированию.

Основной теоретический вклад работы заключается в следующем. Во-первых, обоснована необходимость рассмотрения задачи диагностирования компьютерных инцидентов в качестве отдельной функции системы защиты и возможность ее реализации на основе аппарата глубоких искусственных нейронных сетей. Во-вторых, предложены модель и метод диагностирования компьютерных инцидентов в информационно-коммуникационной системе, в основе которых применено глубокое машинное обучение. Наконец, экспериментально подтверждено, что реализация предложенного метода позволяет получить достаточно высокие значения показателя оперативности диагностирования, точности и полноты определяемых значений характеристик нарушения безопасности.

### Состояние исследований в области диагностирования компьютерных инцидентов. Постановка задачи

Основные подходы к поиску, сбору и обработке событий, связанных с компьютерными инцидентами, отражены в ряде работ, например [4–7]. В них указывается, что важной особенностью

анализа является необходимость автоматизации процедур сбора и обработки, так как количество событий, генерируемых информационно-коммуникационной системой, столь велико, что изучение журналов событий администратором безопасности вручную, без средств автоматизации, становится крайне неэффективным.

Для диагностирования выхода из строя оборудования информационно-коммуникационной системы предлагается [8, 9] применять ИНС. Журналы событий содержат данные об отказах системы, которые предварительно обрабатываются и передаются для поиска неисправности на вход ИНС.

Предложен подход [10–13], использующий ИНС для поиска атак и аномальных действий. Отмечена высокая точность полученных экспериментальных прогнозов и способность системы прогнозирования функционировать в режиме времени, близком к реальному.

Стремление к получению все большего количества информативных признаков из массива обрабатываемых данных послужило развитию глубоких ИНС. При этом до недавнего времени считалось нецелесообразным обучать глубокие ИНС (кроме сверточных нейронных сетей), поскольку процедуры итеративной оптимизации имели тенденцию «застывать» вблизи слабых локальных минимумов. Однако вскоре были предложены эффективные процедуры оптимизации с использованием обучения без учителя, которые продемонстрировали высокую производительность для глубоких нейронных архитектур [14].

Однако рассмотренные подходы не позволяют обеспечивать автоматическое диагностирование компьютерных инцидентов с высокой достоверностью в реальном или в близком к реальному масштабу времени. В настоящей статье мы предлагаем подход, который позволяет устранить эти недостатки.

Рассмотрим информационно-коммуникационную систему  $S$  в момент времени обнаружения компьютерного инцидента  $t_0$ . Для проведения диагностирования необходимо собрать из журналов средств автоматизации и защиты информации за определенный интервал времени  $\Delta t$ , предшествующий моменту времени обнаружения компьютерного инцидента  $t_0$ , зарегистрированные события  $x_i \in X, i = 1, N_c$ , где  $N_c$  — количество событий;  $X$  — множество событий информационно-коммуникационной системы. Затем необходимо выбрать из всего множества  $X$  информативные события  $x'_i \in X', i = 1, N_{и.с}$ , где  $N_{и.с}$  — количество информативных событий;  $X'$  — множество информативных событий. После этого осуществляется анализ информативных событий с целью определить значения характеристик нарушения безопасности  $hn_i \in HN, i = 1, N_{хар}$ , где  $N_{хар}$  — ко-

личество характеристик нарушения безопасности, используемых для принятия решения на реагирование;  $HN$  — множество характеристик нарушения безопасности.

Таким образом, решение задачи диагностирования заключается в отыскании отображения множества информативных событий  $X'$  на множество значений характеристик нарушения безопасности  $HN$ ,  $F: X' \rightarrow HN$ .

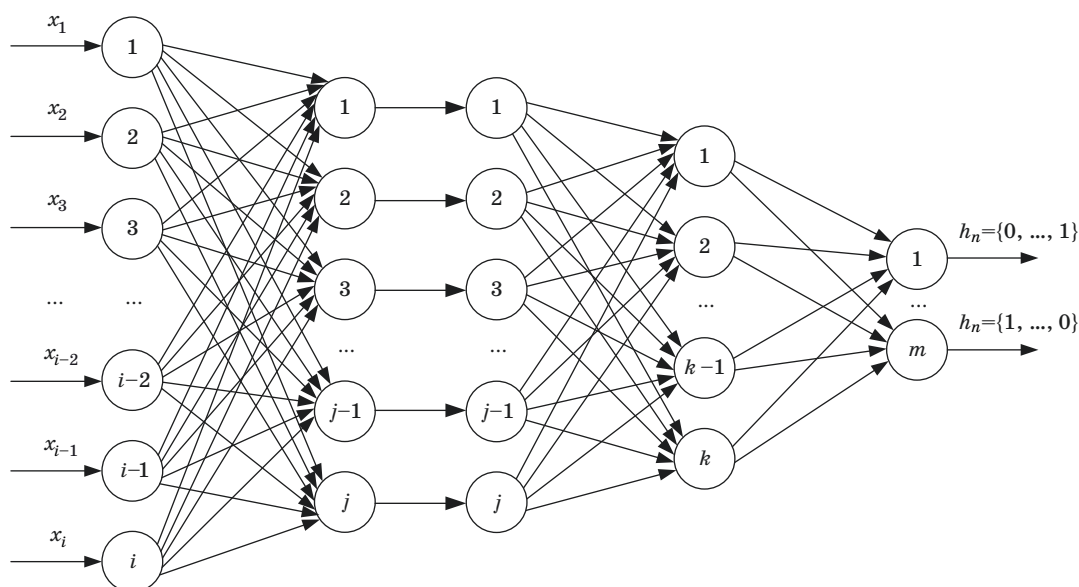
Поскольку для современных информационно-коммуникационных систем заданы высокие требования ко времени восстановления после компьютерного инцидента, то это влечет за собой потребность в минимизации времени  $T_d$ , отводимого на процесс диагностирования. При этом важно обеспечить соблюдение требований по достоверности результатов диагностирования. Целевая функция для разрабатываемой модели диагностирования может быть представлена в виде  $T_d \rightarrow \min, D_{\text{диаг}} \geq D_{\text{треб}}$ , где  $D_{\text{диаг}}$  — фактическое значение показателя достоверности диагностирования;  $D_{\text{треб}}$  — требуемое значение показателя достоверности диагностирования.

### Модель диагностирования компьютерного инцидента

Для разработки метода диагностирования компьютерных инцидентов в информационно-коммуникационных системах необходимо прежде всего разработать модель диагностирования компьютерного инцидента. Такая модель должна позволять оперативно и достоверно определять

значения характеристик нарушения безопасности. Для выполнения этих требований необходимо совершенствование способов автоматического сбора и анализа признаков компьютерного инцидента. С задачами подобного типа справляются ИНС, которые нашли весьма широкое применение в диагностировании информационных и технических систем. Это обусловлено тем, что обученная ИНС способна определить степень соответствия возможным значениям характеристики нарушения безопасности для входного множества признаков нарушения безопасности. Данный подход к идентификации значений характеристики нарушения безопасности успешно использовался в работах [15, 16]. Применительно к задаче диагностирования компьютерных инцидентов ИНС способна обобщать диагностические признаки с последующим нахождением значений характеристик нарушения безопасности, а также прогнозировать эти значения. Путем последовательного соединения двух разновидностей ИНС — автоэнкодера и многослойного персептрона — формируется глубокая ИНС (рис. 1).

Автоэнкодер снижает размерность вектора исходных данных  $X_i, i=1, N_{\text{пр}}$ , где  $N_{\text{пр}}$  — число признаков, подаваемых на вход ИНС [17]. Таким образом, осуществляется первый этап по обобщению входных данных (выполняется их сжатие):  $X_i \xrightarrow{f_{\text{аэ}}} X_j$ . В скрытом слое автоэнкодера формируются групповые диагностические признаки  $X_j$ . Далее они поступают на вход многослойного персептрона, который осуществляет процедуру обработки диагностических признаков и на выхо-



■ **Рис. 1.** Структура глубокой ИНС для определения значения  $m$ -арной характеристики нарушения безопасности  
 ■ **Fig. 1.** Structure of a deep artificial neural network to determine the value of the  $m$ -ary characteristic of a security violations

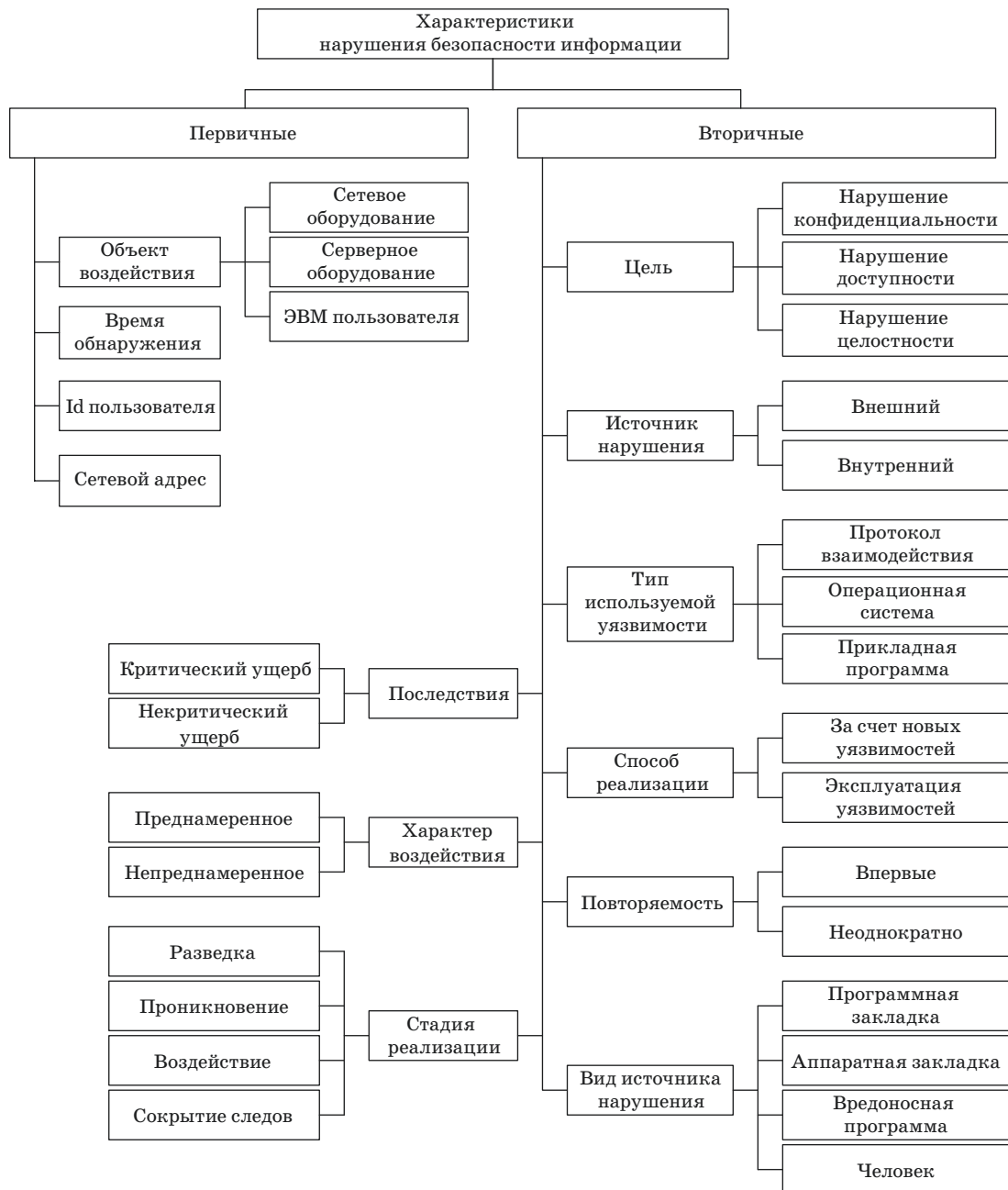
де выдает набор значений  $m$ -арной характеристики нарушения безопасности, т. е.  $X_j \xrightarrow{F} HN$ .

Множество характеристик нарушения безопасности  $HN$  представляет собой совокупность значений, по которым можно получить детальное описание выявленного нарушения безопасности. Перечень основных характеристик нарушения безопасности приведен на рис. 2.

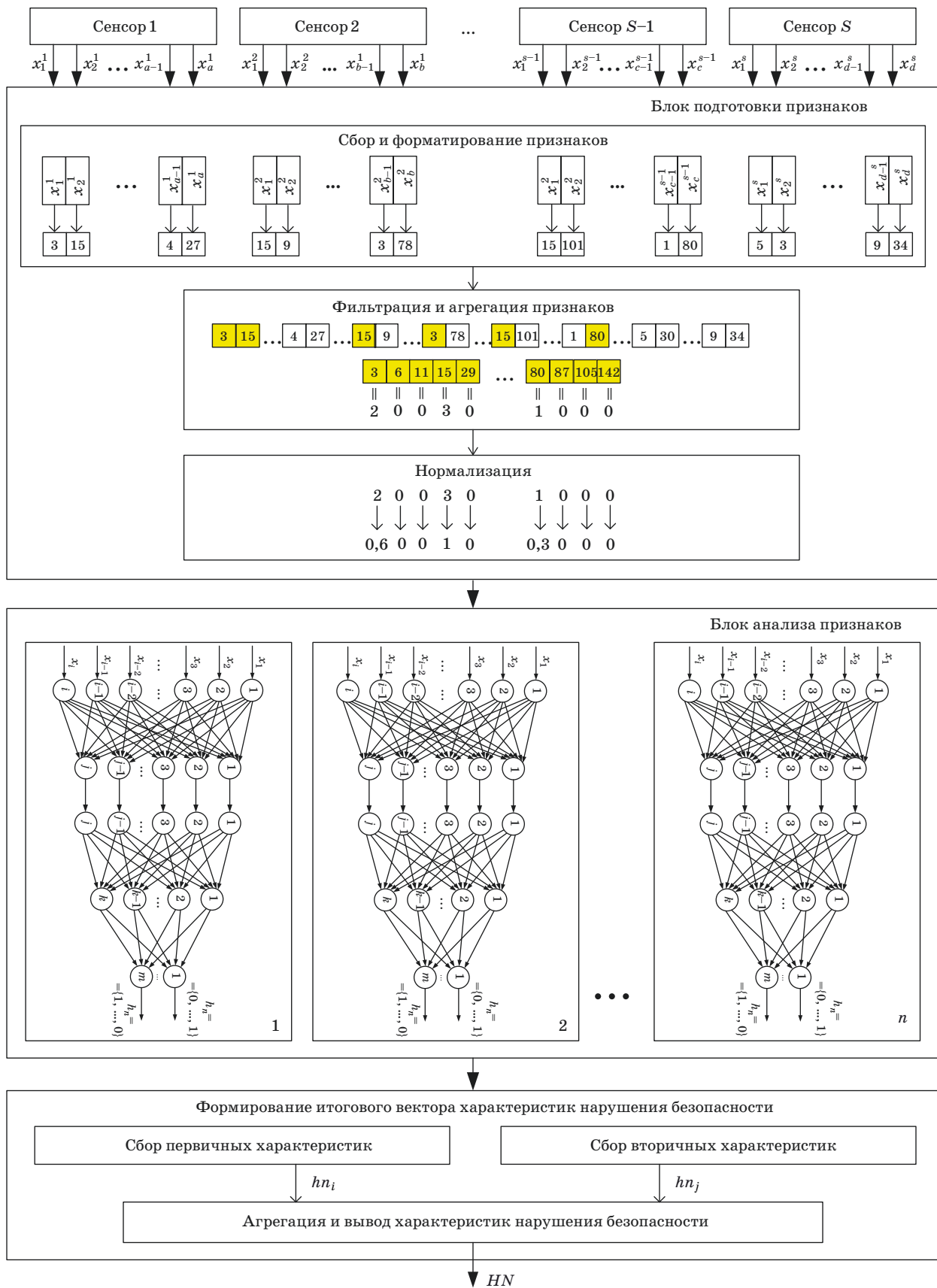
Ряд характеристик нарушения безопасности может быть получен путем прямого измерения или расчета (таких как идентификаторы пользо-

вателей, время и др.). Назовем их условно первичными характеристиками. Однако для некоторых характеристик нарушения безопасности отсутствует возможность определить их функциональную зависимость от значений диагностических признаков. Определение значений этих характеристик, условно называемых вторичными характеристиками, является нетривиальной задачей.

Модель процесса диагностирования представлена на рис. 3. Установленные сенсоры передают сообщения о событиях из журналов регистрации



■ Рис. 2. Основные характеристики нарушения безопасности  
 ■ Fig. 2. The main characteristics of a security violation



■ **Рис. 3.** Модель диагностирования компьютерного инцидента в информационно-коммуникационной системе  
 ■ **Fig. 3.** Model of computer incident diagnostics in information and communication system

в блок подготовки признаков, где осуществляется их обработка и представление к необходимому виду перед подачей на вход глубоких ИНС. Поступив в блок анализа, нормализованные значения признаков компьютерного инцидента обрабатываются несколькими ИНС. Количество ИНС зависит от количества вторичных характеристик нарушения безопасности, которые необходимо определить. Работа организована в параллельном режиме. Затем формируется итоговый вектор характеристик нарушения безопасности, который объединяет как первичные, так и вторичные характеристики.

На основании имеющегося набора значений характеристик нарушения безопасности информации принимается решение по реагированию на нарушение. В общем случае перечень характеристик нарушений безопасности должен соответствовать возможностям системы защиты по реагированию на угрозы безопасности.

### Метод диагностирования компьютерных инцидентов

К разработанному методу диагностирования компьютерных инцидентов предъявляются следующие требования:

- функционирование в реальном или близком к реальному режиму времени;
- поддержание заданных показателей точности и полноты;
- простота реализации.

Процесс диагностирования компьютерных инцидентов в соответствии с разработанным методом состоит из трех этапов:

- 1) настройки, в ходе которой осуществляется обучение ИНС;
- 2) сбора и подготовки диагностических признаков, подаваемых на вход ИНС;
- 3) формирования вектора значений характеристик нарушения безопасности.

Предварительным этапом настройки системы диагностирования (до обучения ИНС) является формирование множества исходных данных, подаваемых на вход ИНС. В работе [9] показано, что число ключевых слов в записях, важных для анализа журналов событий, не превосходит 170. В проведенном эксперименте было выбрано 128 слов и словосочетаний из журналов событий, появление которых является признаком компьютерного инцидента или предпосылкой его появления.

В зависимости от имеющихся сведений об инциденте, поступающих от средств защиты, выбирается размер временного интервала. Для каждого журнала событий информационно-коммуникационной системы строится вектор слов

в выбранном временном интервале. На вход диагностической ИНС поступает суммарный вектор по всем журналам событий. Так, для информационно-коммуникационной системы, состоящей из 40 компьютеров с установленной операционной системой семейства Linux, могут быть эффективно использованы 400 журналов событий. Соответственно, входной вектор диагностической ИНС должен содержать 51 200 нейронов.

Альтернативный метод обработки журналов событий предложен в работах [18, 19]. Записи из журналов событий могут быть проанализированы на уровне исходных кодов, после чего к результатам анализа применяется метод машинного обучения. Полученный результат может быть преобразован в дерево решений, отображающее критические сообщения, связанные с обнаруженными проблемами. Однако разработчики данного метода оценивали способность анализа технических неисправностей, не рассматривая компьютерные инциденты.

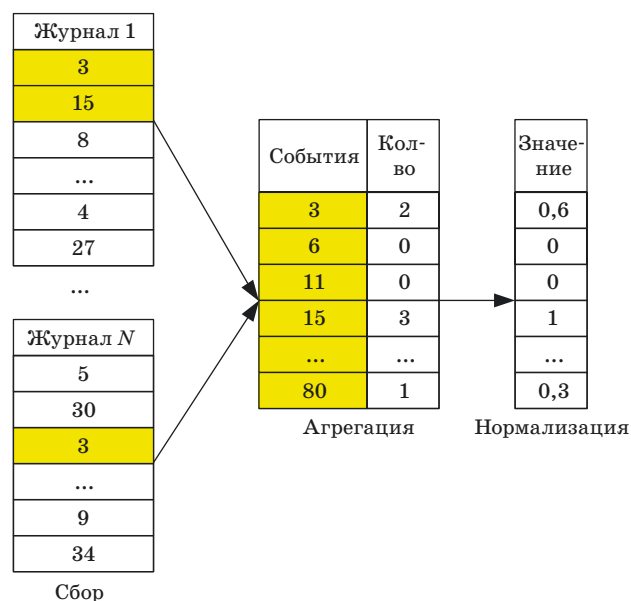
На этапе настройки необходимо осуществить обучение глубокой ИНС и проверить ее готовность к функционированию. Обучение ведется по полученным экспертным путем парам значений  $(X, Y)$ , где  $X$  — множество признаков, поступающих на вход искусственной нейронной сети;  $Y$  — значение характеристики нарушения безопасности, соответствующее данному набору признаков. Они хранятся в базе данных, которая предназначена, в том числе, для сохранения новых пар  $(X, Y)$  и последующей корректировки ИНС. Процесс обучения осуществляется методом обратного распространения ошибки, в ходе которого происходит корректировка весовых коэффициентов каждой связи искусственных нейронов между собой [20]. На вход ИНС подаются признаки, полученные из журналов событий и сохраненные в базе данных. На выходе ожидается отклик ИНС на этот набор признаков. Полученный отклик  $Y'$  сравнивается с правильным ответом  $Y$ , и в случае совпадения осуществляется переход к следующему набору признаков. При расхождении значений отклика  $Y'$  и правильного ответа  $Y$  сначала изменяются весовые коэффициенты связей нейронов от входного до выходного слоя. После этого производится переход к новому набору признаков, который также подается на вход ИНС. Обучение продолжается до тех пор, пока ошибка обучения на множестве всех наборов признаков достигнет допустимого значения либо число итераций не превысит определенного значения [21, 22].

Также важным этапом настройки является задание временного окна — интервала времени, в течение которого будет осуществляться сбор признаков нарушения безопасности. Ввиду большого количества анализируемой информации возникает необходимость уменьшения ее объема.

Из всех событий, фиксируемых в ходе функционирования информационно-коммуникационной системы, отбираются информативные события, которые могут содержать признаки нарушения безопасности. Остальные события не рассматриваются. Порядок формирования входного вектора признаков представлен на рис. 4. Временной интервал может быть выбран исходя из ресурсов информационно-коммуникационной системы по хранению журналов событий с учетом выявленного компьютерного инцидента.

На этапе функционирования системы диагностирования после получения сигнала о компьютерном инциденте и первичной информации от средств защиты осуществляется уточнение временного окна, а затем — сбор и обработка событий. В выбранном временном окне происходит подсчет числа информативных событий по каждому источнику, фиксирующему события в информационно-коммуникационной системе. Полученные значения нормализуются для последующей подачи на вход ИНС. В итоге формируется вектор информативных признаков.

Сформированный вектор поступает на вход комбинированной ИНС для определения значения характеристик нарушения безопасности. Для каждой характеристики нарушения безопасности, значение которой невозможно получить напрямую от средств детектирования компьютерных инцидентов, предполагается отдельная глубокая ИНС, обученная на определение одного конкретного значения характеристики. В связи



■ **Рис. 4.** Подготовка вектора признаков для подачи на вход ИНС  
 ■ **Fig. 4.** Preparation of a vector features for input of an artificial neural network

с этим количество нейронов выходного слоя персептрона будет определяться количеством возможных значений характеристики нарушения безопасности. Индивидуальные комбинированные ИНС работают параллельно. Вектор информативных признаков поступает на все ИНС одновременно, а также сохраняется в базе данных для учета и запоминания варианта реагирования на компьютерный инцидент. Выбор числа определяемых характеристик нарушения безопасности зависит от ситуации, в которой обнаружен компьютерный инцидент, и определяется различными параметрами, такими как важность защищаемых ресурсов, имеющийся ресурс на проведение анализа и потенциальные возможности по реагированию.

По результатам работы совокупности комбинированных ИНС формируется набор значений характеристик нарушения безопасности. Он используется для выбора варианта реагирования на компьютерный инцидент исходя из ограниченной и имеющихся возможностей.

### Анализ экспериментальных данных

Обучение диагностической ИНС осуществлялось на основе имеющейся базы данных о нарушениях безопасности информации, составленной экспертным путем. База данных состоит из 276 записей, которые включают наборы диагностических признаков из журналов событий для 20 компьютеров. Для характеристики нарушения безопасности по характеру воздействия из 276 записей 113 соответствуют преднамеренному нарушению, а 163 — непреднамеренному нарушению. Для характеристики нарушения безопасности по последствиям реализации из 276 записей 164 соответствуют критическому ущербу, а 112 — некритическому ущербу.

Система диагностирования была реализована на языке программирования Python. Для настройки ИНС база данных была разделена на две части. Для обучения было взято 194 записи. Оставшиеся 82 записи использовались для тестирования. Оценка диагностической ИНС проводилась по общепринятым показателям точности  $Pr$  и полноты  $Rc$ :

$$Pr = \frac{TP}{TP + FP}; Rc = \frac{TP}{TP + FN},$$

где  $TP$  — количество записей, классифицируемых как истинное значение характеристики, в то время как оно истинное;  $FP$  — количество записей, классифицируемых как истинное значение характеристики, в то время как оно фактически ложное;  $FN$  — количество записей, классифици-



руемых как ложное значение, в то время как оно истинное. Значения показателей, полученные в ходе эксперимента, для характеристики нарушения безопасности по характеру воздействия в зависимости от количества нейронов скрытого слоя приведены на рис. 5, а, а для характеристики нарушения безопасности по последствиям реализации — на рис. 5, б.

Для решения задачи оптимизации общего времени диагностирования возникает необходимость преобразования структуры ИНС путем уменьшения числа нейронов для сокращения времени обучения без существенной потери точности результата. Полученные зависимости показателей точности и полноты от числа нейронов предпоследнего слоя комбинированной ИНС, представленные на рис. 5, позволяют судить о том, что диагностическая ИНС показывает весьма высокие значения показателя точности определения значения бинарной характеристики нарушения безопасности. В случае если предпоследний слой содержит свыше 30 нейронов, показатель точности составляет более 75 %, что говорит о большой доле правильно классифицированных преднамеренных нарушений среди всего объема нарушений, классифицированных как преднамеренные из тестовой выборки. Показатель полноты при этом составляет 85 % и указывает на долю правильно найденных значений преднамеренных нарушений из всего объема реально преднамеренных нарушений, имеющих в тестовой выборке. При этом 30 нейронов

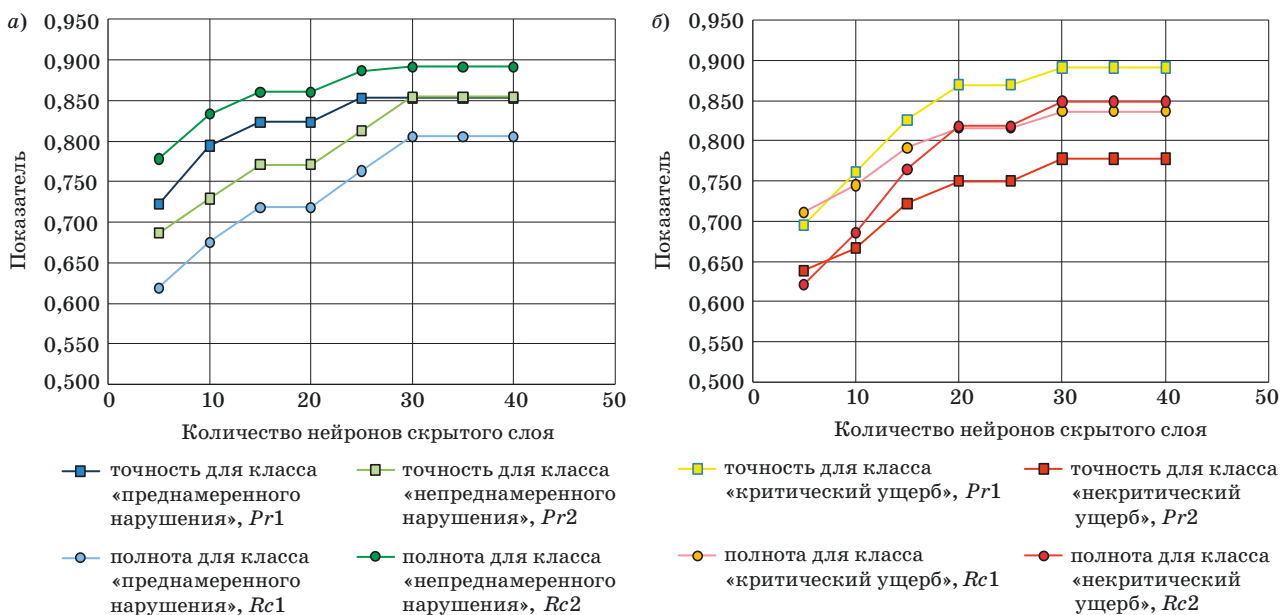
предпоследнего слоя являются оптимальным количеством для комбинированной ИНС для диагностирования системы из 20 компьютеров, поскольку увеличение числа нейронов не приводит к значительному приросту точности и полноты результатов. При этом время обучения ИНС возрастает с 330 до 446 секунд.

### Заключение

В настоящей работе предложены модель и метод диагностирования компьютерных инцидентов в информационно-коммуникационной системе, основанные на использовании алгоритмов глубокого обучения искусственных нейронных сетей.

Ключевой особенностью компьютерных инцидентов как объекта анализа для определения значений характеристик нарушения безопасности является наличие важных диагностических признаков, сохраняемых в журналах регистрации событий элементов информационно-коммуникационных систем. Для экспериментальной оценки предложенного метода были выбраны показатели полноты и точности определения значений характеристик нарушения безопасности.

Экспериментальная оценка предложенного метода показала, что он позволяет определять значения характеристик нарушения безопасности с достаточно высокой точностью и в реальном или в близком к реальному масштабе времени.



■ **Рис. 5.** Значения показателей  $Pr$  и  $Rc$  для характеристики нарушения безопасности по характеру воздействия (а) и по последствиям реализации (б)

■ **Fig. 5.** Values of  $Pr$  and  $Rc$  indicators for characteristic the security violation by character of influence (а) and by implementation consequences (б)

Дальнейшие направления исследований связываются с разработкой методов применения частично предобученных глубоких ИНС и дообучением их с использованием технологии переноса знаний (transfer learning).

### Литература

1. Актуальные киберугрозы. I квартал 2019 года. Сайт Positive Technologies 2019. <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-q1-2019> (дата обращения: 24.06.2019).
2. Итоги информационной безопасности в 2018 году. <https://rvision.pro/blog-posts/itogi-informatsionnoj-bezopasnosti-v-2018-godu/> (дата обращения: 24.06.2019).
3. **Kotenko I. V., Saenko I. B.** Creating new-generation cybersecurity monitoring and management systems. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 84, no. 6, pp. 424–431.
4. **Vaarandi R.** A data clustering algorithm for mining patterns from event logs. *Proc. the 3rd IEEE Workshop on IP Operations and Management*, October 2003, pp. 119–126.
5. **Kurd Z.** *Artificial Neural Networks in Safety-critical Applications*. University of York, Department of Computer Science, 2005. 334 p.
6. **Cheng H.-J., Kumar A.** Process mining on noisy logs — Can log sanitization help to improve performance? *Decision Support Systems*, 2015, no. 79, pp. 138–149.
7. **Bose R. P. J. C., Mans R. S., van der Aalst W. M. P.** Wanna improve process mining results? *IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM)*, 2013, pp. 127–134.
8. **Lv F., Wen C., Bao Z., and Liu M.** Fault diagnosis based on deep learning. *American Control Conference*, 2016, IEEE, 2016, pp. 6851–6856.
9. **Zou D. Q., Qin H., Jin H.** UiLog: Improving log-based fault diagnosis by log analysis. *Journal of Computer Science and Technology*, Sept. 2016, no. 31(5), pp. 1038–1052.
10. **Fu Q., Lou J. G., Wang Y., et al.** Execution anomaly detection in distributed systems through unstructured log analysis. *Proc. the 9th IEEE International Conference on Data Mining*, Dec. 2009, pp. 149–158.
11. **Nolle T., Seeliger A., Mühlhäuser M.** Unsupervised anomaly detection in noisy business process event logs using denoising autoencoders. *Lecture Notes in Computer Science*, 2016, pp. 442–456.
12. **Sakurada M., Yairi T.** Anomaly detection using autoencoders with nonlinear dimensionality reduction. *Proceedings of the MLSDA 2014 2nd Workshop on Machine Learning for Sensory Data Analysis — MLSDA'14*, 2014, pp. 4–11. doi:10.1145/2689746.2689747

### Финансовая поддержка

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 18-07-01369) и бюджетной темы № АААА-А16-116033110102-5.

13. **Alkasassbeh M.** An empirical evaluation for the intrusion detection features based on machine learning and feature selection methods. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2017, vol. 95, no. 22, pp. 5962–5976.
14. **Larochelle H., Erhan D., Courville A., Bergstra J., Bengio Y.** An empirical evaluation of deep architectures on problems with many factors of variation. *Proceedings of the 24th International Conference on Machine Learning — ICML '07*, 2007, pp. 473–480.
15. **Авраменко В. С., Бобрешов-Шишов Д. И., Маликов А. В.** Идентификация характеристик нарушенной безопасности информации на основе искусственных нейронных сетей. Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. СПб., СПОИСУ, 2018. Вып. 5. С. 68–70.
16. **Авраменко В. С., Маликов А. В.** Нейросетевая модель диагностирования компьютерных инцидентов в инфотелекоммуникационных системах специального назначения. *Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: тр. IV межвузовской науч.-практ. конф.*, Санкт-Петербург, 6 февраля 2019 г. СПб., ВАС, 2019. Т. 1. С. 41–45.
17. **Baldi P.** Autoencoders, unsupervised learning and deep architectures. *Proceedings of the 2011 International Conference on Unsupervised and Transfer Learning workshop — UTLW'11*, Isabelle Guyon, Gideon Dror, Vincent Lemaire, Graham Taylor, and Daniel Silver (Eds.), 2011, vol. 27, JMLR.org 37-50.
18. **Xu W., Huang L., Fox A., et al.** Detecting large-scale system problems by mining console logs. *Proceedings the 22nd ACM Symposium on Operating Systems Principles*, October 2009, pp. 117–132.
19. **Mineda Carneiro E., Vieira Dias L. A., Marques da Cunha A., Stege Mialaret L. F.** Cluster analysis and artificial neural networks. A case study in credit card fraud detection. *Proceedings the 12th International Conference on Information Technology — New Generations*, 2015, pp. 122–126.
20. **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации / пер. с польского И. Д. Рудинского. М., Финансы и статистика, 2002. 344 с.
21. **Николенко С., Кадури А., Архангельская Е.** Глубокое обучение. СПб., Питер, 2018. 480 с.
22. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. М., Вильямс, 2006. 1104 с.

UDC 004.056

doi:10.31799/1684-8853-2019-6-32-42

**Model and method for diagnosing computer incidents in information and communication systems based on deep machine learning**Malikov A. V.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, orcid.org/0000-0002-4285-5360Avramenko V. S.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-2452-0380Saenko I. B.<sup>a,b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-9051-5272, ibsaen@comsec.spb.ru<sup>a</sup>Military Telecommunications Academy, 3, Tikhoretsky Av., 194064, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Models and methods for diagnosing computer incidents recorded in information and communication systems are the most important components in mathematical support of information security systems. The main requirement for the diagnostics is prompt identification of security violation characteristics. This problem is complicated due to the amount and variability of the initial data on information security violation. **Purpose:** Development of a model for diagnosing a computer incident, along with a method which would allow you to quickly determine the characteristics of a security violation. **Results:** Security breach characteristics important for making a decision about responding to an identified computer incident can be determined via deep artificial neural networks. A structural feature of the proposed deep artificial neural network is combining the coding part of the autoencoder and a multilayer perceptron. In addition, the method implements a parallel mode of processing information events which have occurred in the information and communication system before the incident was detected, by using a separate proposed artificial neural network for each secondary characteristic of the security breach. The method of determining the values of these secondary characteristics allows you to greatly improve the diagnostics efficiency, having acceptable values of precision and recall for the security violation characteristics to determine. The dependence has been studied of the completeness and classification accuracy on the number of neurons in the hidden layer. A sufficient number of neurons in the hidden layer for achieving the required training efficiency is experimentally determined. **Practical relevance:** The developed model and method can be implemented using standard software and hardware (servers) of an information and communication system. Their combined use with the existing models and methods of monitoring and diagnostics can significantly improve the efficiency of an information security system.

**Keywords** — computer incident, diagnosis sign, artificial neuro network, perceptron, autoencoder.

**For citation:** Malikov A. V., Avramenko V. S., Saenko I. B. Model and method for diagnosing computer incidents in information and communication systems based on deep machine learning. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 32–42 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-32-42

**References**

1. *Aktual'nye kiberugrozy. I kvartal 2019 goda* [Actual cyber threats. The first quarter of 2019. Site of Positive Technologies 2019]. Available at: <https://www.ptsecurity.com/ruru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-q1-2019> (accessed 24 July 2019).
2. *Itogi informacionnoj bezopasnosti v 2018 godu* [Results of information security in 2018]. Available at: <https://rvision.pro/blog-posts/itogi-informacionnoj-bezopasnosti-v-2018-godu/> (accessed 26 July 2019).
3. Kotenko I. V., Saenko I. B. Creating new-generation cyber-security monitoring and management systems. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 84, no. 6, pp. 424–431.
4. Vaarandi R. A data clustering algorithm for mining patterns from event logs. *Proc. the 3rd IEEE Workshop on IP Operations and Management*, October 2003, pp. 119–126.
5. Kurd Z. *Artificial Neural Networks in Safety-critical Applications*. University of York, Department of Computer Science, 2005. 334 p.
6. Cheng H.-J., & Kumar A. Process mining on noisy logs — Can log sanitization help to improve performance? *Decision Support Systems*, 2015, no. 79, pp. 138–149.
7. Bose R. P. J. C., Mans R. S., van der Aalst W. M. P. Wanna improve process mining results? *IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM)*, 2013, pp. 127–134.
8. Lv F., Wen C., Bao Z., and Liu M. Fault diagnosis based on deep learning. *American Control Conference*, 2016, IEEE, 2016, pp. 6851–6856.
9. Zou D. Q., Qin H., Jin H. UiLog: Improving log-based fault diagnosis by log analysis. *Journal of Computer Science and Technology*, Sept. 2016, no. 31(5), pp. 1038–1052.
10. Fu Q., Lou J. G., Wang Y., et al. Execution anomaly detection in distributed systems through unstructured log analysis. *Proc. the 9th IEEE International Conference on Data Mining*, Dec. 2009, pp. 149–158.
11. Nolle T., Seeliger A., Mühlhäuser M. Unsupervised anomaly detection in noisy business process event logs using denoising autoencoders. *Lecture Notes in Computer Science*, 2016, pp. 442–456.
12. Sakurada M., Yairi T. Anomaly detection using autoencoders with nonlinear dimensionality reduction. *Proceedings of the MLSDA 2014 2nd Workshop on Machine Learning for Sensory Data Analysis — MLSDA'14*, pp. 4–11. doi:10.1145/2689746.2689747
13. Alkasassbeh M. An empirical evaluation for the intrusion detection features based on machine learning and feature selection methods. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2017, vol. 95, no. 22, pp. 5962–5976.
14. Larochelle H., Erhan D., Courville A., Bergstra J., Bengio Y. An empirical evaluation of deep architectures on problems with many factors of variation. *Proceedings of the 24th International Conference on Machine Learning — ICML '07*, 2007, pp. 473–480.
15. Avramenko V. S., Bobreshov-Shishov D. I., Malikov A. V. *Identifikaciya harakteristik narushenij bezopasnosti informacii na osnove iskusstvennyh neyronnyh setej* [Identification of information security violations characteristics on the basis of artificial neural networks. In: Scientific collection “Regional informatics and information security”]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskoe obshchestvo informatiki, vychislitel'noj tekhniki, sistem svyazi i upravleniya Publ., 2018, pp. 68–70.
16. Avramenko V. S., Malikov A. V. Neural network model of diagnosing computer incidents in infotelecommunication systems of special purpose. *Trudy IV mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Problemy tekhnicheskogo obezpecheniya vojsk v sovremennyh usloviyah”* [Proceedings of the IV Interuniversity Scientific and Practical Conference “Problems of technical support of troops in modern conditions”], Saint-Petersburg, 2019, vol. 1, pp. 41–45 (In Russian).

17. Baldi P. Autoencoders, unsupervised learning and deep architectures. *Proceedings of the 2011 International Conference on Unsupervised and Transfer Learning workshop — UTLW'11*, Isabelle Guyon, Gideon Dror, Vincent Lemaire, Graham Taylor, and Daniel Silver (Eds.), 2011, vol. 27, JMLR.org 37-50.
  18. Xu W., Huang L., Fox A., et al. Detecting large-scale system problems by mining console logs. *Proceedings the 22nd ACM Symposium on Operating Systems Principles*, October 2009, pp. 117–132.
  19. Mineda Carneiro E., Vieira Dias L. A., Marques da Cunha A., Stege Mialaret L. F. Cluster analysis and artificial neural networks. A case study in credit card fraud detection. *Proceedings the 12th International Conference on Information Technology — New Generations*, 2015, pp. 122–126.
  20. Osovsky S. *Нейронные сети для обработки информации* [Neural networks for information processing]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 344 p. (In Russian).
  21. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. *Глубокое обучение* [Deep learning]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2018. 480 p. (In Russian).
  22. Khaikin S. *Нейронные сети: полный курс* [Neural networks: full course]. 2nd ed. Moscow, Vil'yams Publ., 2006. 1104 p. (In Russian).
- 

---

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает 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, есть возможность провести регистрацию на 12-ти языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>

---

## Analysis of total signal decay and capacity of information data in wireless atmospheric communication links. Part 1

Juwiler I.<sup>a</sup>, PhD, Senior Lecturer, [orcid.org/0000-0002-0669-7828](https://orcid.org/0000-0002-0669-7828)

Bronfman I.<sup>a</sup>, Assistant, [orcid.org/0000-0001-6195-069X](https://orcid.org/0000-0001-6195-069X)

Blaunstein N.<sup>b</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, [orcid.org/0000-0003-2945-9379](https://orcid.org/0000-0003-2945-9379),  
nathan.blaunstein@hotmail.com

<sup>a</sup>Electrical and Electronics Engineering Department, Shamoon College of Engineering, Jabotinsky St., 84, Ashdod, 77245, Israel

<sup>b</sup>Ben-Gurion University of the Negev, P.O.B. 653, 1, Ben-Gurion St., Beer-Sheva, 74105, Israel

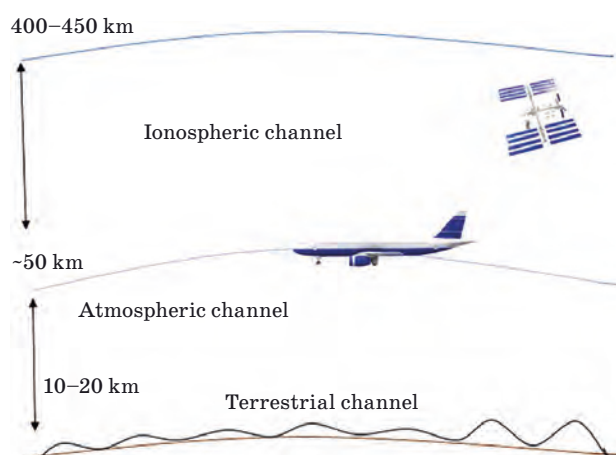
**Introduction:** Analysis of total signal decay is based on prognosis of the total path loss occurring in the atmospheric communication links, accounting for effects of gaseous structures attenuation and scattering, hydrometeors (rain, snow and clouds) absorption and attenuation, and turbulent structures fast fading on radio and optical signals passing atmospheric channels with fading. **Purpose:** To perform a novel methodology of definition and estimation of effects of decay, absorption, scattering, and fading of radio and optical signals propagating in atmospheric channels in various meteorological conditions. **Results:** Was analyzed the impact of gaseous structures, hydrometeors and turbulent structures in total path loss for link budget design and in degradation of data stream parameters, such as capacity, spectral efficiency and bit-error-rate, which lead in loss of information data signals passing such kinds of channels with fast fading and decrease of quality of service. An optimal algorithm was found of the total path loss prediction for various meteorological situations occurring in the real atmosphere at different heights and for various frequencies of radiated signals. A method was proposed of how to evaluate the data stream parameters, capacity, spectral efficiency and bit-error-rate, accounting for the effects of atmospheric turbulence impact on fast fading, which corrupts information passing such kinds of channels. All practical tests were illustrated by the use of the MATLAB utility. A new methodology was proposed on how to evaluate and estimate the capacity, the spectral efficiency, and the loss in energy and in the information data stream for different scenarios of radio and optical signals propagation via atmospheric channels with fading caused by different meteorological conditions. **Practical relevance:** The results obtained allow to achieve better accuracy of prognosis and increase quality of service in atmospheric communication channels.

**Keywords** – absorption, attenuation, bit-error rate, capacity, clouds, fast fading, gaseous structures, hydrometeors, rain, Ricean factor  $K$ , snow, scintillation index, spectral efficiency, turbulence.

**For citation:** Juwiler I., Bronfman I., Blaunstein N. Analysis of total signal decay and capacity of information data in wireless atmospheric communication links. Part 1. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 43–53. doi:10.31799/1684-8853-2019-6-43-53

### Overview

There are three main channels of wireless communications: the terrestrial, atmospheric and ionospheric. In this work, we will discuss the atmospheric channel, mainly the tropospheric one, which is the lower region of the atmosphere that surrounds the Earth from the ground surface up to 10–20 km above the terrain (Fig. 1). During the recent decades (see [1–7] and bibliography therein) the most attractive aspect for current investigations has become the land-to-air and air-to-land communication links with aircrafts such as airplanes, helicopters, drones, and so forth. As follows from Fig. 1, the troposphere consists of gaseous particles, called aerosols, rain particles, clouds, fog, hail, snow, and so on, all of which are usually called hydrometeors in the literature [8–19]. Furthermore, due to sporadic air streams and motions, another phenomenon occurs in the troposphere called atmospheric turbulences. Due to irregular conditions in the troposphere, when a radio or optical signal propagates



■ Fig. 1. Main communication links

through a tropospheric channel, its intensity varies sporadically. This phenomenon is called fading, fast and slow in the time domain, or small-scale and large-scale in the space domain, respectively [3–5].

The aim of the work under our recent investigations is to design a link budget, that is, to evaluate the total signal path loss via prediction of the effects of main tropospheric features on propagation of signals with data through such channels. At the same time — to perform quality of service within the atmospheric link by estimating parameters of signal data stream passing atmospheric wireless channels, with fading caused by multiple scattering, reflection and diffraction of radio waves as the carrier of information. Finally, the aim of this work is to provide designers of wireless atmospheric communication links a stable algorithm of how to:

- predict the total path loss;
- design a link budget;
- perform and improve quality of service by predicting a-priori the capacity of data stream or spectral efficiency and bit-error-rate (BER) in such channels affected by attenuation, absorption and fading phenomena.

### Content and main parameters of the troposphere

The troposphere consists of different kinds of gaseous, liquid and crystal structures such as gas molecules, aerosol, rain particles, cloud, fog, hail and snow. All except the first, are usually called *hydrometeors* in the literature. Furthermore, due to sporadic air streams and motions another phenomenon occurs in space and time domains, called atmospheric turbulences. Below, we briefly describe the various components that make up the troposphere following the specific literature [1–3, 8–22].

#### The content

**Gaseous molecules and atoms.** There are many types of atmospheric molecules and atoms, such as  $O_2$ , O,  $CO_2$ , NO,  $N_2$ , etc. [1–3, 20].

**An aerosol,** for the purposes of this paper, is a system of liquid or solid particles uniformly dispersed in the atmosphere. Aerosol particles play an important role in the perception process, providing the nuclei upon which condensation and freezing take place. The particles participate in chemical processes and influence the electrical properties of the atmosphere [18, 19]. The system begins to acquire the properties of a real aerosol structure when smaller particles are in suspension. An actual aerosol particle range can be between a few nanometers to about few micrometers, while aerosols composed of particles larger than 50  $\mu m$  are unstable. The number of aerosol molecules can be found [19]:

$$N(z) = N(0) \exp\left(-\frac{z}{z_s}\right), \quad (1)$$

where  $N(z)$  is the current number of molecules;  $N(0)$  is the number of molecules at the ground surface;  $z$  is the height of the molecules in meters, and  $z_s$  is scale height while  $1 \text{ km} < z_s < 1.4 \text{ km}$ .

**Clouds.** Clouds' shape, structure and texture are influenced by air movements that change their formation and growth, and are also influenced by the properties of the cloud particles themselves. There are four principle classes into which clouds are classified according to the kind of air motions that produce them [2, 11–13]:

- 1) layer clouds formed by the widespread regular ascent of air;
- 2) layer clouds formed by the widespread irregular stirring of turbulence;
- 3) cumuliform clouds formed by penetrative convection;
- 4) orographic clouds formed by ascent of air over hills and mountains.

In settled weather, clouds are small and well scattered. Their horizontal and vertical dimensions are only a kilometer or two. In disturbed weather, they cover a large part of the sky and can tower as high as 10 km or more. Clouds often cease their growth only upon reaching the stable stratosphere, producing heavy showers, hail, and thunderstorms. Growing clouds are sustained by upward air currents, which may vary in strength from a few centimeters per second to several meters per second. Cloud effects on wave propagation in the troposphere are well known. These effects are scattering, absorption and refraction which all cause attenuation and fading of the wave path. All these phenomena will be considered later.

**Rain** is the precipitation of liquid water drops with diameters greater than 0.5 mm [14–17]. When the drops are smaller, the precipitation is usually called drizzle. The concentration of raindrops typically spreads from 100 to 1000  $m^{-3}$ . Drizzle droplets usually are more numerous. Raindrops seldom have diameters larger than 4 mm because the concentration generally decreases as the diameter increases, except when the rain is heavy. It does not reduce visibility as much as drizzle. Meteorologists classify rain according to its rate of fall. There are three classes of rain: light, moderate and heavy and they correspond to dimensions less than 2.5 mm, between 2.8 and 7.6 mm, and more than 7.6 mm, respectively. As for rain with rates of less than 250 mm per year and for more than 1500 mm per year, that represents the extremes of rainfall for all the continents.

**Atmospheric turbulence** is a chaotic structure generated by irregular air movements in which the wind randomly varies in speed and direction [5–7, 23–26]. Turbulence is important because it churns and mixes the atmosphere and causes water vapor, smoke, and other substances, as well as energy, to

become distributed at all elevations. Atmospheric turbulence near the Earth's surface differs from that which occurs at higher levels. Within a few hundred meters of the surface, turbulence has a marked diurnal variation, reaching a maximum about midday. When the sky is cloudy, the low-level air temperature varies much less between day and night and turbulence remains nearly constant. At altitudes of several thousand meters or more, the frictional effect of the Earth's surface topography on the wind is greatly reduced and the small-scale turbulence, which is usually observed in the lower atmosphere, is absent [4–7].

**Main parameters of troposphere**

The physical properties of the troposphere are characterized by the following main parameters such as *temperature*,  $T$  (in Kelvin), *pressure*,  $P$  (in millibar or millimeters of Mercury), and *density*,  $p$  (in particles per cubic meter or centimeter). All these parameters significantly change with altitude, seasonal, and latitudinal variability, and strongly depend on the weather [3].

**Temperature.** The temperature in the atmosphere depends on altitude  $h$ , in meters. The temperature  $T$  at height  $h$  (measured in meters) is given by [4–7]:

$$T(h) = 288.15 + 0.06545h \text{ K} \tag{2}$$

the troposphere is a region between 10–20 km above the earth's surface, and in this region the temperature is [4–7]:

$$T(h) = 216.65 \text{ K.} \tag{3}$$

**Pressure.** It is the force-applied perpendicular to the surface of an object per unit area over which that force is distributed. The pressure can be determined by [4–7]:

$$P(h) = 2.269 \times 10^4 \exp \left[ -\frac{0.034164(h - 11\,000)}{216.65} \right] \text{ mbar,} \tag{4}$$

where  $h$  is the height (in meters). In the troposphere, besides the atmospheric pressure, we usually need to know the water vapor partial pressure  $p$ , [mbar], and  $e(t)$  is the saturation pressure [6]. The relationship between water vapor pressure  $p_w$  and relative humidity is given by:

$$\rho_w = \frac{\eta e_s}{100}, \tag{5}$$

where

$$e_s = a \frac{bt}{t+c}, \tag{6}$$

where  $\eta$  is the relative humidity, %;  $t$  is the temperature, °C;  $e_s$  is the saturation pressure, Pa, for temperature  $t$ , °C, while the coefficients  $a$ ,  $b$ , and  $c$  were defined empirically via numerous experiments [6]. The vapor pressure  $p$  can be evaluated via the water vapor density  $\rho$  using the equation

$$p_w = \frac{\rho_w T(h)}{216.7} \tag{7}$$

with the water vapor density  $\rho$  given by the following equation:

$$\rho = \rho_0 \exp \left( -\frac{h}{h_0} \right). \tag{8}$$

Here,  $h_0$  is the scale height of 2 km and the standard water vapor density is:

$$\rho_0 = 7.5 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}. \tag{9}$$

**Humidity.** In meteorology the measurable quantity is the relative humidity  $\eta(T)$ , and we can relate  $p$  with  $e_s(T)$ . The relative humidity is given by [4–6]:

$$\eta = \frac{p_w}{e_s(T)}. \tag{10}$$

**Effects of tropospheric features on signal propagation**

For the ideal fully gaseous atmosphere with an absence of hydrometeors, fading phenomena of radio and optical waves can remain optimal 99.999 % of the time for the paths of 5 km and more, with the fade margin of 28 dB. However, there are phenomena of propagation that can significantly decrease the efficiency of land-to-atmosphere or atmosphere-to-land communication links, such as scattering, attenuation or absorption. Let us briefly consider the impact of each feature separately in total path loss of the signal passing a tropospheric communication channel.

**Main features occurring in the troposphere**

**Absorption** (or *attenuation*) occurs because of conversion from wave energy to thermal energy within an attenuating particle, such as a gas molecule and different hydrometeors [3–5].

**Scattering** is a vitally important feature causing strong fast fading of the signal and occurs from the redirection of the radio waves into various directions, so that only a fraction of the incident energy is transmitted onward in the direction of the receiver. The main scattering particles that are of

interest to satellite systems are hydrometeors, including raindrops, fog and clouds; and can be calculated using three main approaches that account for the relationship between the wavelength and the size of the particles causing the scatter. All approaches were discussed in [3–7, 23] and their scattering coefficient is described below by the following theoretical frameworks (11a)–(11c).

a) *Mie scattering* is applicable when the particle size is comparable to the radiation wavelength. The Mie scattering coefficient was defined as the ratio of the incident wave front that is affected by the particle to the cross-sectional:

$$\sigma_{\lambda} = \pi \int_{a_1}^{a_2} N(r) K(r, n) r^2 dr. \quad (11a)$$

b) *Rayleigh scattering* applies when the radiation wavelength is much smaller than the particle sizes and is described by

$$\sigma_{\lambda} = \frac{\left( \frac{4\pi^2 N V^2}{\lambda^2} \right) (n^2 - n_0^2)^2}{(n^2 + 2n_0^2)^2}, \quad (11b)$$

where  $n_0$  an index of refraction at the ground level.

c) *Non-selective scattering* applies when the particle size is significantly larger than the radiation wavelength. Large-particle scattering is composed of contributions from three processes involved in the interaction of the electromagnetic radiation with the scattering particles:

$$\sigma_{\lambda} = \int N(r) Q(\lambda, m, r) \pi r^2 dr. \quad (11c)$$

Here  $N$  is a number of particles per unit volume;  $r$  is the radius of spherical particle;  $K$  is a value between 0 to 4;  $n$  is an index of the refraction of waves at the layer of particles;  $V$  is the volume of scattering particles, and  $m$  is the mass of any particle.

The above formulas account for the following physical processes caused by gaseous particles of the troposphere:

- reflection from the surface of the particle with no penetration;
- passage through the particle with and without internal reflection;
- diffraction at the edge of the particle.

### Effects of tropospheric features on signal passing the channel

Now, we will examine separately the effects of each feature on signals passing the irregular troposphere, such as the effects of rain and cloud on the signal attenuation. The effect of turbulence causing scattering of signals will be considered separately as a main source of fast fading. There are three main causes for signal attenuations: molecular ab-

sorption, effects of rain and effect of clouds. Then the effect of turbulence on scattering of signals will be presented. We will show the main parameters, the corresponding formulas, and will compute and plot their characteristics in this paragraph.

### Molecular-gaseous absorption

Gaseous molecules found in the atmosphere may absorb energy from radio-waves passing through them, thereby causing attenuation [1–3, 20]. The signal degradation depends on frequency, temperature, pressure, and water vapor concentration; and increases with them as shown in Fig. 2 calculated according to the equations below taken from ITU-676 Standard [20] for pressure  $P = 1013$  mbar, temperature  $T = 15$  °C, water vapor content  $\rho_w = 7.5$  g/m<sup>-3</sup>. The following formulas have been used for computation of dependences shown in Fig. 2.

The absorption in the atmosphere over path length  $r$  is given by [20]:

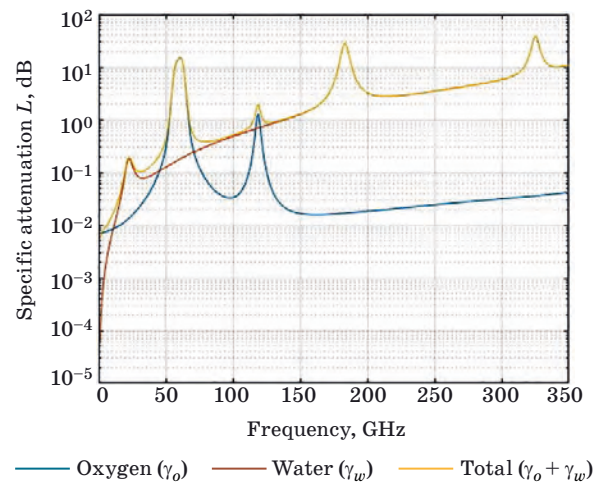
$$A = \int \gamma(r) dr, \quad (12)$$

where  $\gamma(r)$  is specific attenuation, dB/km, consisting of the sum of two components  $\gamma_o(r)$  and  $\gamma_w(r)$ , the attenuation of oxygen and water vapor, respectively:

$$\gamma(r) = \gamma_o(r) + \gamma_w(r), \quad (13)$$

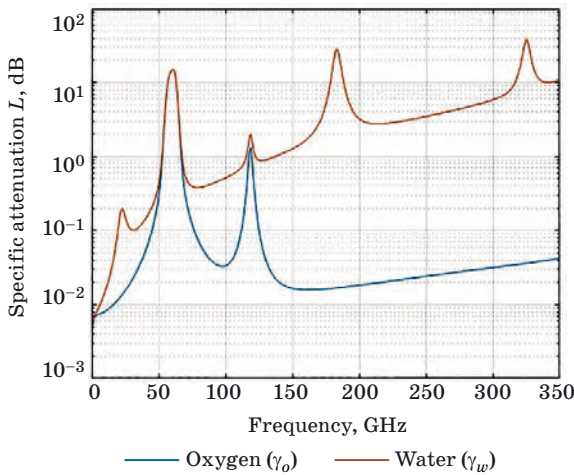
$\gamma_o(r)$  and  $\gamma_w(r)$  at the ground level (where pressure is 1013 mbar and temperature is 15 °C), are given approximately by [20]:

$$\gamma_o = \left[ 7.19 \times 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.5} \right] \times f^2 \times 10^{-3} \left[ \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right]; \quad (14)$$



■ Fig. 2. Specific attenuation for water vapor and oxygen (pressure = 1013 mbar, temperature = 15 °C, water vapor content = 7.5 g/m<sup>-3</sup>)





■ Fig. 3. The total zenith attenuation versus frequency for gaseous atmosphere with water vapor and dry air

$$\gamma_w = \left[ 0.05 + 0.0021\rho + \frac{6.09}{(f - 22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f - 18.3)^2 + 9} \right] f^2 \rho \times 10^{-4} \left[ \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right], \quad (15)$$

where  $f$  is the frequency, GHz, and  $\rho$  is the water vapor density,  $\text{g/m}^3$ .

Other temperatures are considered by correction factors of  $-1,0\%$  per  $1\text{ }^\circ\text{C}$  from  $15\text{ }^\circ\text{C}$  for dry air, and  $-0,6\%$  per  $1\text{ }^\circ\text{C}$  from  $15\text{ }^\circ\text{C}$  for water vapor.

The attenuation in the atmosphere over a path length  $L$ , for oxygen,  $L_o$ , and for water vapor,  $L_w$ , is given by [20]:

$$A_o = \gamma_o L_o; A_w = \gamma_w L_w \text{ [dB]}. \quad (16)$$

The total atmospheric attenuation [in dB] for a particular path can then be found by integrating the total specific attenuation, as shown in Fig. 3, over the total path length in the atmosphere [20] by assuming an exponential decrease in gas density with height:

$$L_a = \int_0^\pi \gamma_a(l) dl = \int_0^\pi [\gamma_o(l) + \gamma_w(l)] dl. \quad (17)$$

The attenuation for an inclined path with an elevation angle  $\theta > 10^\circ$  can then be found from the zenith attenuation  $L_z$  as [3, 20]

$$L_a = \frac{L_z}{\sin \theta} \quad (18)$$

and was computed by equations (13)–(18) following the parameters of the troposphere according to the standard ITU-676 [20].

*Effects of rain*

The attenuation of radio waves caused by rain increases with the number of raindrops along the radio path, the size of the drops, and the length of the path through which the rain passes as shown in Fig. 4 rearranged from [3].

There are several models for finding the attenuation caused by rain: Empirical [15], Semi-Empirical [14, 16], and Statistical-Analytical Models, such as Saunders’s model [3]. The Saunders’s model which was embraced by ITU, does not depend on a particular place, is not frequency dependent, has a good processing time, and can be easily implemented.

In our work we followed only the Saunders’s model. The Saunders’s model is applied when the density and shape of the raindrops are constant. According to [3], the received power  $P_r$  in a given antenna is found to drop exponentially with radio path  $r$  through the rain, and  $\alpha$  as the reciprocal of distance required for the power decreases to  $e^{-1}$  of its initial value:

$$P_r(r) = P_r(0)e^{-\alpha r}. \quad (19)$$

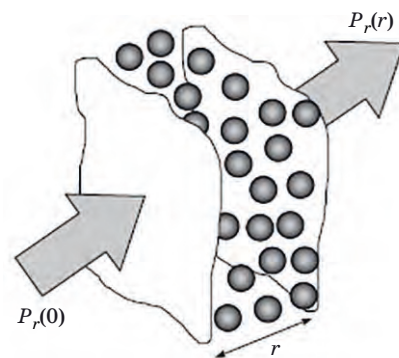
The value of  $\alpha$  is given by the integral of one dimensional (1D) distribution of the drops diameter  $D$ , denoted by  $N(D)$ , and  $C(D)$  is the effective cross-section of frequency dependent signal power attenuation by rain drops:

$$\alpha = \int_{D=0}^\infty N(D) \cdot C(D) dD. \quad (20)$$

In a real tropospheric situation, the drop diameter distribution  $N(D)$  is not a constant value and can be found by the next equation [3]:

$$N(D) = N_0 \exp\left(-\frac{D}{D_m}\right), \quad (21)$$

where  $N_0$  and  $D_m$  are parameters:  $D_m$  is a parameter that depends on the rainfall rate remeasured



■ Fig. 4. Rain path attenuation

above the ground surface in millimeters per hour;  $N_0 = 8 \times 10^3 \text{ m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ , and

$$D_m = 0.122 \cdot r^{0.21} \text{ [mm]}. \quad (22)$$

As for  $C(D)$  the attenuation cross-section from (20), can be found using *Rayleigh approximation* that is valid for lower frequencies, as was mentioned in [3], when the average drop size is smaller compared to the incident wavelength. In this case only absorption inside the drops occur and the Rayleigh approximation is valid giving a very simple expression for  $C(D)$ :

$$C(D) \propto \frac{D^3}{\lambda}. \quad (23)$$

As was mentioned in [3, 14–17], when  $N(D)$  is not constant as we described earlier in (21) we take the value of the specific attenuation at a given point on the path,  $\gamma(r)$ , and integrate over the full path length  $R$  to find the total path loss:

$$L = \int_0^R \gamma(r) dr, \quad (24)$$

while the total loss is via the specific attenuation as shown in [9] and defined by

$$\gamma = \frac{L}{r} 4.34\alpha. \quad (25)$$

Another way to describe the attenuation caused by rain is, when it increases more slowly with frequency approaching a constant value known as the *optical limit* [3]. Near this limit, scattering forms a significant part of attenuation that can be described using the *Mie* scattering theory that was described earlier [3, 4].

Expressing (25) in a logarithmic scale gives

$$L = 10 \log \left( \frac{P_T}{P_R} \right) = 4.34\alpha r. \quad (26)$$

In practical situations, we can use an empirical model which implicitly combines all of these effects, where  $\gamma$  is assumed to depend only on distance  $r$ ; whereas the rainfall rate ( $R$ ) is measured on the ground in millimeters per hour. According to [3, 14–17]

$$\gamma(f, R) = a(f)R^{b(f)}. \quad (27)$$

The attenuation coefficients  $a(f)$  and  $b(f)$  can be found and calculated in [3, 15, 12]. The attenuation for a given path where the elevation angle  $\theta$  is smaller than  $90^\circ$  makes it necessary to account for the variation in the rain in the horizontal direction. This allows us to focus on the finite size of rain clouds, called *rain cells*.

Also, rain varies in time over various parameters: seasonal, annual and diurnal. It is important to realize that it is not the total amount of rain which falls during a given year that matters, but rather the period of time for which the rainfall rate exceeds a certain value. All of these temporal variations were estimated by use of (28) for rain attenuation, which does not exceed 0.01 % of the time. Thus, according to [3]:

$$L_{0.01} = a(f)R_{0.01}^{b(f)s_{0.01}R}, \quad (28)$$

where  $s_{0.01}$  can be found in [3]. For time percentages other than 0.01 %, the attenuation can be corrected by introducing special relevant time percentage  $P$ , which is changed over the wide range from 0.001 to 1 % [3], that is:

$$L(P) = L_{0.01} \times 0.12P^{-(0.546 + 0.043 \log P)}. \quad (29)$$

The precipitation of rain is defined by variations in both horizontal and vertical directions that make in very hard to describe the spatial distribution of rain. The correction factor we use in (28) is the effective path length [the exponent  $s_{0.01}r_R$  in (28)],  $L_r$ , which is the length of the hypothetical path obtained from signal data, dividing the total attenuation by the specific attenuation exceeded for the same percentage of time [3]. It can be estimated, according to empirical model [15] as

$$L_r = \frac{L_s}{1 + 0.0286L_h R^{0.15}}. \quad (30)$$

Using equations (27) and (30) we can now estimate that the transmission loss due to attenuation by rain is given by

$$A_r = \gamma_r L_r. \quad (31)$$

#### Effects of clouds

As was mentioned earlier, the dimension, shape, structure and texture of clouds are influenced by air movements that change their formation and growth, and by the properties of the cloud particles. Sky cover is the observer view of the cover of the sky dome, whereas cloud cover can be used to describe areas that are smaller or larger than the floor space of the sky dome [2]. There are several proposed models for the probability distribution of the sky cover [11–13]. For our prediction of the cloud attenuation, we will use the ITU-R model given in [11].

**Specific attenuation for clouds.** The specific attenuation due to a cloud can be determined by [2]

$$\gamma_c = K_1 M \left[ \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right], \quad (32)$$

where  $\gamma_c$  is the specific attenuation of the clouds, dB/km;  $K_1$  is the specific attenuation coefficient, (dB/km)/(g/m<sup>-3</sup>);  $M$  is liquid water density, g/m<sup>-3</sup>.

For small size cloud droplets, the *Rayleigh approximation* can be used for the calculation of specific attenuation [2]. This approximation is valid up to 100 GHz. A mathematical model based on Rayleigh scattering, which uses a double-Debye model for the dielectric permittivity  $\varepsilon(f)$  of water, can be used to calculate the value of  $K_1$ :

$$K_1 = \frac{0.8197f}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \left[ \frac{\text{dB}}{\text{km}} \right] \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^{-3}} \right]^{-1}, \quad (33)$$

where  $f$  is the frequency, GHz, and  $\eta$  defined as

$$\eta = \frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}, \quad (34)$$

where  $\varepsilon'$  and  $\varepsilon''$  are the real and imaginary components of the complex dielectric permittivity of water. For the calculation of the complex dielectric permittivity of water, we need to calculate the principle and secondary frequencies of the double Debye model for the dielectric permittivity of water:

$$f_p = 20.09 - 142(\Phi - 1) + 294(\Phi - 1)^2; \quad (35a)$$

$$f_s = 590 - 1500(\Phi - 1), \quad (35b)$$

where  $\Phi = 300/T$ ,  $T$  is the temperature, K. Now we can define the complex dielectric permittivity of water as

$$\varepsilon'(f) = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2} + \varepsilon_2; \quad (36)$$

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p \left(1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2\right)} + \frac{f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s \left(1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2\right)}, \quad (37)$$

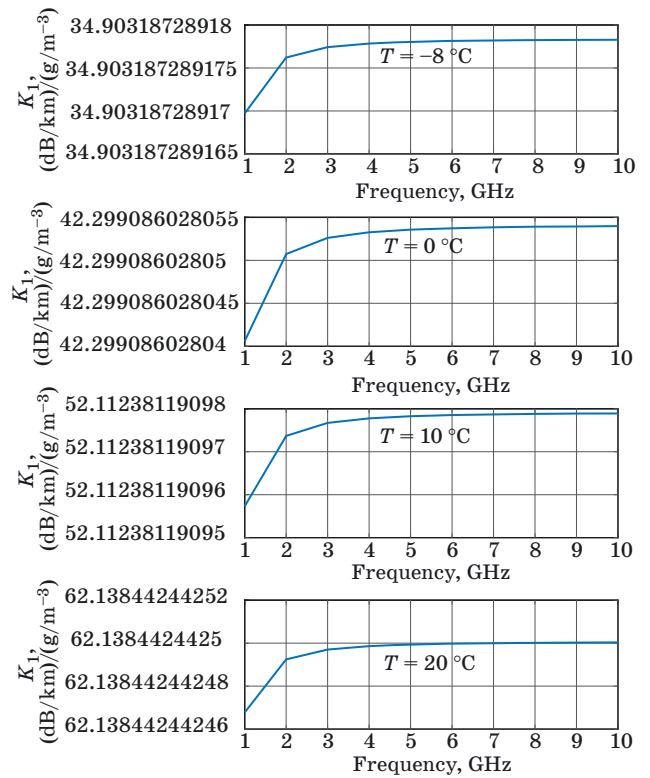
where  $\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\Phi - 1)$ ;  $\varepsilon_1 = 5.48$ ;  $\varepsilon_2 = 3.51$ .

Figure 5, computed by using the above formulas, shows the values of the specific attenuation  $K_1$  at frequencies from 1 to 5 GHz and temperatures between  $-8$  and  $20$  °C.

**Total cloud attenuation.** Finally, we can determine the total cloud attenuation:

$$A = \frac{LK_1}{\sin(\theta)}, \quad (38)$$

where  $L$  is the total columnar content of liquid water, kg/m<sup>2</sup>, or, equivalently, in millimeters of



■ Fig. 5. Specific attenuation for clouds as a function of frequency and temperature

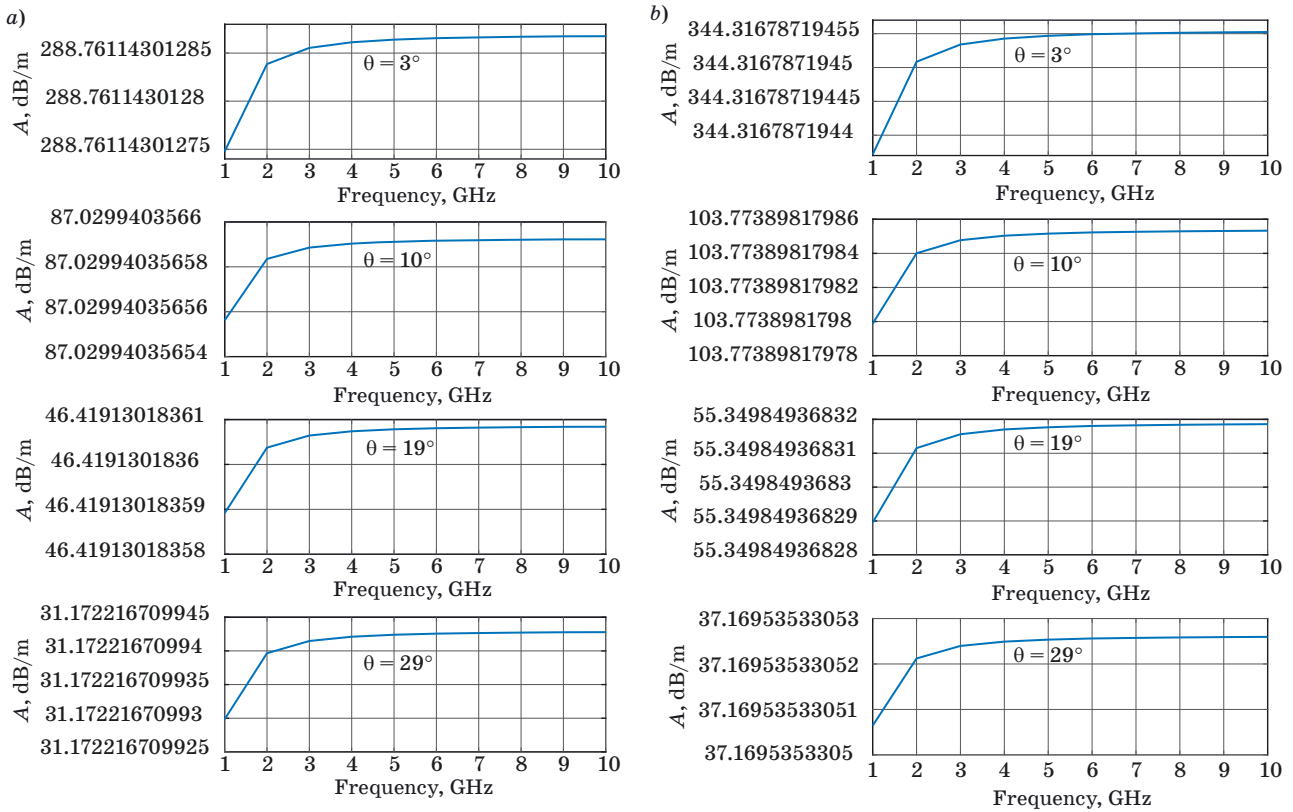
evaporated water;  $K_1$  is the specific attenuation coefficient as described earlier in (33), (dB/km)/(g/m<sup>-3</sup>);  $\theta$  is the elevation angle ( $5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ).

Figure 6 shows total cloud attenuation as a function of frequency, for elevation angles from  $3$  to  $29^\circ$  [11]. Our computations are based on liquid water content of  $0.29$  kg/m<sup>3</sup>.

#### Effects of turbulence

Atmospheric turbulence is a chaotic phenomenon created by the random temperature, wind magnitude variation, and direction variation in the propagation [4]. This chaotic behavior resulting in index-of-refraction fluctuations, causes Doppler shift and fast fading phenomena. As is common for describing atmospheric turbulence, we use Turbulence Power Spectra that are divided into three regions by two scale sizes:  $L_0$  — the outer scale of the turbulence varies between  $10$  to  $100$  m and  $l_0$  — the inner scale typically observed from  $1$  to  $30$  mm. The regions that are divided by those scales are called *scintillations* in the literature [4–7].

**Scintillation index.** The scintillation index (normalized variance of signal intensity fluctuations)  $\sigma_I^2$  describes fluctuations in optical power as measured by a point detector. The scintillation index is defined by [4–7]



■ Fig. 6. Total cloud attenuation as a function of frequency, for elevation angles from 3 to 29°: a —  $T = 10\text{ °C}$ ; b —  $T = 20\text{ °C}$

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1. \quad (39)$$

It relates to the Rytov variance (log-amplitude variance)  $\sigma_R^2$  according to [4–7]. According to [23] the Rytov approximation starts from the premise that an air mass behaves as a fluid. Assuming that the refractive index structure parameter is constant, the basic Rytov approximation relative variance is [6, 23]:

$$\sigma_R^2 = 1.23 \cdot C_n^2 \cdot k^{7/6} \cdot L^{11/6}, \quad (40)$$

where  $C_n^2$  is the refractive index structure parameter;  $k$  is the wave number,  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $L$  is the distance, km. Figure 7 illustrates behavior of the Rytov’s scintillation index vs. distance between the terminals  $L$  for various  $f$  and refraction structure parameters  $C_n^2$ .

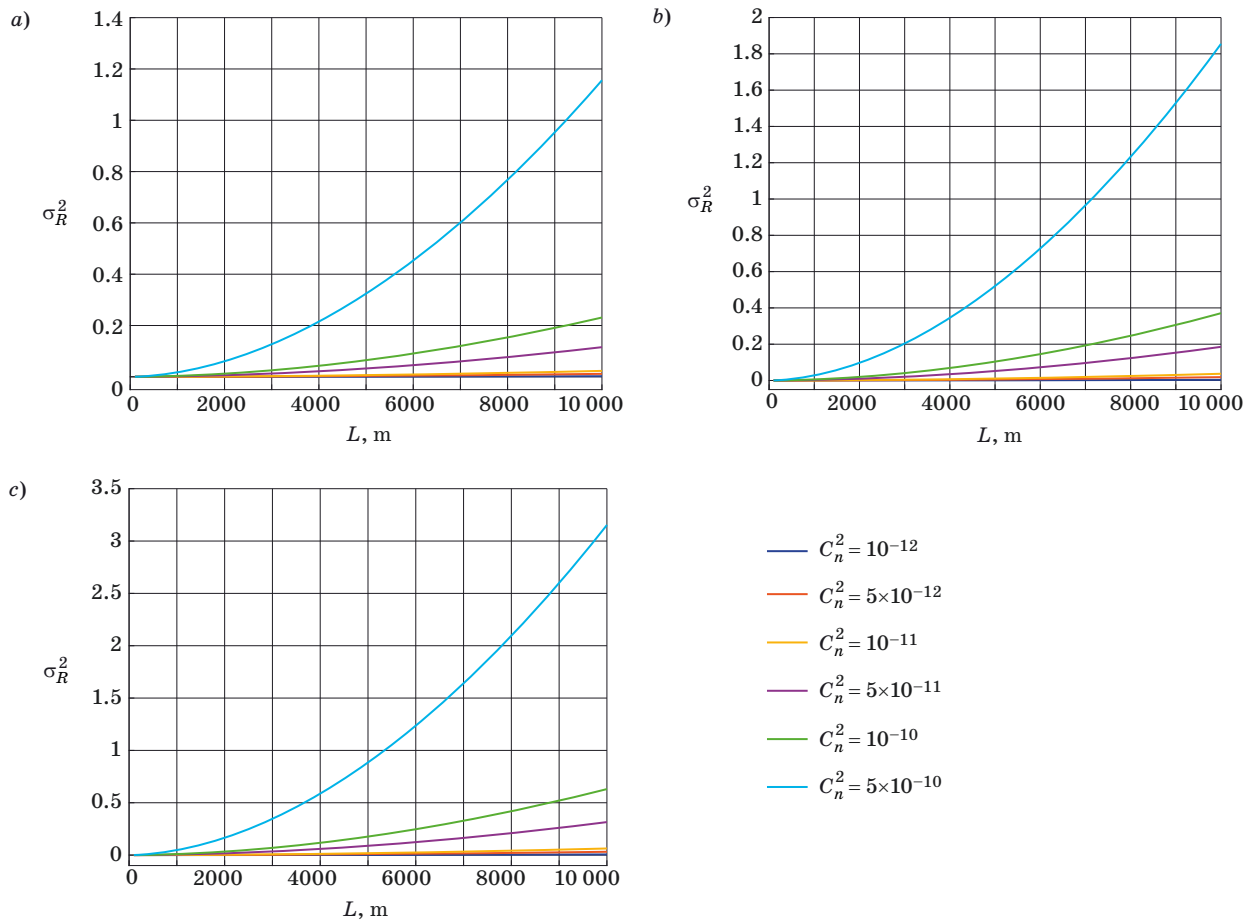
As can be seen from Figs. 7, *a-c*, much stronger turbulence (with increase of  $C_n^2$ ) in the atmosphere, leads to higher deviations of signal intensity variations — the effect increases non-linearly with an increase of range between the source and the detector. This increase effect is also clearly seen from results of computations presented in Fig. 8, where

the same Rytov’s scintillation index is presented as a function of  $C_n^2$  for three frequencies,  $f = 2.5, 3.3,$  and  $5.2$  GHz, that are usually used in land-atmospheric communication networks (namely, in Wi-Fi wireless communication).

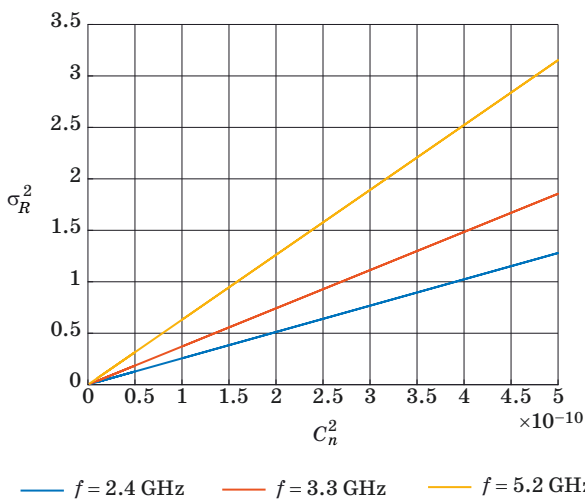
As can be seen from Fig. 8, with the increasing of frequencies, the Rytov’s scintillation index increases linearly as a function of  $C_n^2$ . Consequently, the fading effect becomes significant for signals passed over the turbulent atmospheric channel. Moreover, with an increase of frequency from 2.4 to 5.2 GHz, the scintillation index increases roughly twice thus causing strong fading of signals passing through a turbulent tropospheric channel.

It was shown experimentally [6, 7, 23] that the signal intensity scintillations, caused by quasi-local atmospheric turbulence, are distributed log-normally. In this case, it can be suggested that the fluctuations of the radio or optical signals are weak. The normalized standard deviation of this distribution is proportional to the Rytov’s approximation and can be written now via the structure parameter of turbulence permittivity  $C_\epsilon^2$  (instead of the structure parameter of refractivity  $C_n^2$ ) as [6, 7, 23]

$$\sigma_I^2 = 0.12 \cdot C_\epsilon^2 \cdot k^{7/6} \cdot L^{11/6}. \quad (41)$$



■ Fig. 7. Rytov's scintillation index vs. distance between the terminals  $L$  for various refraction structure parameters of the turbulent atmosphere  $C_n^2$ : a —  $f = 2.4$  GHz; b —  $f = 3.3$  GHz; c —  $f = 5.2$  GHz



■ Fig. 8. Rytov's scintillation index vs.  $C_n^2$  for different frequencies  $f$

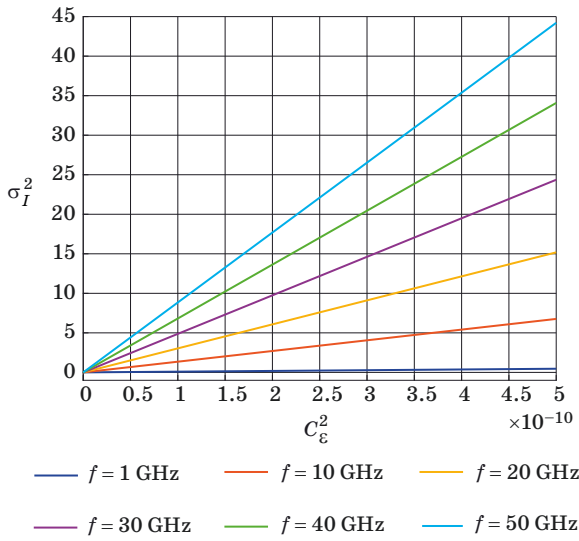
We should note that  $C_n^2$  is the structure constant of the turbulence permittivity averaged over the path  $L$  [km],  $k$  is the wave number mentioned above.

In Fig. 9 we present the computed index of signal intensity scintillations versus the structure constant of the turbulence averaged over the path for different frequencies from 1 to 50 GHz.

It can be seen that approximately for  $C_n^2 = 10^{-10}$  the signal immediately starts to deteriorate; and as the frequency increases, the index of signal intensity scintillations becomes twice as strong. This result is very important for us because it helps us predict the fast fading of the signal within land aircraft radio communication links passing through the turbulent troposphere and operating at frequencies in the L/X-band ( $f > 1...10$  GHz).

The fast fading of the signal at open paths is caused mainly by multipath propagation and turbulent fluctuations of the refractive index. The fluctuations of the signal intensity due to turbulence are distributed log-normally with the normalized standard deviation described by the Rytov variance. For weak fluctuation with the Rytov method, the scintillation index can be expressed in the following form:

$$\sigma_I^2 = \exp(4\sigma_R^2) - 1. \quad (42)$$



■ Fig. 9. Index of signal intensity scintillations versus the structure constant of the turbulence averaged over the path for frequencies from 1 to 50 GHz for  $L = 10$  km

The turbulence attenuation related to scintillation is equal to  $\sigma_R^2$  [dB] and thus the relation for turbulence attenuation  $\gamma_R$  according to Rytov's theory of regular turbulence can be written as [6, 7]

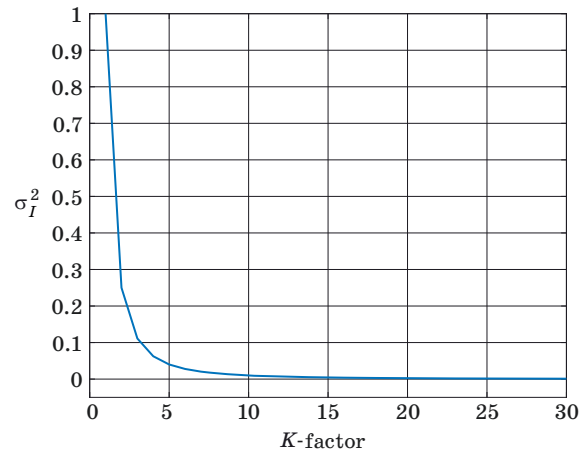
$$\gamma_R = 2\sqrt{23.17 \cdot C_\epsilon^2 \cdot k^{7/6} \cdot L^{11/6}}. \quad (43)$$

**Relation of scintillation index and K-parameter of fast fading.** Another way to calculate the attenuation due to fast fading effects is to use the relations between  $K$  and the scintillation index  $\sigma_I$ . Usually in land wireless communication, instead of  $\sigma_I^2$  parameter of fading  $K$  is used [4, 5]. For Gaussian distribution described zero-mean random process of turbulent structures evolution (usually observed experimentally in the irregular atmosphere), we could define the relation between the Ricean parameter of fading  $K$ , introduced above, and the scintillation index  $\sigma_I$  as

$$\langle \sigma_I^2 \rangle = \frac{\langle [I - \langle I \rangle]^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} = \frac{I_{inc}^2}{I_{co}^2} \equiv K^{-2}, \quad (44)$$

where  $I_{co}$  and  $I_{inc}$  are the coherent and incoherent components of the total signal intensity. Results of computations according to (44) are shown in Fig. 10.

The range  $\langle \sigma_I^2 \rangle$  of the scintillation index variations, from 0.2 to 0.8, was obtained from numerous experiments, where relations between this parameter and the refractivity of the turbulence in the irregular atmosphere were taken into account [4–7, 25, 26]. Thus, from experiments described



■ Fig. 10. Scintillation index vs. Ricean fading parameter  $K$

there, it was estimated:  $\sim C_n^2 \approx 10^{-15} m^{-2/3}$  and  $\sim C_n^2 \approx 10^{-13} m^{-2/3}$ , for a nocturnal and a diurnal atmosphere at the height around 1–2 km, respectively. As follows from (44), for  $\langle \sigma_I^2 \rangle$  changing from 0.2 to 0.8, the fading parameter  $K$  changes from  $\sim 1.2$ – $1.3$  to  $\sim 3.5$ – $3.8$ . This indicates the existence of direct visibility between both terminals, the source and the detector, accompanied by the weak additional effects of multipath phenomena caused by multiple scattering of signals at the turbulent structures, formed in the disturbed atmospheric regions, observed experimentally [5, 7, 25, 26]. In other words, a non-linear relation between  $K$  and  $\sigma_I^2$  states: when  $K$  is high the scintillation index is low and vice versa; when  $\sigma_I^2$  grows to its maximum value, parameter  $K$  reduces to its minimum value. When this occurs, we get the worst Rayleigh distribution and the biggest attenuation. The  $K$ -parameter can be used to determine the capacity, spectral efficiency, and BER of data stream sent via communication channel.

*To be continued.*

### References

1. Zuev V. E., and G. M. Krekov. *Optical Methods in the Atmosphere*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986.
2. Kopeika N. S. *A System Engineering Approach to Imaging*, Billingham, WA, SPIE Press, 1998. 704 p.
3. Saunders S. R. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. John Wiley & Sons, New York, 2007. 546 p.
4. Blaunstei N., and Ch. Christodoulou. *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links: Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric*. Wiley InterScience, NJ, 2007. 614 p.

5. Blaunstein N., and Ch. Christodoulou. *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Networks: Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric*, Wiley, NJ, 2014. 704 p.
6. Blaunstein N., Arnon Sh., Zilberman A., and Kopeika N. *Applied Aspects of Optical Communication and LIDAR*. New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 262 p.
7. *Optical Waves and Laser Beams in the Irregular Atmosphere*. Ed. by N. Blaunstein, and N. Kopeika. Boca Raton, FL, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. 334 p.
8. d'Almeida G. A., Koepke P., Shettle E. P. *Atmospheric Aerosols. Global Climatology and Radiative Characteristics*. Deepak Publishing, Hampton, 1991. 561 p.
9. Deirmendjian D. *Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions*. American Elsevier, New York, 1969. 318 p.
10. Seinfeld J. H. *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. John Wiley & Sons, New York, 1986. 768 p.
11. Attenuation due to clouds and fog. *ITU-R Recommendation International Telecommunication Union*, 1992, pp. 840–842.
12. Chou M. D. Parametrizations for cloud overlapping and shortwave single scattering properties for use in general circulation and cloud ensemble models. *J. Climate*, 1998, vol. 11, pp. 202–214.
13. Wei Zhang. Scattering of radiowaves by a melting layer of precipitation in backward and forward directions. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, vol. 42, no. 3, pp. 347–356.
14. Crane R. K. Prediction of attenuation by rain. *IEEE Trans. Commun.*, 1980, vol. 28, pp. 1717–1733.
15. Lin D. P., and Chen H. Y. An empirical formula for the prediction of rain attenuation in frequency range 0.6–100 GHz. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 2002, vol. 50, pp. 545–551.
16. *ITU-R Recommendation International Telecommunication Union “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods”*, Geneva, 1992, p. 838.
17. Kooi P.-S., Leong M.-S., Li L.-W., et al. Microwave attenuation by realistically distorted raindrops: Part II — predictions. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, vol. 43, pp. 821–828.
18. Jaenicke R. *Aerosol Physics and Chemistry*. In: *Physical Chemical Properties of the Air, Geophysics and Space Research*, vol. 4 (b). Ed. G. Fisher. Berlin, Springer-Verlag, 1988.
19. Rosen J. M., and Hofmann D. J. Optical modeling of stratospheric aerosols: present status. *Appl. Opt.*, 1986, vol. 25(3), pp. 410–419.
20. *ITU-R International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation “Attenuation by atmospheric gases”*, 1997, pp. 676–683.
21. *ITU-R Recommendation International Telecommunication Union “Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems”*, 1997, pp. 530–537.
22. *ITU-R Recommendation International Telecommunication Union “Characteristics of precipitation for propagating modeling”*, 1992, p. 837.
23. Ishimaru A. *Wave Propagation and Scattering in Random Media*. Academic Press, New York, 1978. 272 p.
24. Andrews L. C., and Phillips R. L. *Laser Beam Propagation through Random Media*. 2<sup>nd</sup> Ed. SPIE Press, Bellingham, WA, USA, 2005. 808 p.
25. Bendersky S., Kopeika N., and Blaunstein N. Prediction and modeling of line-of-sight bending near ground level for long atmospheric paths. *Proc. of SPIE Int. Conf.*, San Diego, August 3–8, 2004, pp. 512–522.
26. Bendersky S., Kopeika N., and Blaunstein N. Atmospheric optical turbulence over land in middle-east coastal environments: prediction, modeling and measurements. *J. Applied Optics*, 2004, vol. 43, pp. 4070–4079.

## Обзор методов случайного множественного доступа к общему каналу для сценариев массовой межмашинной связи

Н. В. Матвеев<sup>а</sup>, старший преподаватель, [orcid.org/0000-0002-9746-4746](https://orcid.org/0000-0002-9746-4746), [n.matveev@k36.org](mailto:n.matveev@k36.org)

А. М. Тюрликов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-7132-094X](https://orcid.org/0000-0001-7132-094X), [turlikov@k36.org](mailto:turlikov@k36.org)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Постановка проблемы:** наличие большого числа устройств в крупномасштабных системах межмашинной связи (Massive Machine Type Communication) приводит к необходимости применять методы случайного множественного доступа к общему каналу связи. Во многих работах предлагается для повышения эффективности использования канала применять методы помехоустойчивого кодирования при разрешении конфликтов (Coded Random Access). Разнообразие вариантов их систем связи привело к невозможности сравнивать алгоритмы, реализующие этот подход, что является проблемой, сдерживающей развитие как теории, так и практики использования методов помехоустойчивого кодирования при разрешении конфликтов. **Цель исследования:** разработка единого подхода к описанию алгоритмов случайного множественного доступа; выполнение на базе этого подхода обзора и сравнительного анализа алгоритмов, в которых методы помехоустойчивого кодирования используются при разрешении конфликтов. **Результаты:** сформулирована модель системы случайного множественного доступа в виде набора допущений, отражающих особенности как различных вариантов сценария крупномасштабных систем межмашинной связи, так и алгоритмов случайного множественного доступа, в том числе и подходов Coded Random Access. Проведена классификация моделей систем по следующим признакам: 1) конечное и бесконечное число абонентов; 2) стабильные, нестабильные и метастабильные системы; 3) системы с повторными передачами и без повторных передач; 4) системы с потерями и без потерь данных. Для системы с потерями определены основные характеристики: доля успешно доставленных сообщений (Throughput) и вероятность потери сообщения (Packet Loss Rate). Для системы без потерь также определены основные характеристики — скорость алгоритма и средняя задержка. Проведены систематизированный обзор и сравнительный анализ алгоритмов Coded Random Access. Результат сравнительного анализа представлен в табличной форме. **Практическая значимость:** предложенная модель системы случайного множественного доступа может быть использована как методическая основа для исследования и разработки алгоритмов случайного множественного доступа существующих и новых вариантов сценариев для крупномасштабных систем межмашинной связи. Систематизированные результаты обзора позволяют определить перспективные направления исследований в области систем передачи данных для интернета вещей.

**Ключевые слова** — уровень доступа к среде, слотовый ALOHA, крупномасштабные системы межмашинной связи, последовательное погашение интерференции, случайный кодовый доступ, 5G, алгоритм слотовый ALOHA с нерегулярным числом копий.

**Для цитирования:** Матвеев Н. В., Тюрликов А. М. Обзор методов случайного множественного доступа к общему каналу для сценариев массовой межмашинной связи. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 6, с. 54–67. doi:10.31799/1684-8853-2019-6-54-67

**For citation:** Matveev N. V., Turlikov A. M. Review of random multiple access methods for massive machine type communication. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 54–67 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-54-67

### Введение

В настоящее время получает бурное развитие так называемый интернет вещей. В данной работе мы не будем рассматривать концепцию интернета вещей в целом, а ограничимся рассмотрением различных вариантов организации передачи данных от большого числа устройств по общему каналу связи в системах интернета вещей, которые объединяются под общим названием крупномасштабные системы межмашинной связи (Massive Machine Type Communication — mMTC) [1, 2]. Сценарий mMTC не предусматривает высокую мобильность устройств, не накладывает жестких ограничений на время доставки сообщений. Ключевая особенность данного сценария —

это наличие очень большого числа устройств, у которых в случайные моменты времени возникают сообщения, которые должны быть переданы по общему каналу на базовую станцию (БС). Следует отметить, что данная задача встала задолго до появления концепции интернета вещей. Для ее решения используется метод случайного множественного доступа (СМД). Исследование и разработка алгоритмов, реализующих этот метод, ведется более сорока лет. На практике алгоритмы СМД позволяют обеспечить достаточно небольшую задержку, но при этом канал используется неэффективно. В последнее десятилетие появилось большое число работ, в которых предлагается для повышения эффективности разделения канала применять методы помехоустойчи-



вого кодирования при разрешении конфликтов. В англоязычной литературе такие подходы получили название Coded Random Access (CRA) [3, 4].

Разнообразие вариантов использования подхода CRA привело к невозможности сравнения в одинаковых условиях алгоритмов, реализующих этот подход. Это является проблемой, сдерживающей развитие теории СМД в сочетании с методами помехоустойчивого кодирования.

В настоящей работе предложен единый подход к описанию алгоритмов СМД, на базе которого выполнены обзор и сравнительный анализ алгоритмов СМД, реализующих подход CRA.

### Классическая модель случайного множественного доступа

Рассмотрим систему с одной БС и множеством абонентов, у которых появляются короткие сообщения для передачи. Каждый абонент по восходящему каналу связи отправляет свое сообщение на БС.

Для такой системы можно использовать модель СМД, которая была предложена в конце 70-х годов в работах Б. С. Цыбакова [5, 6] и Дж. Капетанакиса [7]. Так как эта модель послужила основой для всех дальнейших работ в области СМД, в статье эту модель мы будем называть *классической моделью СМД*.

Классическая модель СМД [5–7] строится на следующей системе допущений.

*Допущение 1:* Все время в системе разделено на слоты — равные промежутки времени. Время передачи одного сообщения равно одному слоту. Есть синхронизация по слотам, абоненты и БС знают начало и конец слотов.

*Допущение 2:* Поскольку рассматривается случай с суммирующим каналом без шума, то в зависимости от числа сообщений, которые передавались в одном слоте, возможно одно из трех событий:

- 1) успех, когда в слоте передавалось одно сообщение;
- 2) пусто, когда в слоте не передавалось ни одного сообщения;
- 3) конфликт, когда передавалось два и более сообщений.

*Допущение 3:* В конце слота все абоненты и БС достоверно узнают, какое событие произошло в канале.

*Допущение 4:* Число сообщений, поступающих в систему в каждом окне, случайно и распределено по закону Пуассона с параметром  $\lambda$ . Относительно числа абонентов в данной работе мы будем использовать два варианта допущений:

4.1) число абонентов зафиксировано и равно некоторому конечному значению, которое да-

лее будем обозначать  $m < \infty$ . У каждого абонента есть буфер на бесконечное число сообщений, это условно обозначим  $b = \infty$ . Каждое поступающее в систему сообщение равновероятно помещается в буфер одного из абонентов. Это эквивалентно тому, что на вход каждого абонента поступает пуассоновский поток сообщений интенсивностью  $\lambda/m$ . Такой вариант допущения впервые был введен в работе [6];

4.2) абонент и сообщение тождественны, т. е. в каждом окне в систему поступает случайное число абонентов и у каждого абонента буфер на одно сообщение ( $b = 1$ ). Такое допущение было введено в работах [5, 7], при этом предполагалось, что абонент остается в системе до тех пор, пока его сообщение не будет успешно доставлено на БС. Следует отметить, что допущение 4.2 может быть получено из допущения 4.1 путем предельного перехода  $m \rightarrow \infty$  при фиксированном значении  $\lambda$ , потому допущение 4.2 часто условно обозначают  $m = \infty$  и говорят, что в системе имеется бесконечное число абонентов.

*Алгоритмом случайного множественного доступа* называется правило, в соответствии с которым каждый абонент, имеющий готовое к передаче сообщение, в начале каждого слота решает, передавать сообщение или нет [5, 6].

В классической модели рассматривается алгоритм доступа с повторными передачами. Если абоненту не удалось успешно передать сообщение, то он снова пытается его передать. Одной из основных характеристик алгоритма для системы с повторными передачами является средняя задержка передачи сообщения. Для некоторого алгоритма доступа  $A$  под задержкой  $\delta_A^t(\lambda)$  понимается интервал времени от момента  $t$  — генерации сообщения абонентом — до момента его успешной передачи. Средней задержкой называется величина  $D_A(\lambda) = \limsup_{t \rightarrow \infty} \mathbf{E}[\delta_A^t(\lambda)]$ .

Следующей характеристикой алгоритмов СМД является их скорость. Под скоростью некоторого алгоритма  $A$  понимается верхняя грань интенсивности входного потока, при котором алгоритм обеспечивает конечную среднюю задержку передачи сообщения  $R_A = \sup\{\lambda : D_A(\lambda) < \infty\}$ .

Применительно к системам СМД часто используют понятия стабильности и метастабильности [8, 9]. Систему СМД называют стабильной, если на неограниченном интервале времени средняя задержка конечна. При использовании большинства алгоритмов СМД процесс функционирования системы можно описать марковской цепью со счетным числом состояний. В этом случае понятие стабильности соответствует понятию эргодичности данной цепи [5]. Система СМД при использовании некоторого алгоритма  $A$  является стабильной, если интенсивность входного потока  $\lambda$

меньше скорости алгоритма  $R_A$ . Далее для краткости изложения, характеризуя стабильность работы системы при использовании некоторого алгоритма СМД, будем говорить, что алгоритм СМД является стабильным. Алгоритм СМД называют нестабильным, если только на ограниченном интервале времени средняя задержка конечна, но с увеличением времени работы системы задержка начинает неограниченно возрастать. Нестабильный алгоритм называют метастабильным в том случае, если этот интервал времени имеет достаточно большую длительность. Следует отметить, что многие алгоритмы СМД, которые используются на практике, являются метастабильными. Один из самых распространенных на практике алгоритмов СМД — алгоритм ALOHA (в котором предполагается, что абонент передает сообщение с постоянной вероятностью) — является стабильным или нестабильным в зависимости от того, какое из допущений, 4.1 или 4.2, справедливо. При выполнении 4.1 алгоритм стабилен до интенсивности входного потока  $e^{-1}$ . При выполнении условия 4.2 алгоритм нестабилен при любой интенсивности входного потока, отличной от нуля, но метастабильно до интенсивности входного потока, равной  $e^{-1}$ .

Применительно к классической модели в работах [5, 7] были предложены так называемые древовидные алгоритмы. В работе [10] описана взаимосвязь различных вариантов древовидных алгоритмов и показано, что алгоритмы из работ [5, 7] имеют скорость, приблизительно равную  $(3/2 \ln(2) + 1/2)^{-1} \approx 0,375$ . Так называемый алгоритм дробления [11] является развитием идеи древовидных алгоритмов и имеет скорость порядка 0,487. Хотя с момента появления работы [11] прошло почти 40 лет, алгоритм, который имеет большую скорость применительно к классической модели СМД, не был найден. При этом следует отметить, что в работе [12] формулируется гипотеза о возможности существования такого алгоритма.

В работе [13] предлагается расширить возможности БС по сравнению с классической моделью. Это расширение может быть сформулировано в виде дополнительного допущения для классической модели.

*Допущение 5:* Базовая станция запоминает сумму сигналов, принятых от нескольких абонентов в тех окнах, где произошел конфликт. При успехе БС может вычестить успешно принятый сигнал из ранее запомненной суммы.

В ряде работ [3, 4, 13–17], описывая допущение 5, говорят, что на БС реализована процедура последовательного погашения интерференции (Successive Interference Cancellation).

В работе [13] предложена модификация древовидного алгоритма, которая при выполнении до-

пущения 5 обеспечивает скорость, равную  $\ln(2)$ . В реальных системах из-за различных факторов (шумов в канале, ограничений сложности алгоритмов и т. п.) допущение 5 может не всегда выполняться, при этом алгоритм из [13] не может быть реализован. Обобщение идеи [13] было сделано в статье [14] для случая, когда в канале есть шум.

В последующих разделах классическая модель системы СМД рассматривается как методическая основа для описания различных направлений исследований и разработок алгоритмов, в которых методы помехоустойчивого кодирования используются для разрешения конфликтов.

### Использование CRA при передаче данных на базовую станцию

Как отмечалось во введении, в последнее десятилетие появились новые подходы к реализации метода СМД, получившие название Coded Random Access. Эти методы можно рассматривать как дальнейшее развитие идеи Гианакиса [13] в сочетании с использованием методов помехоустойчивого кодирования для разрешения конфликтов. При рассмотрении этих методов мы будем прибегать к ранее рассмотренной системе из пяти допущений. При описании модели из работ [3, 4, 15–17] оставим допущения 2, 4, 5 без изменений и изменим допущения 1 и 3.

*Допущение 1:* Все время разделено на фреймы, а фреймы в свою очередь разделены на слоты. В одном фрейме  $n$  слотов. В системе есть синхронизация по фреймам и слотам.

*Допущение 3:* В конце фрейма БС отправляет сообщение по широкополосному каналу со списком абонентов, которые успешно передали свое сообщение.

С учетом введения фрейма изменим и работу алгоритма СМД:

Абонент решает, передавать или нет сообщение, в начале фрейма. Если абонент принял решение передавать, он определяет число копий и номера слотов, в которых передаются копии. Каждая копия содержит данные о том, в каких слотах передавалось сообщение от данного абонента.

Число копий может быть постоянной величиной, как в алгоритме Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA (CDRSA) [17] (например, каждый абонент всегда передает 2 копии), или случайной величиной, как в алгоритме Irregular Repetition Slotted ALOHA (IRSA) [15, 16]. В [15] каждый абонент независимо от других формирует эту случайную величину по следующему правилу.

Каждый абонент, независимо от других абонентов, с вероятностью 0,5 передает 2 копии, с вероятностью 0,28 передает 3 копии и с вероятностью

0,22 передает 8 копий. Кратко это правило работы записывается в виде следующего полинома:

$$\lambda_1(x) = 0,5x^2 + 0,28x^3 + 0,22x^8.$$

Базовая станция запоминает все дискретные отчеты сигналов за время фрейма. При успешном декодировании сообщения в каком-то слоте БС вычитает сигнал из слотов, в которых передавались копии этого сообщения.

Для иллюстрации работы БС на рис. 1 приведен пример фрейма с  $n = 5$  слотами, где  $m = 4$  абонентов пытаются выполнить передачу.

Абоненты 1, 2 и 4 передают 2 копии сообщения, в то время как пакет абонента 3 повторяется три раза. Полученный фрейм на БС содержит только один слот с успешно принятым сообщением. На первой итерации декодирования пакет абонента 3 декодируется во втором слоте. Копии его сообщения вычитаются из слотов 1 и 4 (рис. 2, а).

	Слот 1	Слот 2	Слот 3	Слот 4	Слот 5
Абонент 1	■				■
Абонент 2			■		■
Абонент 3	■	■		■	
Абонент 4			■	■	

■ **Рис. 1.** Передача сообщений в одном фрейме от четырех абонентов

■ **Fig. 1.** Messaging in one frame from four users

В начале второй итерации присутствуют два слота с успехами, которые обозначены зеленым цветом (рис. 2, б). Сообщение абонента 1 декодируется в слоте 1, и сообщение абонента 4 декодируется в слоте 4. Копии сообщения от абонента 1 вычитаются из слота 5, а копии от абонента 4 удаляются из слота 3. На третьей и последней итерации (рис. 2, в) пакет пользователя 2 декодируется (обращаем внимание, что в этом случае обе копии доступны без помех). В этот момент больше нет пакетов для декодирования (рис. 2, г).

Общий алгоритм работы БС выглядит следующим образом.

1. Базовая станция принимает сигналы за все время фрейма.

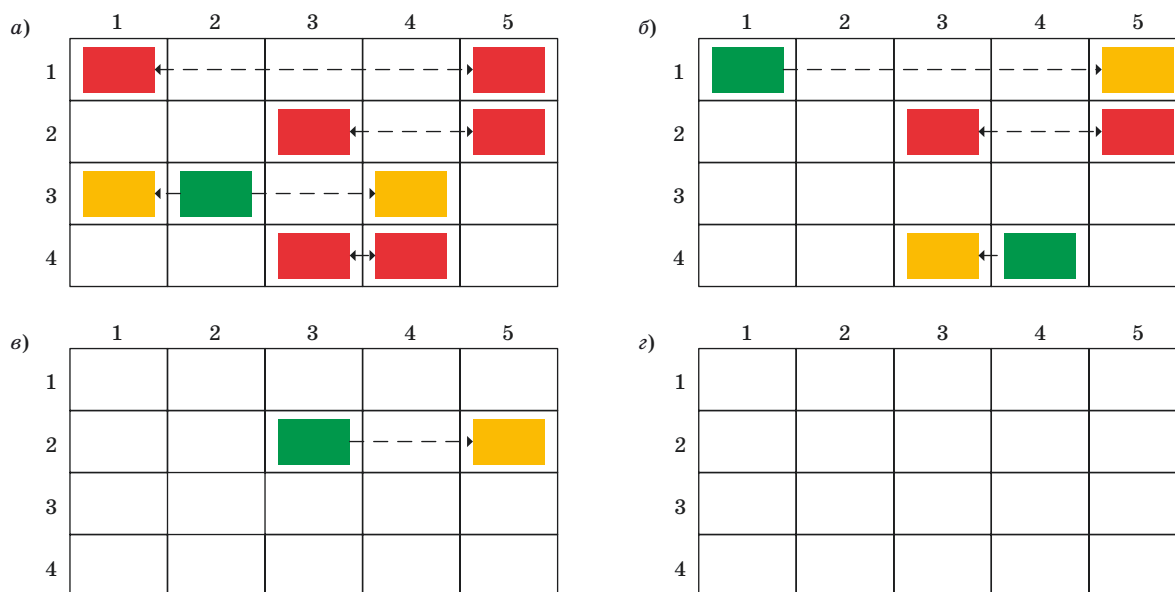
2. Если в фрейме есть слот, в котором передавал один абонент, и число работы итераций не превысило некоторого значения  $I_{\max}$ , выполняется шаг 3, иначе шаг 5.

3. Декодирование сообщения в слоте с номером  $i$ . После декодирования БС узнает, в каких слотах содержатся копии сообщения. Сигнал с сообщением вычитается из слотов, в которых передавались копии.

4. Поиск нового слота с успехом. Если номер слота  $j$  с успехом  $j \leq n$  и  $j > i$  — переход на шаг 3, если обошли все слоты и итерация закончена — переход на шаг 2.

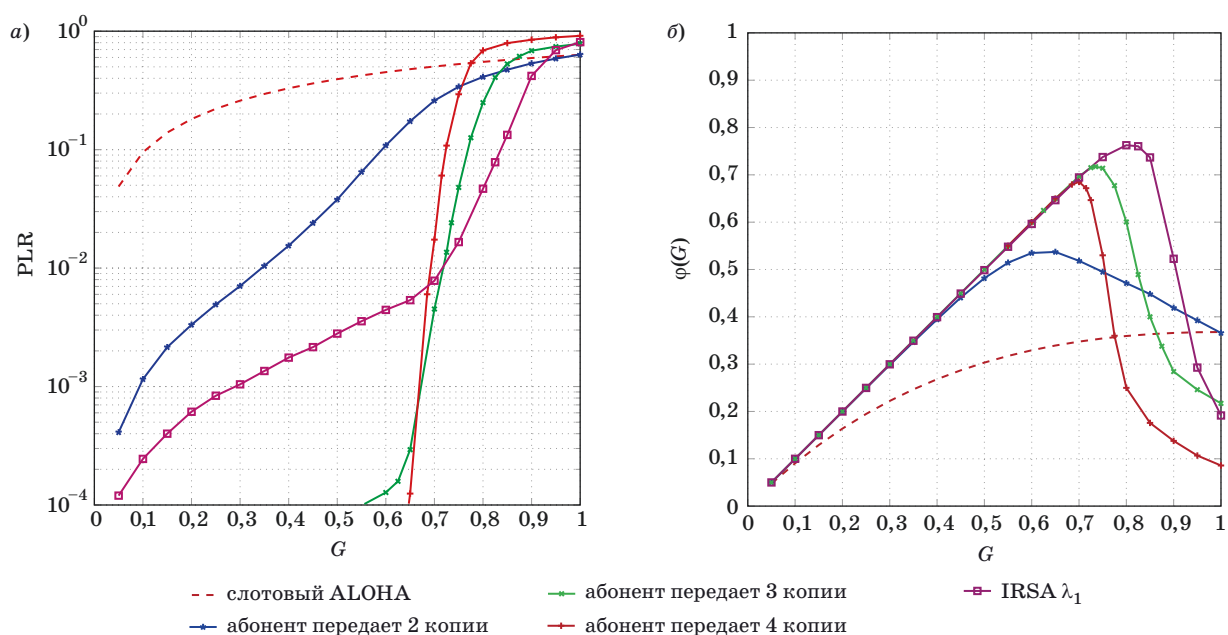
5. Завершение декодирования текущего фрейма.

В работах, посвященных исследованию алгоритмов CRA [4, 15–17], рассматривают модель входного потока, которая фактически соответствует допущению 4.1. Его можно сформулировать



■ **Рис. 2.** Этапы работы приемника на БС: первая (а), вторая (б), третья (в) итерации декодирования; все сообщения декодированы (г)

■ **Fig. 2.** The example of the operation of the receiver on the BS: first (a), second (б), third (в) decoding iterations; all messages are decoded (г)



■ **Рис. 3.** Доля ошибочно переданных (а) и доля успешно принятых (б) пакетов от загрузки системы  $G$  [16]  
 ■ **Fig. 3.** PLR (a) and Throughput (б) from loading system [16]

следующим образом: в системе  $m$  абонентов с  $b = \infty$  рассмотрен случай с насыщенной системой, когда интенсивность входного потока сообщений у каждого абонента  $\lambda_i \rightarrow \infty$ , где  $i = 1, 2, \dots, m$ . По-другому такую модель называют в англоязычных источниках полный буфер (full buffer), у абонента всегда есть сообщение для передачи. Также особенностью этих работ является то, что абонент в начале фрейма передает сообщение из буфера и не ждет подтверждения об успешной доставке сообщения, а в новом фрейме, даже если сообщение не доставлено, передает новое сообщение из буфера.

Такая система является системой с потерями, и вопрос стабильности в такой системе не ставится. Однако из-за потерь одной из ключевых характеристик такой системы является доля ошибочно переданных пакетов (Packet Loss Rate — PLR). PLR вычисляется как отношение числа  $w$  — не продекодированных пакетов на момент конца фрейма, к общему числу абонентов  $m$ . PLR зависит от такого параметра, как нагрузка на систему  $G = m/n$ :

$$PLR(G) = \frac{w}{m}.$$

Также для оценки систем введем характеристику доля успешно принятых пакетов (Throughput)

$$\phi(G) = \frac{E[M_t | m]}{n},$$

где  $M_t$  — число успешно принятых сообщений.

Если посмотреть на графики из работы [16], то можно обратить внимание, что по сравнению с классическим алгоритмом слотовый ALOHA (передается одна копия) появляется выигрыш по PLR (рис. 3, а) при определенной нагрузке системы и повышается максимальное значение среднего числа успешно переданных сообщений  $\phi(G)$  (рис. 3, б).

### Использование CRA при широкополосной передаче

Рассмотрим систему с множеством абонентов; у каждого абонента появляется короткое сообщение для передачи; каждый абонент передает свое сообщение по общему широкополосному каналу всем абонентам в системе. Такая модель предложена в работах [18, 19] для сценария связи между автомобилями Vehicle-to-Vehicle (V2V). Каждый автомобиль по широкополосному каналу отправляет данные о дорожной обстановке, что сможет повысить безопасность на дороге.

Для такой модели необходимо видоизменить систему допущений. Исключим допущение 3, оставив все остальные допущения для системы CRA из предыдущего раздела, и добавим новое.

**Допущение 6:** Каждый абонент по общему каналу множественного доступа передает сообщения всем абонентам, а также слушает канал и принимает сообщения от других абонентов. Абонент не может одновременно передавать и

принимать сигнал, поэтому в момент передачи копий своего сообщения абонент не может принять сообщения от других пользователей.

Алгоритм СМД оставим как для системы CRA.

Пример фрейма взят из предыдущего раздела, однако на схеме (рис. 4) появились новые серые линии, указывающие временные интервалы, в которые выбранный пользователь Z не может получить сообщение, так как в это время он сам передает копии своего сообщения. Полученный фрейм у абонента Z содержит только один слот с успешно принятым сообщением. На первой итерации декодирования сообщение абонента 3 декодируется во втором слоте. Копии его сообщения вычитаются из слота 4 (рис. 5, а). На второй итерации присутствует один слот с успехом, обозначенный зеленым цветом (рис. 5, б). Сообщение от абонента 4 декодируется в слоте 4. Копии от

абонента 4 удаляются из слота 3. На третьей и последней итерации (рис. 5, в) пакет пользователя 2 декодируется. В этот момент больше не может наблюдаться пакетов для декодирования (рис. 5, г). Если аналогично расписать декодирование сообщений у абонента 3, то окажется, что абонент 3 не принял ни одного сообщения от других абонентов.

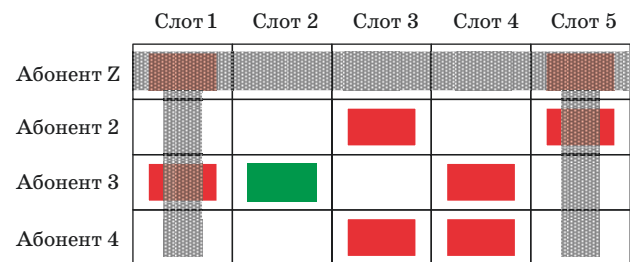
Для случая ширококвещательной передачи необходимо изменить долю потерянных пакетов:

$$PLR(G) = \frac{w}{m-1}.$$

При определенной нагрузке  $G$  (рис. 6) алгоритм IRSA с ширококвещательной передачей (Broadcast-IRSA) дает выигрыш по PLR по сравнению с алгоритмом, который используется в стандарте 802.11р, на графике он обозначен CSMA-CA [18].

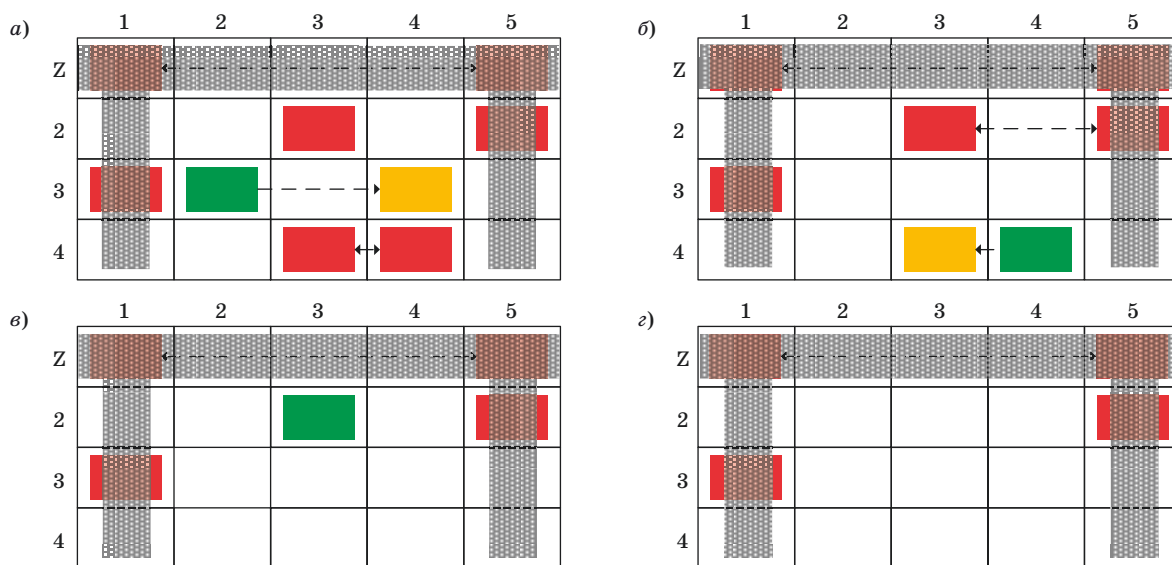
### Использование CRA для оперативной доставки сообщений

Рассмотрим модель системы [20, 21], в которой модифицируется допущение 1. Абоненты не синхронизированы по фреймам, у каждого абонента фрейм начинается со следующего слота после прихода сообщения. В остальном в системе применяются все допущения CRA. В статьях используется допущение 4.2 из классической модели. Количество абонентов в слоте распределено по закону Пуассона.



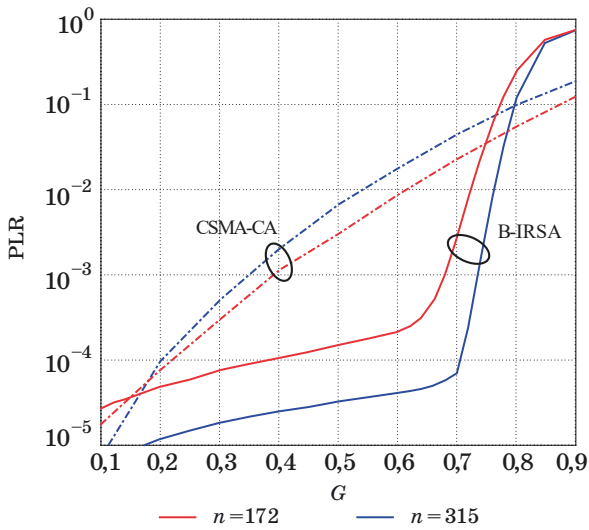
■ **Рис. 4.** Пример передачи сообщений в системе с ширококвещательной передачей в пределах одного фрейма

■ **Fig. 4.** An example of the transmission of messages in a system with broadcast transmission within one frame



■ **Рис. 5.** Этапы декодирования сообщений абонента Z от других абонентов: первая (а), вторая (б), третья (в) итерации декодирования; все сообщения декодированы (г)

■ **Fig. 5.** The example of decoding user Z messages from other users: first (а), second (б), third (в) decoding iterations; all messages are decoded (г)



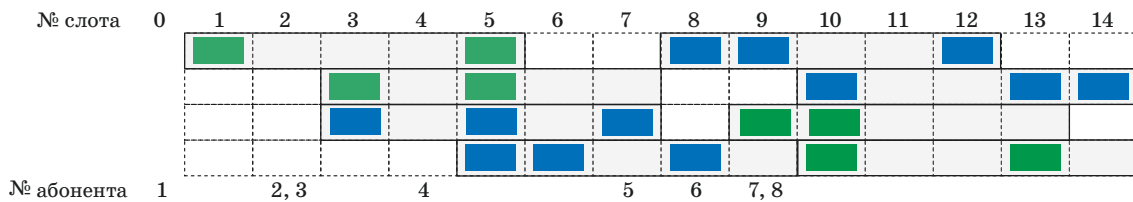
■ **Рис. 6.** Зависимость доли ошибочно переданных пакетов от нагрузки на систему [18]

■ **Fig. 6.** Dependence of PLR on the load on the system [18]

При получении сообщения абонент выбирает, сколько копий одного сообщения передавать. Первую копию абонент передает в первом слоте, после появления сообщения, оставшиеся копии передаются в случайных слотах внутри фрейма, у каждого абонента фрейм начинается после прихода сообщения.

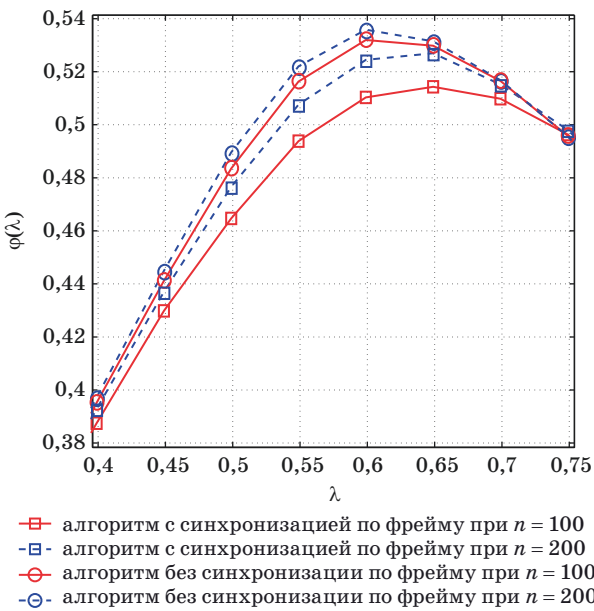
Для иллюстрации работы абонента на рис. 7 приведен пример из 14 слотов, у каждого абонента фрейм с  $n = 5$  слотами, за 14 слотов в системе появилось 8 абонентов. Фреймы у абонентов на рис. 7 показаны серыми прямоугольниками, у абонента 1 фрейм с 1-го по 5-й слот, у абонентов 2 и 3 фреймы с 3-го по 7-й слот, у абонента 4 фрейм с 5-го по 9-й слот. Время прихода абонента обозначено в последней строке. Каждый абонент передает первую копию сообщения в следующем слоте после прихода сообщения, остальные копии он передает в своем слоте.

В такой системе БС хранит историю слотов с начала запуска системы. Работа БС не отличается от



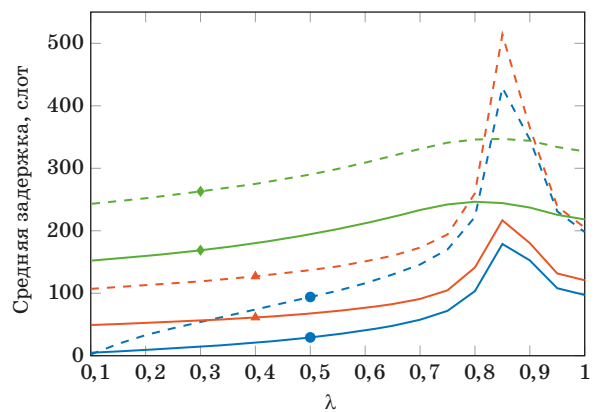
■ **Рис. 7.** Пример передачи сообщений для системы без синхронизации по фреймам

■ **Fig. 7.** Example of message passing for a system without frame synchronization



■ **Рис. 8.** Зависимость доли успешно принятых пакетов от среднего числа абонентов в фрейме [21]

■ **Fig. 8.** Dependence of Throughput on the average number of users in a frame [21]



—♦— алгоритм с синхронизацией по фрейму  
 —▲— алгоритм без синхронизации по фрейму, все копии сообщения передаются в случайных слотах  
 —●— алгоритм без синхронизации по фрейму, первая копия отправляется в первом слоте фрейма, остальные в случайных слотах

■ **Рис. 9.** Зависимость средней задержки от среднего числа абонентов в слоте [20]: ---- средняя задержка; — 90-й процентиль задержки

■ **Fig. 9.** Dependence of the average delay on the average number of users in the slot [20]: ---- the average delay; — the 90th percentile of the delay

работы синхронной CRA, только для разрешения коллизий используются сохраненные слоты. На практике хранить бесконечное число слотов невозможно. В работе [21] показано, что если взять память БС больше  $n_{RX} = 5n$ , прироста эффективности не будет.

График на рис. 8 показывает, что применение одних и тех же алгоритмов CRA без синхронизации по фреймам позволяет повысить среднее значение доли успешно принятых пакетов и значительно снизить задержку для успешно переданных сообщений.

В статье [20] рассматривается задержка для успешно отправленных пакетов (рис. 9) (не учитываются пакеты, отправленные с ошибками). Алгоритм без синхронизации по фрейму, в котором первая копия отправляется в первом слоте фрейма, остальные — в случайных слотах, позволяет значительно снизить задержку для успешно переданных сообщений.

### Учет влияния шумов в канале на работу алгоритмов CRA

Все модели систем, представленные выше, предполагают бесшумный канал. В работах [22–24] рассмотрена модель системы с белым гауссовым шумом. Для такой системы введена следующая система допущений.

Всего в системе  $K_{tot} \gg 1$  абонентов, из которых в каждый момент времени только  $K$  активных, т. е. тех, у которых есть сообщение для передачи. У каждого активного пользователя есть  $k$  бит для передачи в течение фрейма.

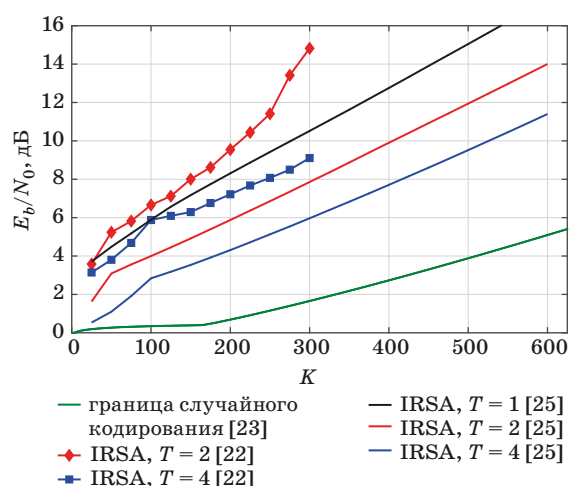
Изменение допущения 2: опишем модель канала

$$y = \sum_{i=1}^{K_{tot}} s_i x_i + z,$$

где  $s_i$  — индикатор активности для  $i$ -го пользователя, т. е.  $s_i = 1$ , если  $i$ -й пользователь активен, и  $s_i = 0$  в противном случае;  $x_i \in \mathbb{R}^n$  — кодовое слово (сообщение), переданное  $i$ -м пользователем;  $z \sim (0; \Gamma)$  — аддитивный белый гауссов шум.

Все пользователи используют один и тот же набор сообщений [23]  $[M] = \{1, \dots, M\}$  и ту же кодовую книгу размера  $M$ . Обозначим через  $\omega_i$  сообщение  $i$ -го пользователя. Для передачи сообщения  $\omega_i$  пользователь будет использовать кодовое слово  $x_i = x(\omega_i)$ .

Декодирование осуществляется до перестановки сообщений. Требуется, чтобы декодер вывел набор  $(y) = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K) \in [M]K$ . Таким образом, в соответствии с [23] разделяют проблему идентификации пользователя и проблему передачи данных. Вероятность ошибки (на пользователя) определяется следующим образом (см. [24]):



■ Рис. 10. Граница достижимости для  $E_b/N_0$  для алгоритмов IRSA при разрешении конфликта разной кратности [25]

■ Fig. 10. Achievability bounds for  $E_b/N_0$  for algorithms IRSA with conflict resolution of different multiplicities [25]

$$p_e = \max_{(s_1, s_2, \dots, s_{K_{tot}})} \frac{1}{K} \sum_{i=1}^{K_{tot}} s_i \Pr(W_i \notin L(y)).$$

Понятно, что вероятность зависит только от сообщений, которые были. Таким образом, мы можем рассчитать вероятность ошибки следующим образом:

$$p_e = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \Pr(W_i \notin L(y)),$$

где  $W_i$  — сообщение с номером  $i$ .

Вероятность ошибки устанавливается равной 1, если количество одновременных передач в некотором интервале превышает пороговое значение ( $T \in \{1, 2, 4\}$ ). Если кратность конфликта меньше или равна  $T$ , то вероятность ошибки рассчитывается независимо для каждого передаваемого сообщения.

В статье [25] предложен алгоритм подбора распределения числа копий сообщения для минимизации  $E_b/N_0$  при фиксации числа абонентов. В статье [25] для такой модели найдены границы достижимости по  $E_b/N_0$  (рис. 10). В работе также представлены таблицы с полиномами для разных  $T$ .

### Исследования стабильности систем с CRA

Рассмотрим систему с гарантированной доставкой сообщения. В конце фрейма БС по обратному каналу посылает широкополосный па-

кет, в котором содержатся ID абонентов, которые успешно передали свое сообщение. Все абоненты принимают этот пакет, и если абонента в списке нет, то он в следующем фрейме пытается передать то же сообщение. После успешной передачи сообщения он пытается передать новое, если оно у него есть в буфере. Попытки передачи неуспешно переданных сообщений — главное отличие в поведении абонента от алгоритмов, рассмотренных выше, для которых характерно, что абонент даже при неуспешной передаче сообщения в следующем фрейме передает новое сообщение (система с потерями).

Есть ряд работ, посвященных стабильности [26, 27] для CRA, в них использована модель системы из раздела «Использование CRA при передаче данных на базовую станцию». Однако изменен алгоритм доступа:

Каждый абонент в начале фрейма с некоторой вероятностью решает, передавать сообщение или нет. С вероятностью  $p_0$ , если сообщение передается в первый раз, и с вероятностью  $p_r$  в остальных попытках. Если абонент успешно передал сообщение, он пытается передать новое сообщение и отправляет его с вероятностью  $p_0$ .

В системе нет ограничения на число попыток передачи одного сообщения. В остальном алгоритм доступа остается таким же, как и в работах [4, 16]. Для такой модели можно получить вероятности передачи  $p_0$  и  $p_r$ , при которых система будет работать стабильно, алгоритм поиска  $p_0$  и  $p_r$  описан в статьях [26, 27]. Можно отметить, что если не найти оптимальные значения вероятности первой и повторных передач, например, равные единице ( $p_0 = p_r = 1$ ), тогда система будет нестабильна, т. е. в такой системе будет неограниченно возрастать задержка.

Модель системы с допущением 4.2 рассмотрена в работах [28–30]. В этом допущении число поступающих в систему сообщений распределено по закону Пуассона, в работе [28, 29] доказано, что для такой системы алгоритмы CRA нестабильны при любой интенсивности входного потока.

Для стабилизации таких алгоритмов до  $R_A$  в работах [28, 29] предложен механизм управления передачей. Абонент передает свое сообщение с некоторой вероятностью. Зная число абонентов в начале фрейма, БС отправляет вероятность передачи всем абонентам. Вероятность передачи сообщения абонента в фрейме для фиксированных параметров  $g, m, n$  определяется следующим образом:

$$p(g, m, n) = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{m}{n} < g; \\ g \frac{n}{m} & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $g$  — параметр стабилизации, подробно его поиск описан в статье [29];  $m$  — число абонентов

в фрейме;  $n$  — число слотов в фрейме. С такой вероятностью каждый абонент пытается передать сообщение. Параметр  $g$  и  $R_A$  можно найти с помощью метода Монте-Карло при фиксированных  $m, n$  и конкретном алгоритме CRA.

Для случая, когда число абонентов в фрейме неизвестно, найдено решение в статье [31], тогда в формулу вероятности вместо  $m$  подставляется следующая величина:

$$S_{t+1} = \max(1, S_t + aN_t^{empty} + bN_t^{success} + cN_t^{collision}),$$

где  $S_t$  — некое значение, которое зависит от значений в предыдущем фрейме,  $t$  — номер фрейма;  $a, b, c$  — коэффициенты, которые влияют на работу алгоритма и являются константами. Для вычисления  $S_t$  БС вычисляет число успехов  $N^{success}$ , число пусто  $N^{empty}$  и число конфликтов  $N^{collision}$  до начала процедуры погашения интерференции. В статье [31] взят подход из публикаций [32, 33] и применен для нескольких алгоритмов IRSA.

### Систематизация результатов исследований алгоритмов CRA

Для возможности сравнения и систематизации результатов различных исследований итоги обзора представлены в наглядной табличной форме (таблица).

Столбцы в таблице обозначают сценарии. Строки объединены в две группы, которые соответствуют двум вариантам допущения 4 из классической модели: 4.1 — зафиксированное число абонентов и 4.2 — число абонентов распределено по закону Пуассона. Также каждый вариант из допущения 4 разделен на три случая: алгоритм работы абонента не предусматривает повторной передачи (без подтверждения доставки), и алгоритм предусматривает повторные передачи, в котором возможно два случая — метастабильный алгоритм и стабильный. В большинстве работ используется синхронизация по фреймам и слотам (см. допущение 1 из раздела «Использование CRA при передаче данных на базовую станцию»), работы, в которых отсутствует синхронизация по фреймам (см. допущение 1 из раздела «Использование CRA для оперативной доставки сообщений»), отмечены символом звездочка. Следует подчеркнуть, что в статье не были рассмотрены системы, в которых отсутствует синхронизация по слотам, так как для них не справедливо как допущение 1, так и введенные в статью модификации этого допущения. Соответственно, работы, относящиеся к данному вопросу, не представлены в таблице. Основные особенности работы алгоритмов CRA для асинхронной по фреймам системы рассмотрены в четвертом разделе статьи [16] и разделе 17.3.2



- Сравнение сценариев и алгоритмов доступа
- Comparison of scenarios and access algorithms

Число абонентов	Алгоритм	Система	
		Одна БС принимает сообщение от множества абонентов	Абоненты являются и приемниками, и передатчиками (широковещательная передача)
Фиксированное (допущение 4.1)	Без подтверждения доставки	IRSA [4, 16, 27] CDRSA [4, 16, 17]	B-IRSA [18, 19]
	Метастабильный	IRSA [4, 16, 27] CDRSA [4, 16, 17]	—
	Стабильный	CDRSA [26, 27]	—
Случайное (допущение 4.2)	Без подтверждения доставки	IRSA[20*, 21*]	B-IRSA
	Метастабильный	IRSA [28] CDRSA [28]	—
	Стабильный	IRSA [28, 31]	—

статьи [34], исследованию конкретного алгоритма посвящена работа [35].

Из таблицы видно, что для сценария, в котором абоненты являются и приемниками, и передатчиками, отсутствуют работы, в которых рассматриваются повторные передачи. Это связано с тем, что в настоящее время этот сценарий предлагается использовать для передачи данных от одного участника движения ко всем другим участникам (V2V). В этом случае данные быстро устаревают, и лучше передавать новую, более актуальную информацию.

Алгоритмы из статей про IRSA [4, 16, 27], CDRSA [4, 16, 17] попали в две строки из-за того, что если ввести повторные передачи, система точно будет метастабильна. В работах [24, 25] предложен подход стабилизации алгоритмов CDRSA.

Основной эффект, который достигается при использовании методов помехоустойчивого кодирования при разрешении конфликта, это повышение коэффициента использования канала. В работах [36–39] показано, что можно получить значение коэффициента, сколь угодно близкое к единице, однако это может быть достигнуто только при бесконечной задержке. Большинство исследований посвящено поиску алгоритмов, которые обеспечивают достаточно высокий коэффициент использования канала при конечной задержке. В подавляющем числе работ рассмотрен бесшумный канал связи, есть небольшое число работ, в которых исследуется влияние шумов в канале на работу алгоритмов CRA. В работах [24, 25] рассматривается простейшая модель канала с аддитивным гауссовым шумом. Более сложная модель квазистационарного канала с замираниями рассмотрена в работе [40].

Вопросу стабильности алгоритмов CRA посвящено существенно меньше работ. При этом следует отметить, что проблема стабильности важна для крупномасштабных систем межмашинной

связи. Авторам не известны работы, в которых проблема стабильности алгоритмов CRA исследуется применительно к модели системы без синхронизации по фреймам и к моделям, в которых рассматривается канал с шумом.

### Заключение

В статье рассмотрены два основных варианта сценария крупномасштабных систем межмашинной связи (mMTC):

- множество абонентов передают данные на одну БС;
- каждый абонент в ширококвещательном режиме передает данные всем другим абонентам.

Проведены систематизированный обзор и сравнительный анализ алгоритмов CRA, которые были разработаны в последнее десятилетие и используют методы помехоустойчивого кодирования и процедуру последовательного погашения интерференции для разрешения конфликтов в общем канале со случайным множественным доступом. Для проведения обзора и сравнительного анализа была введена модель системы СМД в виде набора допущений, отражающих особенности различных вариантов сценария крупномасштабных систем межмашинной связи и алгоритмов случайного множественного доступа, в том числе и подходов CRA.

По результатам обзора и сравнительного анализа определены следующие направления работ:

- исследование систем с потенциально неограниченным числом абонентов (модель с пуассоновским входным потоком абонентов), в которых для обеспечения оперативной доставки сообщений отсутствует синхронизация по фреймам, и разработка алгоритмов, обеспечивающих устойчивую работу таких систем;

— разработка моделей, которые описывают влияние изменений характеристик канала во времени на работу механизма последовательного погашения интерференции и повторение ранее проведенных исследований с использованием этих моделей.

## Литература

1. Recommendation ITU-R M.2083-0 (09/2015). IMT Vision Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf) (дата обращения: 16.11.2019).
2. ICT-317669-METIS/D2.4. Proposed Solutions for New Radio Access. [https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS\\_D2.4\\_v1.pdf](https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D2.4_v1.pdf) (дата обращения: 16.11.2019).
3. Clazzer F., Munari A., Liva G., Lazaro F., Stefanovic C., Popovski P. From 5G to 6G: Has the time for modern random access come? arXiv preprint arXiv:1903.03063. 2019.
4. Liva G. Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity slotted ALOHA. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, no. 59, pp. 477–487. doi:10.1109/TCOMM.2010.120710.100054
5. Цыбаков Б. С., Михайлов В. А. Свободный синхронный доступ пакетов в широкополосный канал с обратной связью. *Проблемы передачи информации*, 1978, т. 14, № 4, с. 32–59.
6. Цыбаков Б. С., Михайлов В. А. Эргодичность синхронной системы АЛОХА. *Проблемы передачи информации*, 1979, т. 15, № 4, с. 73–87.
7. Capetanakis J. I. Tree algorithms for packet broadcast channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1979, vol. 25, pp. 505–515. doi:10.1109/TIT.1979.1056093
8. Alammouri A., Andrews J. G., Vaccelli F. Stability and metastability of traffic dynamics in uplink random access networks. arXiv preprint arXiv:1906.04683, 2019.
9. Введенская Н. Д., Сухов Ю. М. Система множественного доступа с многими пользователями: стабильность и метастабильность. *Проблемы передачи информации*, 2007, т. 43, № 3, с. 105–111.
10. Евсеев Г. С., Тюрликов А. М. Взаимосвязь характеристик блокированных стек-алгоритмов случайного множественного доступа. *Проблемы передачи информации*, 2007, т. 43, № 4, с. 83–92.
11. Цыбаков Б. С., Михайлов В. А. Случайный множественный доступ пакетов. Алгоритм дробления. *Проблемы передачи информации*, 1980, т. 16, № 4, с. 65–79.
12. Введенская Н. Д., Пинскер М. С. Оценка пропускной способности алгоритмов множественного доступа класса FCFS. *Проблемы передачи информации*, 1990, т. 26, № 1, с. 58–67.
13. Yingqun Y., Giannakis G. B. High-throughput random access using successive interference cancellation in a tree algorithm. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, vol. 53, no. 12, pp. 4628–4639. doi:10.1109/TIT.2007.909080
14. Андреев С. Д., Пустовалов Е. В., Тюрликов А. М. Древовидный алгоритм разрешения конфликта, устойчивый к неполному погашению интерференции. *Автоматика и телемеханика*, 2009, № 3, с. 78–96.
15. Paolini E., Stefanovic C., Liva G., Popovski P. Coded random access: applying codes on graphs to design random access protocols. *IEEE Communications Magazine*, 2015, no. 53, pp. 144–150. doi:10.1109/MCOM.2015.7120031
16. Berlioli M., Cocco G., Liva G., Munari A. Modern random access protocols. *Foundations and Trends in Networking*, 2016, vol. 10, no. 4, pp. 317–446. doi:10.1561/13000000047
17. Casini E., De Gaudenzi R., Herrero O. D. R. Contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA): An enhanced random access scheme for satellite access packet networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, vol. 6, no. 4, pp. 1408–1419. doi:10.1109/TWC.2007.348337
18. Ivanov M., Brännström F., i Amat A. G., Popovski P. All-to-all broadcast for vehicular networks based on coded slotted ALOHA. *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, 2015, pp. 2046–2050. doi:10.1109/ICCW.2015.7247482
19. Ivanov M., Brännström F., i Amat A. G., Popovski P. Broadcast coded slotted ALOHA: A finite frame length analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, vol. 65, no. 2, pp. 651–662. doi:10.1109/TCOMM.2016.2625253
20. Sandgren E., i Amat A. G., Brännström F. On frame asynchronous coded slotted ALOHA: Asymptotic, finite length, and delay analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, vol. 65, no. 2, pp. 691–704. doi:10.1109/TCOMM.2016.2633468
21. Meloni A., Murrone M., Kissling C., Berlioli M. Sliding window-based contention resolution diversity slotted ALOHA. *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Anaheim, 2012, pp. 3305–3310. doi:10.1109/GLOCOM.2012.6503624
22. Vem A., Narayanan K. R., Cheng J., Chamberland J. F. A user-independent serial interference cancellation based coding scheme for the unsourced random access Gaussian channel. *2017 IEEE Information Theory Workshop (ITW)*, Kaohsiung, 2017, pp. 121–125. doi:10.1109/ITW.2017.8278023

## Финансовая поддержка

8.8540.2017/БЧ «Разработка алгоритмов передачи данных в системах IoT с учетом ограничений на сложность устройств».

23. Polyanskiy Y. A perspective on massive random-access. *2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Aachen, 2017, pp. 2523–2527. doi:10.1109/ISIT.2017.8006984
24. Ordentlich O., Polyanskiy Y. Low complexity schemes for the random access Gaussian channel. *2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Aachen, 2017, pp. 2528–2532. doi:10.1109/ISIT.2017.8006985
25. Glebov A., Matveev N., Andreev K., Frolov A., Turlikov A. Achievability bounds for T-fold irregular repetition slotted ALOHA scheme in the Gaussian MAC. *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, IEEE, 2019, pp. 1–6. doi:10.1109/WCNC.2019.8885472
26. Meloni A., Murrioni M. CRDSA, CRDSA++ and IRSA: Stability and performance evaluation. *2012 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC)*, Baiona, 2012, pp. 220–225. doi:10.1109/ASMS-SPSC.2012.6333080
27. Kissling C. On the stability of contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA). *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, Kathmandu, 2011, pp. 1–6. doi:10.1109/GLOCOM.2011.6134329
28. Матвеев Н. В., Тюрликов А. М. Слотовый ALOHA с итерационной процедурой разрешения коллизий. Стабильность и нестабильность. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 3, с. 89–97. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.89
29. Апанасенко Н. В., Матвеев Н. В., Тюрликов А. М. Метод стабилизации алгоритмов множественного доступа с последовательным погашением интерференции. *Научная сессия ГУАП*, 2017, с. 260–266.
30. Apanasenko N., Matveev N., Turlikov A. Stability and Delay of Algorithms of Random Access with Successive Interference Cancellation. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: Proceedings of the 17th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems, NEW2AN 2017, the 10th Conference on Internet of Things and Smart Spaces, ruSMART 2017*, Springer, 2017, pp. 510–518. doi:10.1007/978-3-319-67380-6\_47
31. Matveev N. V. The adaptive retransmission management in random multiple-access system with successive interference cancellation. *2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2018, pp. 1–5. doi:10.1109/WECONF.2018.8604323
32. Михайлов В. А. Геометрический анализ устойчивости цепей Маркова в  $R_+^n$  и его приложение к вычислению пропускной способности адаптивного алгоритма случайного множественного доступа. *Проблемы передачи информации*, 1988, т. 24, вып. 1, с. 61–73.
33. Galinina O., Turlikov A., Andreev S., Koucheryavy Y. Stabilizing multi-channel slotted ALOHA for machine-type communications. *2013 IEEE International Symposium on Information Theory*, Istanbul, 2013, pp. 2119–2123. doi:10.1109/ISIT.2013.6620600
34. *Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond*/ M. Vaezi, Z. Ding, H. V. Poor (Eds.). Springer, 2019. 685 p. doi:10.1007/978-3-319-92090-0
35. Clazzer F., Matuz B., Jayasooriya S., Shirvanimoghaddam M., Johnson S. J. Protograph LDPC code design for asynchronous random access. *Algorithms 2019*, vol. 12, iss. 8, p. 170. doi:10.3390/a12080170
36. Peeters G. T., Van Houdt B. On the capacity of a random access channel with successive interference cancellation. *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, 2015, pp. 2051–2056. doi:10.1109/ICCW.2015.7247483
37. Paolini E., Liva G., Chiani M. Graph-based random access for the collision channel without feedback: Capacity bound. *2011 IEEE Global Telecommunications Conference — GLOBECOM 2011*, Houston, 2011, pp. 1–5. doi:10.1109/GLOCOM.2011.6134205
38. Liva G. A slotted ALOHA scheme based on bipartite graph optimization. *2010 International ITG Conference on Source and Channel Coding (SCC)*, Siegen, 2010, pp. 1–6.
39. Narayanan K. R., Pfister H. D. Iterative collision resolution for slotted ALOHA: An optimal uncoordinated transmission policy. *2012 7th International Symposium on Turbo Codes and Iterative Information Processing (ISTC)*, Gothenburg, 2012, pp. 136–139. doi:10.1109/ISTC.2012.6325203
40. Kowshik S. S., Andreev K., Frolov A., Polyanskiy Y. Energy efficient random access for the quasi-static fading MAC. *2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Paris, pp. 2768–2772. doi:10.1109/ISIT.2019.8849288

UDC 004.728.3.057.4

doi:10.31799/1684-8853-2019-6-54-67

## Review of random multiple access methods for massive machine type communication

N. V. Matveev<sup>a</sup>, Senior Lecturer, orcid.org/0000-0002-9746-4746, n.matveev@k36.orgA. M. Turlikov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-7132-094X, turlikov@k36.org<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Intensive research is currently underway in the field of data transmission systems for the Internet of Things in relation to various scenarios of Massive Machine Type Communication. The presence of a large number of devices in such systems necessitates the use of the methods of random multiple access to a common communication channel. It is proposed in some works to increase the channel utilization efficiency by the use of error correction coding methods for conflict resolution (Coded Random Access). The vast variety of options for using such communication systems has made it impossible to compare algorithms implementing this approach under the same conditions. This is a problem that restrains the development of both the theory and practice of using error correction code methods for conflict resolution. **Purpose:** Developing a unified approach to the description of random multiple access algorithms; performing, on the basis of this approach, a review and comparative analysis of algorithms in which error correction code methods are used for conflict resolution. **Results:** A model of a random multiple access system is formulated in the form of a set of assumptions that reflect both the features of various scenarios of Massive Machine Type Communication and the main features of random multiple access algorithms, including Coded Random Access approaches. The system models are classified by the following features: 1) a finite or infinite number of subscribers; 2) stable, unstable or metastable systems; 3) systems with retransmissions or without them; 4) systems with losses or without them. For a lossy system, the main characteristics are Throughput (the proportion of successfully delivered messages) and Packet Loss Rate (probability of a message loss). For a lossless system, the basic characteristics are the algorithm speed and the average delay. A systematic review and comparative analysis of Coded Random Access algorithms have been carried out. The result of the comparative analysis is presented in a visual tabular form. **Practical relevance:** The proposed model of a random multiple access system can be used as a methodological basis for research and development of random multiple access algorithms for both existing and new scenarios of Massive Machine Type Communication. The systematic results of the review allow us to identify the promising areas of research in the field of data transmission systems for the Internet of Things.

**Keywords** — medium access control, slotted ALOHA, massive machine type communication, successive interference cancellation, coded random access, 5G, irregular repetition slotted ALOHA.

**For citation:** Matveev N. V., Turlikov A. M. Review of random multiple access methods for massive machine type communication. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 54–67 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-54-67

## References

1. Recommendation ITU-R M.2083-0 (09/2015). *IMT Vision Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond*. Available at: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf) (accessed 16 November 2019).
2. *ICT-317669-METIS/D2.4. Proposed Solutions for New Radio Access*. Available at: [https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS\\_D2.4\\_v1.pdf](https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/deliverables/METIS_D2.4_v1.pdf) (accessed 16 November 2019).
3. Clazzer F., Munari A., Liva G., Lazaro F., Stefanovic C., Popovski P. From 5G to 6G: Has the time for modern random access come? arXiv preprint arXiv:1903.03063. 2019.
4. Liva G. Graph-based analysis and optimization of contention resolution diversity Slotted ALOHA. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, no. 59, pp. 477–487. doi:10.1109/TCOMM.2010.120710.100054
5. Tsybakov B. S., Mikhailov V. A. Free synchronous packet access in a broadcast channel with feedback. *Problems of Information Transmission*, 1978, vol. 14, iss. 4, pp. 32–59 (In Russian).
6. Tsybakov B. S., Mikhailov V. A. Ergodicity of a slotted ALOHA system. *Problems of Information Transmission*, 1979, vol. 15, iss. 4, pp. 73–87 (In Russian).
7. Capetanakis J. I. Tree algorithms for packet broadcast channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1979, vol. 25, pp. 505–515. doi:10.1109/TIT.1979.1056093
8. AlAmmouri A., Andrews J. G., Baccelli F. Stability and metastability of traffic dynamics in uplink random access networks. arXiv preprint arXiv:1906.04683, 2019.
9. Vvedenskaya N. D., Suhov Yu. M. Multi-access system with many users: Stability and metastability. *Problems of Information Transmission*, 2007, vol. 43, iss. 3, pp. 263–269. doi:10.1134/S0032946007030088
10. Evseev G. S., Tyurlikov A. M. Interrelation of characteristics of blocked random multiple access stack algorithms. *Problems of Information Transmission*, 2007, vol. 43, iss. 4, pp. 83–92. doi:10.1134/S0032946007040072
11. Tsybakov B. S., Mikhailov V. A. Random multiple packet access: Part-and-try algorithm. *Problems of Information Transmission*, 1980, vol. 16, iss. 4, pp. 65–79 (In Russian).
12. Vvedenskaya N. D., Pinsker M. S. Bounds on the capacity of FCFS multiple-access algorithms. *Problems of Information Transmission*, 1990, vol. 26, iss. 1, pp. 58–67 (In Russian).
13. Yingqun Y., Giannakis G. B. High-throughput random access using successive interference cancellation in a tree algorithm. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, vol. 53, no. 12, pp. 4628–4639. doi:10.1109/TIT.2007.909080
14. Andreev S. D., Pustovalov E. M., Tyurlikov A. M. Conflict-resolving tree algorithm stable to incomplete interference damping. *Automation and Remote Control*, 2009, vol. 70, iss. 3, pp. 417–433. doi:10.1134/S0005117909030084
15. Paolini E., Stefanovic C., Liva G., Popovski P. Coded random access: Applying codes on graphs to design random access protocols. *IEEE Communications Magazine*, 2015, no. 53, pp. 144–150. doi:10.1109/MCOM.2015.7120031
16. Berioli M., Cocco G., Liva G., Munari A. Modern random access protocols. *Foundations and Trends in Networking*, 2016, vol. 10, no. 4, pp. 317–446. doi:10.1561/13000000047
17. Casini E., De Gaudenzi R., Herrero O. D. R. Contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA): An enhanced random access scheme for satellite access packet networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, vol. 6, no. 4, pp. 1408–1419. doi:10.1109/TWC.2007.348337
18. Ivanov M., Brännström F., i Amat A. G., Popovski P. All-to-all broadcast for vehicular networks based on coded slotted ALOHA. *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, 2015, pp. 2046–2050. doi:10.1109/ICCW.2015.7247482
19. Ivanov M., Brännström F., i Amat A. G., Popovski P. Broadcast coded slotted ALOHA: A finite frame length analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, vol. 65, no. 2, pp. 651–662. doi:10.1109/TCOMM.2016.2625253
20. Sandgren E., i Amat A. G., Brännström F. On frame asynchronous coded slotted ALOHA: Asymptotic, finite length, and delay analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, vol. 65, no. 2, pp. 691–704. doi:10.1109/TCOMM.2016.2633468
21. Meloni A., Murroni M., Kissling C., Berioli M. Sliding window-based contention resolution diversity slotted ALOHA. *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*.

- Anaheim, 2012, pp. 3305–3310. doi:10.1109/GLOCOM.2012.6503624
22. Vem A., Narayanan K. R., Cheng J., Chamberland J. F. A user-independent serial interference cancellation based coding scheme for the unshared random access Gaussian channel. *2017 IEEE Information Theory Workshop (ITW)*, Kaohsiung, 2017, pp. 121–125. doi:10.1109/ITW.2017.8278023
  23. Polyanskiy Y. A perspective on massive random-access. *2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Aachen, 2017, pp. 2523–2527. doi:10.1109/ISIT.2017.8006984
  24. Ordentlich O., Polyanskiy Y. Low complexity schemes for the random access Gaussian channel. *2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Aachen, 2017, pp. 2528–2532. doi:10.1109/ISIT.2017.8006985
  25. Glebov A., Matveev N., Andreev K., Frolov A., Turlikov A. Achievability bounds for T-fold irregular repetition slotted ALOHA scheme in the Gaussian MAC. *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, IEEE, 2019, pp. 1–6. doi:10.1109/WCNC.2019.8885472
  26. Meloni A., Murrioni M. CRDSA, CRDSA++ and IRSA: Stability and performance evaluation. *2012 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC)*, Baiona, 2012, pp. 220–225. doi:10.1109/ASMS-SP-SC.2012.6333080
  27. Kissling C. On the stability of contention resolution diversity slotted ALOHA (CRDSA). *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011)*, Kathmandu, 2011, pp. 1–6. doi:10.1109/GLOCOM.2011.6134329
  28. Turlikov A. M., Matveev N. V. Slotted ALOHA with iterative procedure for resolving collisions. stability and non-stability. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 3, pp. 89–97 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.89
  29. Apanasenko N. V., Matveev N. V., Turlikov A. M. Method of stabilization of random access algorithms with successive interference cancellation. *Sbornik dokladov Nauchnoi sessii GUAP* [Collection of reports of the scientific session of SUA], 2017, pp. 260–266 (In Russian).
  30. Apanasenko N., Matveev N., Turlikov A. Stability and delay of algorithms of random access with successive interference cancellation. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: Proceedings of the 17th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networks and Systems, NEW2AN 2017, the 10th Conference on Internet of Things and Smart Spaces, ruSMART 2017*, Springer, 2017, pp. 510–518. doi:10.1007/978-3-319-67380-6\_47
  31. Matveev N. V. The adaptive retransmission management in random multiple-access system with successive interference cancellation. *2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2018, pp. 1–5. doi:10.1109/WECONF.2018.8604323
  32. Mikhailov V. A. Geometrical analysis of the stability of Markov chains in and its application to throughput evaluation of the adaptive random multiple access algorithm. *Problems of Information Transmission*, 1988, vol. 24, iss. 1, pp. 47–56 (In Russian).
  33. Galinina O., Turlikov A., Andreev S., Koucheryavy Y. Stabilizing multi-channel slotted ALOHA for machine-type communications. *2013 IEEE International Symposium on Information Theory, Istanbul*, 2013, pp. 2119–2123. doi:10.1109/ISIT.2013.6620600
  34. *Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond*. M. Vaezi, Z. Ding, H. V. Poor (Eds.). Springer, 2019. 685 p. doi:10.1007/978-3-319-92090-0
  35. Clazzer F., Matuz B., Jayasooriya S., Shirvanimoghaddam M., Johnson S. J. Protograph LDPC code design for asynchronous random access. *Algorithms 2019*, vol. 12, iss. 8, p. 170. doi:10.3390/a12080170
  36. Peeters G. T., Van Houdt B. On the capacity of a random access channel with successive interference cancellation. *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, 2015, pp. 2051–2056. doi:10.1109/ICCW.2015.7247483
  37. Paolini E., Liva G., Chiani M. Graph-based random access for the collision channel without feedback: Capacity bound. *2011 IEEE Global Telecommunications Conference — GLOBECOM 2011*, Houston, 2011, pp. 1–5. doi:10.1109/GLOCOM.2011.6134205
  38. Liva G. A slotted ALOHA scheme based on bipartite graph optimization. *2010 International ITG Conference on Source and Channel Coding (SCC)*, Siegen, 2010, pp. 1–6.
  39. Narayanan K. R., Pfister H. D. Iterative collision resolution for slotted ALOHA: An optimal uncoordinated transmission policy. *2012 7th International Symposium on Turbo Codes and Iterative Information Processing (ISTC)*, Gothenburg, 2012, pp. 136–139. doi:10.1109/ISTC.2012.6325203
  40. Kowshik S. S., Andreev K., Frolov A., Polyanskiy Y. Energy efficient random access for the quasi-static fading MAC. *2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Paris, pp. 2768–2772. doi:10.1109/ISIT.2019.8849288

## Сравнение эффективности методов повышения пропускной способности экспериментального оборудования с удаленным доступом

В. А. Комаров<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0001-9210-9908](https://orcid.org/0000-0001-9210-9908)

А. В. Сарафанов<sup>б</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0003-4264-9388](https://orcid.org/0000-0003-4264-9388)

С. Р. Тумковский<sup>в</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-1647-2171](https://orcid.org/0000-0002-1647-2171), [STumkovskiy@hse.ru](mailto:STumkovskiy@hse.ru)

<sup>а</sup>АО «Информационные спутниковые системы им. академика М. Ф. Решетнёва», Ленина ул., 52, Железнодорожск, 662972, РФ

<sup>б</sup>ООО Витте Консалтинг (ГК «АЙ-ТЕКО»), Кедрова ул., 15, Москва, 117036, РФ

<sup>в</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Мясницкая ул., 20, Москва, 101000, РФ

**Введение:** бурное развитие информационного общества выражается в появлении новых моделей экономической деятельности, форм оказания образовательных и социальных услуг, научной деятельности и прочем на основе постоянно совершенствующихся цифровых технологий. Это в свою очередь приводит к возникновению новых требований к знаниям и навыкам современных инженерных кадров, подготовка которых базируется на различных лабораторных исследованиях. Современной формой их реализации является многопользовательский удаленный доступ из цифровой образовательной среды к специализированному экспериментальному оборудованию (лабораторным установкам/стендам/макетам), обеспечивающий эффективное использование данного оборудования. **Цель:** сравнительный анализ методов повышения пропускной способности экспериментального оборудования, функционирующего с многопользовательским удаленным доступом. **Методы:** управление процедурой обслуживания запросов пользователей на основе алгоритмов диспетчеризации, которые учитывают функциональное и параметрическое содержание обрабатываемых запросов (настройки конфигурации объекта исследования, вид выполняемых измерений, параметры тестовых сигналов и пр.). **Результаты:** на базе предложенного подхода для многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем разработаны следующие методы. Метод минимизации операций управления, обеспечивающий определение последовательности извлечения заданий из очереди в соответствии с минимумом суммарного времени управления для всех запросов, имеющих в очереди на текущий момент. Метод временного разделения многократных измерений, обеспечивающий распределение операций статистической обработки результатов измерения между программным обеспечением измерительно-управляющей ЭВМ и терминала пользователя. Метод распараллеливания функциональных операций, обеспечивающий сокращение времени обслуживания запросов за счет программного разделения и параллельного выполнения операций управления и измерения для имеющих в очереди запросов, относящихся к разным объектам управления и контроля. Сравнительный анализ применяемых подходов показал, что наиболее эффективными с точки зрения затрат на оснащение одного рабочего места пользователя являются методы, основанные на управлении процедурой обслуживания запросов пользователей. **Практическая значимость:** разработанные методы позволили создать ряд образцов многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем автоматизации учебных и научных экспериментальных исследований со сниженной на 16–40 % себестоимостью оснащения рабочего места пользователя и пропускной способностью 30–50 одновременно работающих пользователей на основе одного комплекта специализированного экспериментального оборудования.

**Ключевые слова** – экспериментальное оборудование с удаленным доступом, многопользовательская распределенная измерительно-управляющая система, автоматизация учебных и научных экспериментальных исследований, пропускная способность, многопользовательский доступ, цифровая образовательная среда, система массового обслуживания.

**Для цитирования:** Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р. Сравнение эффективности методов повышения пропускной способности экспериментального оборудования с удаленным доступом. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 6, с. 68–76. doi:10.31799/1684-8853-2019-6-68-76

**For citation:** Komarov V. A., Sarafanov A. V., Tumkovskiy S. R. Comparison of the effectiveness of methods to increase the throughput of experimental equipment with remote access. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 68–76 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-68-76

### Введение

В настоящее время в системе высшего образования происходят глубокие изменения под влиянием новых глобальных тенденций, связанных, прежде всего, с бурным развитием цифровых технологий, активным формированием инфор-

мационного общества, а также переходом промышленности на новый технологический уклад, базисом которого является цифровая экономика. Интеграция и социальное взаимодействие в рамках информационного общества выражаются в появлении новых моделей экономической деятельности, оказания социальных услуг, образо-

вания, научной деятельности, производства и пр. на основе постоянно совершенствующихся цифровых технологий. Это в свою очередь приводит к возникновению новых требований к знаниям и навыкам, отвечающим условиям интеграции в глобальное цифровое пространство, которые необходимо учитывать в подготовке современных специалистов в области техники и технологий [1, 2].

В связи с тем, что процесс подготовки таких специалистов базируется на различных лабораторных исследованиях, одним из приоритетных направлений развития современной цифровой образовательной среды (ЦОС) является организация доступа в ней к специализированному экспериментальному оборудованию (лабораторным установкам/стендам/макетам) в удаленном режиме как можно большему числу пользователей [3–8].

Реализация данного подхода выполняется посредством применения в ЦОС многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем (МРИУС), реализующих подход эксплуатации единичных экземпляров экспериментального оборудования в удаленном режиме на основе концепции мультиарендности и обеспечивающих дистанционный доступ и возможность коллективной работы группе исследователей с индивидуальными параметрами и траекторией проводимых исследований [9–17].

В этой связи для МРИУС как составных компонентов современной ЦОС является актуальной разработка методов повышения числа одновременно обслуживаемых в ней терминалов пользователей.

### Методы эксплуатации экспериментального оборудования с удаленным доступом

Проведенный анализ технических решений в части реализации методов эксплуатации экспериментального оборудования с удаленным доступом как в России, так и за рубежом [9–17] позволил выделить следующие, применяемые в настоящее время, подходы повышения их пропускной способности функционирующих на их основе монопольных и многопользовательских систем, которые в формализованном виде приведены в таблице. Под пропускной способностью систем, реализующих рассматриваемые в таблице методы, понимается число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей при заданном времени их реакции на запросы пользователей [9, 14].

При монопольном методе доступа (вариант 1) увеличение пропускной способности выполняется посредством развертывания дополнительных комплектов однотипного дублирующего экс-

периментального оборудования (лабораторных установок/стендов/макетов и соответствующих устройств). При этом крайне актуальными являются задачи его размещения в специализированных помещениях и дальнейшего сервисного обслуживания.

При многопользовательском методе эксплуатации экспериментального оборудования (вариант 2.1) одним из применяемых подходов повышения пропускной способности является дополнительное использование при обслуживании потока запросов пользователей математических моделей лабораторных установок/стендов/макетов [7, 13]. Данный подход имеет ограниченное применение в рамках исследовательского эксперимента, целью которого является идентификация или верификация разрабатываемых математических моделей исследуемых устройств, процессов или явлений.

Особенность функционирования МРИУС заключается в том, что характер обращения пользователей с терминалов к разделяемому ресурсу МРИУС является случайным, а время выполнения запросов зависит от заданных в них параметров функциональных операций управления и измерения, данные факты обуславливают вероятностный характер реакции МРИУС на формируемые пользователями запросы при их одновременной работе с разделяемым ресурсом. В качестве разделяемого ресурса МРИУС, который «кратковременно захватывается» для выполнения поступающих запросов пользователей, выступают автоматизированные лабораторные установки, стенды и макеты, а также устройства формирования тестовых и (или) управляющих сигналов, устройства сбора данных и т. п. для работы с ними.

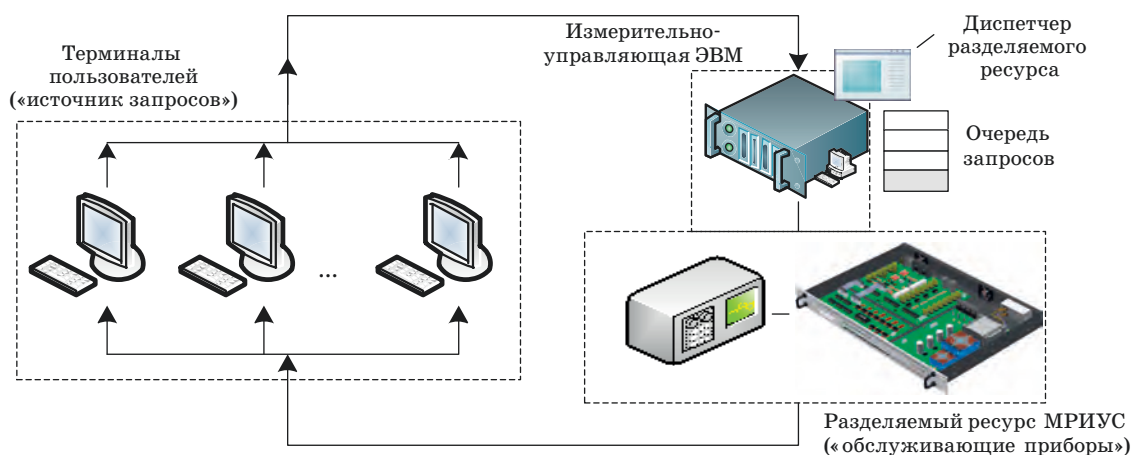
Необходимая оценка соответствующих вероятностно-временных характеристик работы пользователей с разделяемым ресурсом в МРИУС, как правило, выполняется средствами математического моделирования на основе ее представления в виде системы массового обслуживания (СМО). На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема МРИУС как замкнутой СМО (finite source queueing system).

В мировой практике, в том числе в России, в целях повышения пропускной способности МРИУС, реализующих метод эксплуатации экспериментального оборудования в режиме удаленного доступа на основе концепции мультиарендности, широкое распространение получил подход, основанный на распараллеливании обработки потока запросов пользователей посредством дублирования однотипных лабораторных установок/стендов/макетов и соответствующих устройств (вариант 2.2) [12, 15, 17]. Использование данного подхода приводит к увеличению пропускной спо-

- Методы эксплуатации экспериментального оборудования в ЦОС и подходы к повышению пропускной способности реализующих их систем
- Methods of operation of experimental equipment in digital educational environment and approaches to increasing the throughput for the systems implementing them

Вариант	Метод эксплуатации экспериментального оборудования	Подход к повышению пропускной способности	Достоинства	Недостатки	Эффективность подхода, $ \delta  \cdot 100\%$
1	Монопольный	Прямое дублирование однотипного экспериментального оборудования [10]	Простота реализации	Избыточность и высокая стоимость развертывания, а также содержания соответствующего экспериментального оборудования	—
2.1	Многопользовательский (на основе МРИУС)	Распараллеливание обработки потока запросов пользователей посредством их обслуживания между экспериментальным оборудованием и математическими моделями установок/стендов/макетов [9, 14]	Возможность реализации комплексных экспериментальных исследований (натурный эксперимент и его аналог — вычислительный эксперимент)	Ограниченные возможности применения, например, в рамках исследовательского эксперимента в области идентификации или верификации математических моделей	Оценка не проводилась*
2.2		Распараллеливание обработки потока запросов пользователей посредством дублирования однотипных лабораторных установок/стендов/макетов и пр. [12, 15, 17]	Простота реализации	Высокие относительные материальные затраты на реализацию, кратные стоимости дополнительных комплектов дублирующего экспериментального оборудования	До пяти
2.3		Управление процедурой обслуживания запросов пользователей [18–20]	Реализуется посредством простой программной модификации диспетчера разделяемого ресурса	Необходимость информации о длительностях функциональных операций, выполняемых по запросам пользователей	До 40 и более

\*Примечание. С методической точки зрения современная ЦОС должна предусматривать возможность проведения экспериментальных исследований совместно на физических объектах и их математических моделях (цифровых двойниках).



- **Рис. 1.** Представление процесса работы пользователей с разделяемым ресурсом МРИУС в виде СМО
- **Fig. 1.** Representation of the process of users' work process with shared resource of multi-user distributed measuring-control systems as a queuing system



способности системы, зависящему от соответствующего числа введенных дублирующих аппаратных средств. При этом в качестве его основного недостатка следует отметить увеличение затрат на создание МРИУС, в общем случае прямо пропорциональное числу организуемых дополнительных «обслуживающих приборов» [12, 15, 17].

### Методы повышения пропускной способности МРИУС

Предложенный авторами данной статьи подход управления процедурой обслуживания запросов (вариант 2.3) воплощается посредством применения ряда разработанных специализированных методов и реализующих их алгоритмов диспетчеризации, которые учитывают функциональное и параметрическое содержание обрабатываемых запросов пользователей [18–20]. Под содержанием запроса понимаются установленные пользователем параметры выполняемых в МРИУС функциональных операций управления и измерения (настройки конфигурации объекта исследования, вид выполняемых измерений, параметры тестовых сигналов и пр.), а также особенности аппаратного построения МРИУС.

Для МРИУС, в которых доминирующей составляющей времени обслуживания запросов является время управления изменением состояния объекта исследования, предложен метод минимизации операций управления [18]. Суть данного метода заключается в определении последовательности извлечения заданий из очереди в соответствии с минимумом суммарного времени управления для всех запросов, имеющих на текущий момент в очереди. При указанном подходе обеспечивается сокращение времени обслуживания заданий за счет минимизации перекрестных дублирующих операций перестройки объекта исследования. В результате достигается повышение оперативности функционирования МРИУС и, как следствие, ее пропускной способности.

Для МРИУС, в которых в процессе функционирования выполняются измерения с усреднением результатов многократных «точечных» измерений и (или) измеряемых зависимостей, применяется метод временного разделения многократных измерений [19]. Метод основан на распределении операций обработки результатов измерения между программным обеспечением измерительно-управляющей ЭВМ и терминала пользователя. При использовании данного метода вычисление средних арифметических значений осуществляется средствами графического интерфейса пользователя на основе рекуррентного алгоритма, что обеспечивает сокращение времени измерения за счет увеличения числа запросов каждого поль-

зователя к измерительно-управляющей ЭВМ и в ряде случаев позволяет повысить пропускную способность МРИУС.

Для многообъектовых МРИУС предложен метод распараллеливания выполняемых функциональных операций [20]. Суть данного метода заключается в программном разделении и параллельном выполнении операций управления и измерения для имеющихся в очереди запросов и относящихся к разным объектам управления и контроля, что обеспечивает сокращение времени обслуживания запросов и, как следствие, приводит к повышению пропускной способности МРИУС.

Эффективность применения предложенных методов повышения пропускной способности и реализующих их алгоритмов диспетчеризации в МРИУС зависит от соотношений длительностей выполняемых операций управления и измерения в соответствии с поступающими запросами. В связи с этим решение об использовании конкретного метода на этапе проектирования или эксплуатации МРИУС целесообразно принимать на основе анализа величины достигаемого относительного приращения пропускной способности, расчет которого может быть выполнен, например, средствами математического моделирования [18–20].

В целом же алгоритмы диспетчеризации, реализующие рассмотренные выше методы, позволяют повысить оперативность реакции МРИУС при выполнении запросов пользователей и, как следствие, обеспечивают возможность подключения дополнительных терминалов пользователей посредством внесения изменений только в соответствующее программное обеспечение МРИУС, исключая необходимость наращивания числа комплектов однотипного дублирующего экспериментального оборудования (аппаратных средств).

### Оценка эффективности методов повышения пропускной способности МРИУС

Для оценки эффективности применяемых и предложенных методов повышения пропускной способности МРИУС рассмотрим представленные в таблице методы эксплуатации экспериментального оборудования с точки зрения обобщенного параметра, характеризующего приведенные затраты на оснащение одного рабочего места пользователя, —  $S_{p.m}$ .

При *монопольном* методе эксплуатации (вариант 1) затраты на оснащение дополнительных рабочих мест возрастают прямо пропорционально числу дополнительно вводимых комплектов лабораторных установок/стендов/макетов и соот-

ветствующих устройств. Таким образом, приведенные затраты остаются без изменения:

$$S_{p.m} = \frac{1}{N}(S_{a.o}N) = S_{a.o}, \quad (1)$$

где  $S_{a.o}$  — стоимость одного экземпляра (комплекта) экспериментального оборудования;  $N$  — число одновременно работающих пользователей.

При *многопользовательском* методе эксплуатации (варианты 2.1–2.3) суммарные затраты на соответствующее аппаратно-программное обеспечение МРИУС «разделяются» между числом одновременно работающих пользователей. В итоге для многопользовательского метода эксплуатации экспериментального оборудования, реализуемого на основе МРИУС, себестоимость оснащения одного рабочего места обратно пропорциональна их общему количеству:

$$S_{p.m} = \frac{S_{\Sigma}}{N}, \quad (2)$$

где под  $S_{\Sigma}$  подразумеваются суммарные затраты на создание образца МРИУС, включающие в себя в том числе и  $S_{a.o}$ ;  $N$  — число одновременно работающих терминалов пользователей.

Рассмотрим основные подходы повышения пропускной способности применительно к многопользовательскому методу эксплуатации экспериментального оборудования (лабораторных установок/стендов/макетов и соответствующих устройств). Обозначим переменной  $\alpha$  относительное изменение числа одновременно работающих пользователей, обусловленное реализацией комплекса мероприятий, направленных на повышение пропускной способности МРИУС согласно одному из реализуемых подходов (см. таблицу):

$$\alpha = \frac{N^M - N}{N}, \quad (3)$$

где  $N$  и  $N^M$  — число одновременно работающих пользователей в исходной и модифицированной МРИУС соответственно.

Обозначим переменной  $\beta$  относительное изменение материальных затрат, связанное с реализацией соответствующего подхода:

$$\beta = \frac{S_{\Sigma}^M - S_{\Sigma}}{S_{\Sigma}}, \quad (4)$$

где  $S_{\Sigma}$  и  $S_{\Sigma}^M$  — затраты на реализацию исходной и модифицированной системы.

Относительное изменение затрат на оснащение одного рабочего места при реализации одного из подходов к повышению пропускной способно-

сти, характеризующее его эффективность, оценивается на основе следующего выражения:

$$\delta = \frac{S_{p.m}^M - S_{p.m}}{S_{p.m}} = \frac{S_{p.m}^M}{S_{p.m}} - 1, \quad (5)$$

где  $S_{p.m}$ ,  $S_{p.m}^M$  — себестоимость оснащения рабочего места в исходной и модифицированной МРИУС соответственно.

С учетом выражений (2)–(4) выражение (5) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{S_{p.m}^M}{S_{p.m}} - 1 = \frac{S_{\Sigma}^M}{N^M S_{\Sigma}} - 1 = \\ &= \frac{(\beta + 1)S_{\Sigma}}{(\alpha + 1)N S_{\Sigma}} - 1 = \frac{\beta + 1}{\alpha + 1} - 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Рассмотрим выражение (6). При реализации подхода распараллеливания потока запросов посредством дублирования комплектов экспериментального оборудования (вариант 2.2)  $\alpha \approx 1 \dots 1,1$  [16]. Учитывая возрастающую стоимость используемого в качестве разделяемого ресурса экспериментального оборудования для данного подхода можно принять  $\beta \approx 1$ . Таким образом, относительное изменение себестоимости оснащения рабочего места для данного подхода составляет 0...–5 %.

При реализации предложенного авторами подхода, основанного на управлении процедурой обслуживания запросов (вариант 2.3), соответствующие затраты на модификацию диспетчера разделяемого ресурса МРИУС при повышении уникальности и стоимости используемых в качестве разделяемого ресурса МРИУС экспериментального оборудования, являются пренебрежительно малыми по сравнению с величиной  $S_{\Sigma}$ . То есть можно принять  $\beta \approx 0$ . Таким образом, для данного подхода выражение (6) можно записать следующим образом:

$$\delta \approx \frac{1}{(1 + \alpha)} - 1. \quad (7)$$

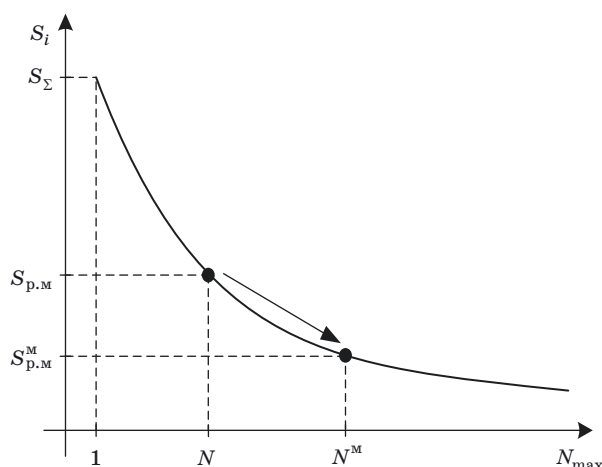
Относительное приращение числа терминалов пользователей характеризуется эффективностью применения соответствующего алгоритма диспетчеризации и, например, для ряда МРИУС  $\alpha$  принимает значения 0,2...0,65 и более [18–20]. Таким образом, сокращение затрат на оснащение одного рабочего места, характеризующее эффективность применения предложенного авторами подхода повышения пропускной способности МРИУС, для приведенных значений  $\alpha$  достигает 40 % и более (см. таблицу). Результаты оценки возможных значений величины  $\delta$  для исследованных подходов приведены в соответстви-

ющем столбце таблицы. Учитывая тот факт, что современная ЦОС должна предусматривать возможность проведения экспериментальных исследований на физических объектах в комплексе с возможностью исследования математических моделей исследуемых объектов, устройств, процессов и явлений, оценка эффективности для соответствующего подхода повышения пропускной способности МРИУС (вариант 2.1) не проводилась.

Подход повышения пропускной способности МРИУС посредством дублирования комплектов однотипного экспериментального оборудования (вариант 2.2) также может быть использован совместно с предложенными и апробированными авторами методами и алгоритмами диспетчеризации (вариант 2.3). Это обеспечивает в ряде случаев исключение необходимости дальнейшего увеличения числа однотипных комплектов при возникающей потребности в увеличении числа обслуживаемых терминалов пользователей.

Предложенные методы реализуют направление повышения технического уровня МРИУС за счет снижения себестоимости оснащения одного рабочего места посредством увеличения общего числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей [см. выражение (2)]. Данный подход схематично представлен на рис. 2.

Выбор одного из предложенных методов повышения оперативности функционирования МРИУС в рамках управления процедурой обслуживания запросов (вариант 2.3) может быть выполнен как на этапе проектирования при наличии эмпирической информации о длительно-



■ **Рис. 2.** Направление снижения себестоимости рабочего места пользователя в МРИУС посредством повышения ее оперативности функционирования

■ **Fig. 2.** Cost reduction for the user workplace in multi-user distributed measuring-control systems by increasing its operational efficiency

стях выполняемых функциональных операций и их зависимостях от значений соответствующих параметров, так и в процессе функционирования МРИУС посредством реализации методики ее адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации, подробно рассмотренной в работе [5]. Так, в частности, применение предложенной методики адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации позволило посредством целевой модификации алгоритма диспетчеризации разделяемого ресурса в соответствии с разработанными авторами методами (см. вариант 2.3) увеличить на 35–50 % число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей для ряда образцов МРИУС при сохранении времени реакции на прежнем уровне [18–20], а также создать необходимые условия для их параллельного использования несколькими потоками обучаемых, в том числе в рамках смежных дисциплин, курсового проектирования, ФПК, НИРС.

## Заключение

Разработанные и предложенные авторами методы повышения пропускной способности МРИУС, основанные на управлении процедурой обслуживания запросов, позволили посредством целевой модификации алгоритма диспетчеризации создать ряд образцов МРИУС автоматизации учебных и научных экспериментальных исследований со сниженной на 16–40 % себестоимостью оснащения рабочего места пользователя и пропускной способностью 30–50 одновременно работающих пользователей на основе одного комплекта специализированного экспериментального оборудования.

Дальнейшее развитие направления повышения числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей в МРИУС авторами планируется в части разработки и исследования методов повышения оперативности функционирования с учетом технических особенностей их разделяемого ресурса и специфики прикладного назначения МРИУС.

## Литература

1. Sanjie J., Oruklu E., Hanley R., Anand V., Anjali T. Transforming computer engineering laboratory courses for distance learning and collaboration. *International Journal of Engineering Education*, 2015, vol. 31, no. 1(A), pp. 106–120.
2. Grodotzki J., Ortelt T. R., Tekkaya A. E. Remote and virtual labs for engineering education 4.0. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 1349–1360. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.126

3. Gula M., Zakova K. Proposal of component based architecture for internet of things: online laboratory case study. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, iss. 1, pp. 337–342. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.153
4. Zapata Rivera L. F., Larrondo Petrie M. M. Models of collaborative remote laboratories and integration with learning environments. *iJOE*, 2016, vol. 12, no. 9, pp. 14–21. doi:10.3991/ijoe.v12i09.6129
5. Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р. Многопользовательские распределенные измерительно-управляющие системы как элемент современной цифровой образовательной среды. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 2, с. 83–94. doi:10.31799/1684-8853-2019-2-83-94
6. Fomin S. S., Gudkov Y. I., Tumkovskiy S. R. Concept of a virtual workshop on ICT. *2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*, 2018, pp. 787–790. doi:10.1109/itmqs.2018.8525034
7. Seiler S. Current trends in remote and virtual lab engineering. Where are we in 2013? *iJOE*, 2013, vol. 9, no. 6, pp. 13–16. doi:10.3991/ijoe.v9i6.2898
8. Tawfik M., Salzmann C., Gillet D., Lowe D., Salih-Hassane H., Sancristobal E., Castro M. Laboratory as a Service (LaaS): a novel paradigm for developing and implementing modular remote laboratories. *iJOE*, 2014, vol. 10, no. 4, pp. 13–21, doi:10.3991/ijoe.v10i4.3654
9. Липай Б. Р., Маслов С. И. Интернет-лаборатория «Основы электротехники и электроники» как пример современного учебного комплекса с удаленным доступом для открытого инженерного образования. *Вестник Московского энергетического института*, 2017, № 2, с. 71–76. doi:10.24160/1993-6982-2017-2-71-76
10. *Cyber-physical laboratories in engineering and science education/* Eds. M. E. Auer, A. K. M. Azad, A. Edwards, T. De Jong. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. 434 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76935-6>
11. Отраслевой стандарт 9.2–98. Учебная техника для образовательных учреждений. Системы автоматизированного лабораторного практикума. Основные положения. М., Росстандарт, 1998. 8 с.
12. Toyoda Y., Koike N., Li Y. An FPGA-based remote laboratory: Implementing semi-automatic experiments in the hybrid cloud. *2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, 2016, pp. 24–29. doi:10.1109/REV.2016.7444435
13. Tawfik M., Sancristobal E., Martin S., Gil R., Diaz G., Colmenar A., Peire J., Castro M., Nilsson K., Zackrisson J., Hakansson L., Gustavsson I. Virtual instrument systems in reality (VISIR) for remote wiring and measurement of electronic circuits on breadboard. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 60–72. doi:10.1109/TLT.2012.20
14. Markan C. M., Gupta P., Manas, Kumar G., Gupta S. Scalable multiuser remote laboratories provide on-demand hands-on laboratory experience. *2012 IEEE Conference on Technology and Society in Asia (T&SA)*, 2012, pp. 1–7. doi:10.1109/TSAAsia.2012.6397981
15. Yudi Limpraptono F., Putri Ratna A. A., Sudibyo H. New architecture of remote laboratories multiuser based on embedded web server. *iJOE*, 2013, vol. 9, iss. 6, pp. 4–11. doi:10.3991/ijoe.v9i6.2886
16. Макаров А. Е., Сагдиев Р. К. Лабораторный стенд для исследования параметров высокочастотного цифрового сигнала. *Сборник трудов XV Международной конференции NI Days-2016*. М., ДМК-пресс, 2016, с. 177–178.
17. Евдокимов Ю. К., Кирсанов А. Ю., Салахова А. Ш., Петровская М. В. Дистанционные учебные лаборатории на аппаратной платформе NI. *Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments — 2012: сборник трудов XI Международной научно-практической конференции*, Москва, 6–7 декабря 2012 г., М., ДМК-Пресс, 2012, с. 232–236.
18. Комаров В. А., Сарафанов А. В. Оптимизация операций управления в многопользовательских измерительно-управляющих системах. *Информационно-управляющие системы*, 2011, № 3, с. 52–56.
19. Комаров В. А., Глинченко А. С. Исследование эффективности временного разделения многократных измерений в распределенных измерительно-управляющих системах. *Информационно-управляющие системы*, 2013, № 4, с. 73–77.
20. Комаров В. А., Глинченко А. С., Сарафанов А. В. Распараллеливание функциональных операций в многопользовательских распределенных измерительно-управляющих системах. *Датчики и системы*, 2012, № 4, с. 2–5.

UDC 62.519

doi:10.31799/1684-8853-2019-6-68-76

**Comparison of the effectiveness of methods to increase the throughput of experimental equipment with remote access**V. A. Komarov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-9210-9908A. V. Sarafanov<sup>b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0003-4264-9388S. R. Tumkovskiy<sup>c</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-1647-2171, STumkovskiy@hse.ru<sup>a</sup>SC «Academician M. F. Reshetnev «Information Satellite System», 52, Lenin St., 662972, Zheleznogorsk, Russian Federation<sup>b</sup>OOO Vitte Consulting (GK «I-Teco»), 15, Kedrov St., 117036, Moscow, Russian Federation<sup>c</sup>National Research University «Higher School of Economics», 20, Myasnitskaya St., 101000, Moscow, Russian Federation

**Introduction:** The rapid development of the information society is expressed in the emergence of new models of economic activity, forms of providing educational and social services, scientific activities, etc. on the basis of constantly improving digital technologies. This, in turn, leads to the emergence of new requirements for knowledge and skills of modern engineers whose preparation is based on various laboratory studies. The modern form of realization of such researches is multi-user remote access from digital educational environment to specialized experimental equipment (laboratory installations/stands/layouts), providing efficient use of this equipment. **Purpose:** Comparative analysis of methods for increasing the throughput of experimental equipment with multi-user remote access. **Methods:** Management of user request service procedure based on scheduling algorithms which take into account the functional and parametric content of the processed requests (configuration settings of the object of study, type of measurements taken, parameters of test signals, etc.), as well as the features of the hardware construction. **Results:** On the basis of the proposed approach for multi-user distributed measuring-control systems the following methods are developed: 1. A method of minimizing control operations which determines the sequence of retrieving jobs from the queue in accordance with the minimum of total control time for all the requests currently in the queue. 2. A method of temporary division of multiple measurements, providing distribution of operations of statistical processing of measurement results between the software on a measuring-control computer and the user terminal. 3. A method of parallelizing functional operations which reduces the time to service the requests by programmatically splitting and concurrently performing the management and measuring operations for queued queries related to different control objects. A comparative analysis of the applied approaches has shown that the most effective, in terms of the cost of equipping a single user workplace, are methods based on managing the process of servicing the user requests. **Practical relevance:** The developed methods have made it possible to create a number of samples of multi-user distributed measuring-control systems for the automation of educational and scientific experimental researches with a 16–40% lower cost of equipping a workplace and with throughput of 30–50 concurrent users on the basis of one set of specialized experimental equipment.

**Keywords** — experimental equipment with remote access, multi-user distributed measuring-control system, automation of educational and scientific experimental studies, throughput, multi-user access, digital educational environment, queuing system.

**For citation:** Komarov V. A., Sarafanov A. V., Tumkovskiy S. R. Comparison of the effectiveness of methods to increase the throughput of experimental equipment with remote access. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 68–76 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-68-76

**References**

- Saniie J., Oruklu E., Hanley R., Anand V., Anjali T. Transforming computer engineering laboratory courses for distance learning and collaboration. *International Journal of Engineering Education*, 2015, vol. 31, no. 1(A), pp. 106–120.
- Grodotski J., Ortelt T. R., Tekkaya A. E. Remote and virtual labs for engineering education 4.0. *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 26, pp. 1349–1360. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.126
- Gula M., Zakova K. Proposal of component based architecture for internet of things: online laboratory case study. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, iss. 1, pp. 337–342. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.153
- Zapata Rivera L. F., Larrondo Petrie M. M. Models of collaborative remote laboratories and integration with learning environments. *iJOE*, 2016, vol. 12, no. 9, pp. 14–21. doi:10.3991/ijoe.v12i09.6129
- Komarov V. A., Sarafanov A. V., Tumkovskiy S. R. Multi-user distributed information-control systems as an element of modern digital educational environment. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 2, pp. 83–94 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-2-83-94
- Fomin S. S., Gudkov Y. I., Tumkovskiy S. R. Concept of a virtual workshop on ICT. *2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*, 2018, pp. 787–790. doi:10.1109/itmqs.2018.8525034
- Seiler S. Current trends in remote and virtual lab engineering. Where are we in 2013? *iJOE*, 2013, vol. 9, no. 6, pp. 13–16. doi:10.3991/ijoe.v9i6.2898
- Tawfik M., Salzmann C., Gillet D., Lowe D., Saliah-Hassane H., Sancristobal E., Castro M. Laboratory as a Service (Laas): a novel paradigm for developing and implementing modular remote laboratories. *iJOE*, 2014, vol. 10, no. 4, pp. 13–21. doi:10.3991/ijoe.v10i4.3654
- Lipay B. R., Maslov S. I. The Internet-based laboratory "Fundamentals of electrical engineering and electronics" as an example of a modern remotely accessible educational package for obtaining open engineering education. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2017, no. 2, pp. 71–76 (In Russian). doi:10.24160/1993-6982-2017-2-71-76
- Cyber-physical laboratories in engineering and science education*. Eds. M. E. Auer, A. K. M. Azad, A. Edwards, T. De Jong. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. 434 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76935-6
- Industry standard 9.2–98. Educational equipment for educational institutions. Systems of automated laboratory practicum. The main provisions. Moscow, Rosstandart Publ., 1998. 8 p. (In Russian).
- Toyoda Y., Koike N., Li Y. An FPGA-based remote laboratory: Implementing semi-automatic experiments in the hybrid cloud. *2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, 2016, pp. 24–29. doi:10.1109/REV.2016.7444435
- Tawfik M., Sancristobal E., Martin S., Gil R., Diaz G., Colmenar A., Peire J., Castro M., Nilsson K., Zackrisson J., Hakansson L., Gustavsson I. Virtual instrument systems in reality (VISIR) for remote wiring and measurement of electronic circuits on breadboard. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 60–72. doi:10.1109/TLT.2012.20
- Markan C. M., Gupta P., Manas, Kumar G., Gupta S. Scalable multiuser remote laboratories provide on-demand hands-on laboratory experience. *2012 IEEE Conference on Technology and Society in Asia (T&SA)*, 2012, pp. 1–7. doi:10.1109/TSAsia.2012.6397981
- Yudi Limpraptono F., Putri Ratna A. A., Sudibyo H. New architecture of remote laboratories multiuser based on em-

- bedded web server. *iJOE*, 2013, vol. 9, iss. 6, pp. 4–11. doi:10.3991/ijoe.v9i6.2886
16. Makarov A. E., Sagdiev R. K. Laboratory stand for studying the parameters of high-frequency digital signal. *Sbornik trudov XV Mezhdunarodnoy konferentsii "NI Days-2016"* [Proc. XV Int. Conf. "NI Days-2016"], Moscow, 2016, pp. 177–178 (In Russian).
  17. Evdokimov Yu. K., Kirsanov A. Yu., Salakhova A. Sh., Petrovskaya M. V. Remote educational laboratories on the NI hardware platform. *Sbornik trudov XI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tekhnologiy National Instruments — 2012"* [Proc. of XI Int. Sci. and Tech. Conf. "Engineering and Scientific Applications Based on National Instruments Technology — 2012"], Moscow, DMK-Press Publ., 2012, pp. 232–236 (In Russian).
  18. Komarov V. A., Sarafanov A. V. Optimization of process control in the multi-user distributed measuring-controlling system. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2011, no. 3, pp. 52–56 (In Russian).
  19. Komarov V. A., Glinchenko A. S. The research on efficiency of time separation multiple measurement in distributed measurement and control systems. *Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 4, pp. 73–77 (In Russian).
  20. Komarov V. A., Glinchenko A. S., Sarafanov A. V. Parallelization of functional operations in the multi-user distributed measuring-controlling system. *Sensors & Systems*, 2012, no. 4, pp. 2–5 (In Russian).

---

## 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](mailto:ius.spb@gmail.com)).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*

---

## Использование искусственных нейронных сетей для классификации электрической активности головного мозга в процессе воображения движений у нетренированных испытуемых

С. А. Куркин<sup>а</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-3438-5717](https://orcid.org/0000-0002-3438-5717), [kurkinsa@gmail.com](mailto:kurkinsa@gmail.com)

Е. Н. Пицик<sup>а</sup>, младший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0003-1850-2394](https://orcid.org/0000-0003-1850-2394)

А. Е. Храмов<sup>а</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор, [orcid.org/0000-0003-2787-2530](https://orcid.org/0000-0003-2787-2530)

<sup>а</sup>Лаборатория нейронауки и когнитивных технологий, Центр технологий компонентов робототехники и мехатроники, Университет Иннополис, ул. Университетская, 1, Иннополис, 420500, РФ

**Введение:** разработка новых методов классификации состояний электрической активности головного мозга человека, связанных с реальными и воображаемыми движениями нижними конечностями, является актуальной междисциплинарной задачей в сфере разработки интерфейсов мозг-компьютер. Одним из наиболее эффективных подходов к решению данной задачи является использование алгоритмов на основе искусственных нейронных сетей. **Цель:** разработка метода распознавания и классификации электроэнцефалографических паттернов, соответствующих воображаемым движениям группы нетренированных испытуемых, на основе искусственных нейронных сетей. **Методы:** рассмотрены классификаторы на основе линейных нейронных сетей, многослойных перцептронов, сетей радиальных базисных функций, машин опорных векторов. **Результаты:** проведены работы по подбору оптимальных типа, топологии, алгоритмов обучения и параметров нейронной сети с точки зрения наиболее точного и быстрого распознавания и классификации паттернов многоканальных электроэнцефалографических сигналов, ассоциированных с воображением движений нижними конечностями. Изучено влияние количества и выбора анализируемых каналов многоканальной электроэнцефалограммы на качество распознавания воображаемых движений, получены оптимальные конфигурации расстановок электродов. Проведен анализ влияния предварительной обработки электроэнцефалографических сигналов на точность распознавания воображаемых движений. В результате вычислительного эксперимента была достигнута точность распознавания воображаемых движений порядка 90–95 % для нетренированных испытуемых, при этом сеть радиальных базисных функций демонстрирует наилучшую точность классификации. Помимо этого удалось значительно снизить размерность выборки данных, используемых при обучении и тестировании сети, — до 6–12 каналов без потери точности классификации. **Практическая значимость:** полученные результаты будут полезны для разработчиков алгоритмов распознавания сигналов электроэнцефалографии, соответствующих воображаемой моторной активности, для интерфейсов мозг-компьютер.

**Ключевые слова** — нейронные сети, интерфейс мозг-компьютер, электроэнцефалограмма, анализ сигналов электроэнцефалограммы, мозговая активность, многослойный перцептрон, радиальная базисная функция, метод опорных векторов.

**Для цитирования:** Куркин С. А., Пицик Е. Н., Храмов А. Е. Использование искусственных нейронных сетей для классификации электрической активности головного мозга в процессе воображения движений у нетренированных испытуемых. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 6, с. 77–84. doi:10.31799/1684-8853-2019-6-77-84

**For citation:** Kurkin S. A., Pitsik E. N., Hramov A. E. Classifying electrical activity of the brain during imaginary movements of untrained subjects using artificial neural networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 77–84 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-77-84

### Введение

Развитие методов распознавания различных типов нейронной активности головного мозга человека, связанной с осуществлением и (или) с воображением движений верхними и нижними конечностями, является принципиально необходимым для разработки интерфейсов «мозг-компьютер», которые востребованы во многих областях науки и техники [1–4]. В частности, подобные интерфейсы завоевали интерес исследователей с точки зрения потенциала их использования при реабилитации и повышения качества жизни пациентов с ограниченными возможностями здоровья, в том числе при социальной адаптации и

коррекции когнитивных навыков, а также при восстановлении двигательных функций, для «ментального» управления экзоскелетами, манипуляторами, роботами и другими сложными техническими устройствами [5–7]. Кроме того, интерфейсы мозг-компьютер могут быть использованы вне контекста реабилитации для повышения эффективности процесса обучения путем внедрения биологической обратной связи [8].

Ряд последних исследований, проведенных с тренированными испытуемыми, показывает, что задача идентификации паттернов мозговой активности, ассоциированных с движениями, в том числе нижних конечностей, может быть решена с помощью различных математических

методов анализа многоканальных электроэнцефалограмм (ЭЭГ) [9–11], реже — магнитоэнцефалограмм [12]. В настоящее время наиболее часто для этого используются с той или иной степенью эффективности методы: основанные на выделении частотно-временной структуры сигналов [13]; восстановления связей между различными областями мозга на основании многоканальных данных [14]; нелинейной динамики [15]; машинного обучения и искусственного интеллекта [16, 17]. Среди последних наиболее перспективными оказываются методы, основанные на применении искусственных нейронных сетей (ИНС). Способность ИНС к обобщению и выделению сложных зависимостей между событием и реакцией на него делает основанные на них модели весьма эффективным инструментом для анализа данных различной природы [18, 19]. Однако для их успешного использования важным является подбор оптимальных параметров нейронной сети с точки зрения наиболее точного и быстрого распознавания и классификации данных [20]. Кроме того, эффективность классификации напрямую зависит от подбора репрезентативной обучающей выборки, которая должна наиболее точно отражать свойства для классифицируемых данных зависимости. В контексте распознавания воображаемых движений нижних конечностей распространена практика обучения нейронных сетей на данных тренированных испытуемых, т. е. людей, неоднократно проходивших эксперимент. Важно отметить, что решение задачи классификации паттернов ЭЭГ в случае с нетренированными испытуемыми является существенно более сложным, важным и малоизученным вопросом [21–24], поскольку классификация таких данных зачастую затруднена из-за шумов, нестационарности ЭЭГ и сильной вариабельности особенностей среди группы испытуемых [4, 25].

В данной работе на основании аппарата ИНС разработана методика распознавания и классификации паттернов ЭЭГ, соответствующих воображаемым движениям нижними конечностями, полученных в ходе эксперимента с группой из 12 нетренированных испытуемых. Для этого проведены работы по подбору оптимальных типа, топологии, алгоритмов обучения и параметров нейронной сети с точки зрения наиболее точного и быстрого распознавания и классификации паттернов на многоканальных ЭЭГ, ассоциированных с воображением движений. Были рассмотрены наиболее часто используемые архитектуры нейронных сетей: линейная сеть, многослойный персептрон, сеть на базе радиальных базисных функций и метод опорных векторов.

В работе также изучено влияние выбора используемых регистрирующих электродов (фак-

тически, анализируемых каналов ЭЭГ) на точность распознавания воображаемых движений и получены оптимальные конфигурации расстановок электродов. Актуальность постановки и решения подобной задачи обусловлена практической значимостью нахождения таких конфигураций расстановок с минимальным количеством электродов, которые обеспечили бы требуемую точность распознавания. Проанализировано влияние предварительной обработки сигналов ЭЭГ (фильтрации, изменения длительности используемого для обучения ИНС временного интервала) с точки зрения повышения точности распознавания воображаемых движений.

Проведенные в работе исследования важны не только с прикладной, но и с фундаментальной точки зрения, так как позволят продвинуться в понимании сложных механизмов функционирования мозга и происходящих в нем процессов.

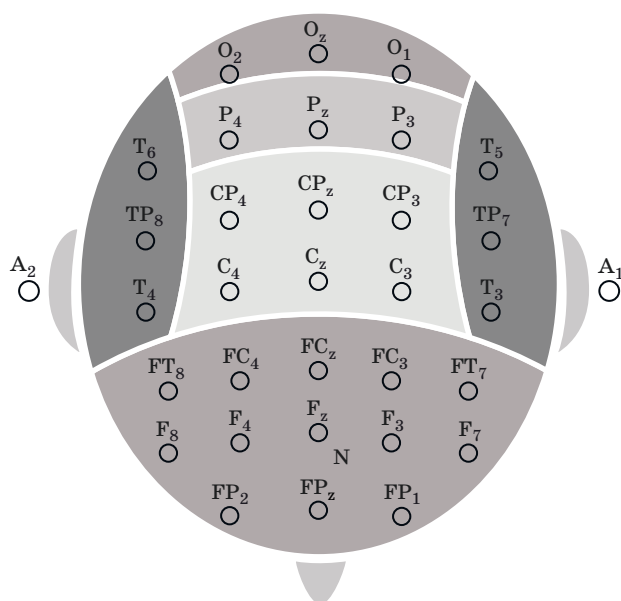
### Описание эксперимента

В эксперименте принимали участие 12 условно здоровых добровольцев: 6 мужчин и 6 женщин в возрасте от 20 до 43 лет. Размер группы испытуемых является довольно типичным для подобных исследований, основанных на анализе ЭЭГ [26], и достаточным для демонстрации возможности построения эффективного классификатора с применением методов машинного обучения. Выборка испытуемых является практически однородной: она состоит из 50 % мужчин и 50 % женщин среднего возраста [27]. Запись ЭЭГ-сигнала проводилась современным высокоточным оборудованием «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (г. Таганрог, Россия), с помощью которого был получен сигнал с частотой дискретизации 250 Гц с использованием 31 электрода, расположенных по расширенной международной схеме 10-10 (рис. 1).

Положение испытуемого проверялось в начале эксперимента и оставалось практически неизменным в течение всей сессии. Испытуемый сидел в специальном удобном кресле, при этом его ноги лежали без обуви на специальной подставке, а руки — на подлокотниках. Ноги были слегка согнуты в коленях и находились в свободном расслабленном состоянии.

Каждый испытуемый принимал участие в одном эксперименте, длящемся приблизительно 30 мин, в течение которого он выполнял два типа заданий: I — воображаемое движение левой ногой (поднятие ноги в бедре) и II — воображаемое движение правой ногой. Эксперимент состоял из 10 сессий, в половине из которых испытуемый выполнял задания I, а в другой половине — задания II (20 повторений задания за сессию). Выполнению каждого задания в сессиях пред-





■ **Рис. 1.** Расширенная схема 10-10 размещения электродов на голове человека. Области зон мозга: F (frontal) — лобные; C (central) — центральные; T (temporal) — височные; P (parietal) — теменные и O (occipital) — затылочные отведения. A<sub>1</sub> и A<sub>2</sub> — референсные электроды, N — заземляющий электрод

■ **Fig. 1.** Extended 10-10 international electrode system on the human head. Brain areas: F — frontal; C — central; T — temporal; P — parietal and O — occipital. A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> are referent electrodes, N — stands for ground

шествовал звуковой сигнал, после которого испытуемый должен был вообразить поднятие ноги в течение 4 с. Инструкция к заданию (движение правой или левой ногой, перерыв) давалась в виде текстовой команды, появляющейся на экране. Для этого использовался монитор VenQ с разрешением 1920 × 1080 и частотой обновления экрана 60 Гц. Таким образом, были известны моменты времени начала попытки выполнения каждого воображаемого движения. Эта информация использовалась в дальнейшем для разметки и «нарезки» данных. Между сессиями были небольшие перерывы (~2 мин) для отдыха испытуемых. Эксперименты проходили в первой половине дня в специально оборудованной лаборатории, в которой минимизировалось влияние внешних раздражителей.

Дальнейший анализ проводился на персональном компьютере применительно к снятым сигналам многоканальных ЭЭГ на основании аппарата ИНС в пакете MatLab, при этом использовались либо все каналы сразу (31 канал), либо каналы, соответствующие различным зонам на голове. Все рассмотренные в работе зоны с детализацией используемых каналов (электродов) в каждой зоне приведены в таблице.

■ Зоны на схеме размещения электродов 10-10 с детализацией используемых каналов (электродов) в каждой зоне [28]

■ Brain areas according to the international 10-10 system of electrodes location with specification of used channels (electrodes) [28]

Наименование зоны	Используемые каналы
Полная расстановка	FP <sub>z</sub> , FP <sub>1</sub> , FP <sub>2</sub> , F <sub>z</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>7</sub> , F <sub>8</sub> , FC <sub>z</sub> , FC <sub>3</sub> , FC <sub>4</sub> , FT <sub>7</sub> , FT <sub>8</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub> , CP <sub>z</sub> , CP <sub>3</sub> , CP <sub>4</sub> , TP <sub>7</sub> , TP <sub>8</sub> , P <sub>z</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub> , C <sub>z</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub> , O <sub>z</sub> , O <sub>1</sub> , O <sub>2</sub>
Лобная (F+FP)	FP <sub>z</sub> , FP <sub>1</sub> , FP <sub>2</sub> , F <sub>z</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>7</sub> , F <sub>8</sub>
Височная (T)	T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub>
Центральная (C)	C <sub>z</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub>
Центральная и височная (C+T)	T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub> , C <sub>z</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub>
Теменная (P)	P <sub>z</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub>
Теменная и центральная (P+C)	P <sub>z</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub> , C <sub>z</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub>
Теменная и затылочная (P+O)	P <sub>z</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub> , O <sub>z</sub> , O <sub>1</sub> , O <sub>2</sub>
Теменная, затылочная и центральная (P+C+O)	P <sub>z</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>4</sub> , C <sub>z</sub> , C <sub>3</sub> , C <sub>4</sub> , O <sub>z</sub> , O <sub>1</sub> , O <sub>2</sub>
Правое полушарие	FP <sub>2</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>8</sub> , FC <sub>4</sub> , FT <sub>8</sub> , T <sub>4</sub> , T <sub>6</sub> , CP <sub>4</sub> , TP <sub>8</sub> , P <sub>4</sub> , C <sub>4</sub> , O <sub>2</sub>
Левое полушарие	FP <sub>1</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>7</sub> , FC <sub>3</sub> , FT <sub>7</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>5</sub> , CP <sub>3</sub> , TP <sub>7</sub> , P <sub>3</sub> , C <sub>3</sub> , O <sub>1</sub>
Середина	FP <sub>z</sub> , F <sub>z</sub> , FC <sub>z</sub> , C <sub>z</sub> , CP <sub>z</sub> , P <sub>z</sub> , O <sub>z</sub>
Лобная и височная (FP+F+T)	FP <sub>z</sub> , FP <sub>1</sub> , FP <sub>2</sub> , F <sub>z</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>7</sub> , F <sub>8</sub> , T <sub>3</sub> , T <sub>4</sub> , T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub>

## Основные результаты анализа экспериментальных данных

Проводилась серия вычислительных экспериментов по классификации воображаемых движений левой и правой ногой по сигналам ЭЭГ, соответствующим данным движениям. Для этого массив данных, содержащий события движения, непрерывно записанные в течение одного эксперимента с выбранных каналов ЭЭГ, нарезался на отрезки заданной длительности  $T_f = 2,5$  с или  $T_f = 3$  с, при этом для обучения моделей использовались фрагменты обеих длительностей. Момент времени начала каждого из отрезков и его соответствие виду воображаемого движения определялись на основании информации из разметки данных (см. разд. «Описание эксперимента»).

Важную роль в обучении и использовании нейронных сетей имеет выбор данных. Для обучения и тестирования использовались массивы

данных, содержащие по 6000 точек, что соответствует 24 с записи, при этом один из массивов соответствовал вообразаемым движениям левой ногой, а другой — вообразаемым движениям правой ногой. Массивы состояли из подготовленных 2,5- или 3-секундных фрагментов (триалов) сигналов ЭЭГ, соответствующих одному виду вообразаемого движения. Половина данных массива, выбранная случайным образом, использовалась для обучения ИНС; оставшаяся половина — для контрольной и тестовой выборок (в соотношении 50 на 50 %).

Основной целью работы является построение достаточно точных классификаторов на основании подходов машинного обучения при работе с нетренированными испытуемыми и использовании исходных ЭЭГ-данных (без «отбраковывания» не совсем удачных триалов). Предполагается, что для каждой из попыток воображения движения в регистрируемых ЭЭГ-сигналах содержатся характерные особенности, соответствующие воображению движения, степень выраженности которых зависит от «качества» воображения движения.

Таким образом, ЭЭГ-триалы разделялись на две группы (вообразаемое движение левой или правой ногой) с помощью классификаторов, построенных с использованием следующих методов машинного обучения: линейной сети (ЛС), ИНС радиальных базисных функций (РБФ), многослойного перцептрона (МП), метода опорных векторов (МОВ).

Вариабельность характеристик ЭЭГ-откликов между испытуемыми (в частности, из-за существования различных типов воображения и т. п. [29, 30]) компенсируется тем, что классификатор обучается индивидуально для каждого испытуемого на основании снятых с него ЭЭГ-данных. Таким образом, классификатор учитывает характерные особенности сигналов у каждого испытуемого.

Исследования по оптимизации структур и параметров нейронной сети с точки зрения наиболее точного и быстрого распознавания и классификации паттернов на ЭЭГ, соответствующих вообразаемым движениям, показали, что наилучших результатов удается достигнуть при использовании:

— сети радиальных базисных функций с 251 нейроном в промежуточном слое, 31 входным и одним выходным линейными нейронами;

— МП с одним скрытым слоем из 15 нейронов с функцией активации в виде гиперболического тангенса, входным линейным слоем из 31 нейрона и с одним выходным нейроном с логистической функцией активации;

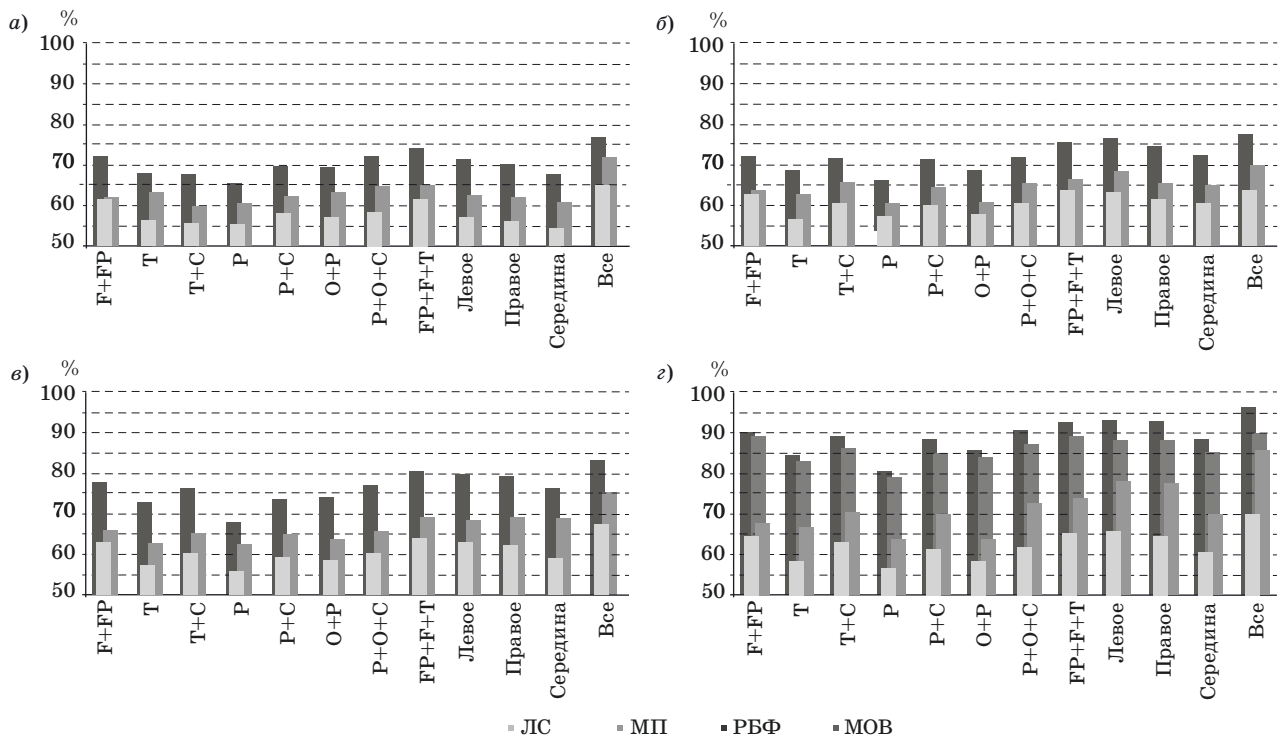
— МОВ с нелинейным ядром в виде РБФ со значением  $0,01 < \gamma < 0,1$ . Для всех случаев исполь-

зовалось около 2000 опорных векторов (по 1000 на каждый классифицируемый класс).

Усредненные по всем испытуемым значения точности распознавания вообразаемых движений ног при использовании различных групп электродов представлены на рис. 2. Видно, что наилучшие результаты классификации демонстрирует сеть РБФ: в случаях без предварительной фильтрации (рис. 2, а и б) — около 80 % в максимуме (при использовании сигналов со всех электродов) и ~70 % в среднем. На втором месте — МП: около 70 % в максимуме и ~65 % в среднем (см. рис. 2, а и б). ЛС показывает неуверенное распознавание со средней точностью на уровне 58 %. Сравнение рис. 2, а и б показывает, что варьирование длительности используемых фрагментов сигналов ЭЭГ  $T_f$  в пределах от 2 до 4 с не оказывает заметного влияния на точность распознавания.

Было исследовано влияние предварительной фильтрации исходных сигналов ЭЭГ с использованием фильтра нижних частот (ФНЧ) с частотой отсечки  $f_c = 15$  Гц или  $f_c = 4$  Гц. Предварительная фильтрация входных данных с применением ФНЧ значительно увеличивает точность распознавания (в среднем на 10–20 %), при этом ФНЧ с  $f_c = 4$  Гц демонстрирует наилучшие результаты и позволяет достигнуть точности классификации вплоть до 95 % (рис. 2, в и г). С физической точки зрения последний результат означает, что существенное увеличение точности распознавания при использовании ФНЧ происходит за счет «очистки» полезного низкочастотного сигнала от высокочастотного шума, который появляется в процессе регистрации ЭЭГ-записей. Заметим, что МОВ показывает в данном случае точность классификации (см. рис. 2, г) на 2–7 % ниже по сравнению с РБФ.

Изучено влияние количества и выбора анализируемых каналов многоканальной ЭЭГ (используемых регистрирующих электродов) на точность распознавания вообразаемых движений. Диаграммы на рис. 2 демонстрируют, что возможно достигнуть высокой точности классификации без использования всех (31) электродов. Например, при выборе электродов из зон FP+FP+T (12 электродов), P+O+C (9 электродов), P+C (6 электродов), T+C (7 электродов) или F+FP (8 электродов) точность распознавания достигает ~90 %. Таким образом, использование сигналов только с 6–12 электродов из определенных зон позволяет достичь почти такой же точности классификации, как при использовании всех сигналов. Этот результат является особенно важным, поскольку он сочетается с современной тенденцией к минимизации нейроинтерфейсов и в перспективе позволит организовать работу с ними без использования профессионального дорогостоящего



■ **Рис. 2.** Усредненная точность (качество) распознавания воображаемых движений ногами по различным группам электродов, которые отложены по горизонтальной оси: а —  $T_f = 3$  с, отсутствует предварительная фильтрация данных; б —  $T_f = 2,5$  с, отсутствует предварительная фильтрация данных; в —  $T_f = 3$  с, к входным данным применяется ФНЧ с  $f_c = 15$  Гц; з —  $T_f = 3$  с, к входным данным применяется ФНЧ с  $f_c = 4$  Гц [28]

■ **Fig. 2.** The accuracy of motor imagery classification averaged over all subjects for all electrode groups: а —  $T_f = 3$  s without filtration; б —  $T_f = 2,5$  s without filtration; в —  $T_f = 3$  s with low-pass filter with  $f_c = 15$  Hz; з —  $T_f = 3$  s with low-pass filter  $f_c = 4$  Hz [28]

оборудования для снятия ЭЭГ-сигналов, сохраняя при этом достаточно высокую точность распознавания.

## Заключение

Разработана математическая модель, основанная на аппарате ИНС для распознавания и классификации паттернов на ЭЭГ, соответствующих воображаемым движениям, которая продемонстрировала высокую эффективность для нетренированных субъектов (испытуемых). Достигнутая точность распознавания воображаемых движений составляла порядка 90–95 % для группы испытуемых, при этом сеть РБФ демонстрирует наилучшую точность классификации. Предварительная фильтрация входных данных ЭЭГ с использованием ФНЧ значительно повышает точность распознавания (в среднем на 10–20 %), при этом ФНЧ с частотой отсечки 4 Гц обнаруживает наилучшие результаты. Показано, что при использовании сигналов из определенных групп электродов, расположенных на фронтальной и височной (FP + F + T); теменной, затылочной и центральной (P + O + C); теменной и центральной

(P + C); височной и центральной (T + C) или лобной (F + FP) долях, состоящих из 6–12 каналов, точность классификации достигает значения, близкого к максимуму. Последний результат важен с практической точки зрения, поскольку он показывает возможность использования более компактных систем для регистрации сигналов ЭЭГ при сохранении требуемой точности распознавания. Этот аспект является немаловажным, поскольку как при реабилитации и социальной адаптации пациентов с расстройствами, связанными с нарушениями моторных и когнитивных функций, так и при использовании нейротехнологий с биологической обратной связью в процессе тренировки когнитивных навыков во время профессионального обучения удобство применения и возможность повседневного использования являются определяющими факторами успеха терапии и тренировки.

## Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники (Университет Иннополис).

## Литература

1. Kawase T., Sakurada T., Koike Y., Kansaku K. A hybrid BMI-based exoskeleton for paresis: EMG control for assisting arm movements. *J. Neural Eng.*, 2017, vol. 14, no. 1, 016015. doi:10.1088/1741-2552/aa525f
2. Spüler M. A high-speed brain-computer interface (BCI) using dry EEG electrodes. *PLoS ONE*, 2017, vol. 12, no. 2, e0172400. doi:10.1371/journal.pone.0172400
3. Stacey W. C., Brian L. Technology Insight: neuroengineering and epilepsydesigning devices for seizure control. *Nature Reviews*, 2008, vol. 4., pp. 190–201. doi:10.1038/nepneuro0750
4. Maksimenko V. A., Pavlov A., Runnova A. E., Nedaivozov V., Grubov V., Koronovskii A., Pchelintseva S. V., Pitsik E., Pisarchik A. N., Hramov A. E. Nonlinear analysis of brain activity, associated with motor action and motor imagery in untrained subjects. *Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 91, 2803. doi:10.1007/s11071-018-4047-y
5. Peternel L., Noda T., Petrič T., Ude A., Morimoto J., Babič J. Adaptive control of exoskeleton robots for periodic assistive behaviours based on EMG feedback minimisation. *PLoS ONE*, 2016, vol. 11, pp. 1–16. doi:10.1371/journal.pone.0148942
6. Alexandrov A. V., Frolov A. A., Massion J. Biomechanical analysis of movement strategies in human forward trunk bending. *J. Biol Cybern*, 2001, vol. 84, no. 6, pp. 425–434. doi:10.1007/PL00007986
7. Alexandrov A. V., Frolov A. A., Massion J. Biomechanical analysis of movement strategies in human forward trunk bending. II. Experimental study. *J. Biol Cybern*, 2001, vol. 84, pp. 435–443. doi:10.1007/PL00007987
8. Maksimenko V. A., Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Makarov V. V., Nedayvozov V. O., Grubov V. V., Pchelintseva S. V., Hramov A. E., Pisarchik A. N. Visual perception affected by motivation and alertness controlled by a noninvasive brain-computer interface. *PLoS ONE*, 2017, vol. 12, no. 12, p. e0188700. doi:10.1371/journal.pone.0188700
9. Birbaumer N., Ghanayim N., Hinterberger T., Iversen I., Kotchoubey B., Kübler A., Perelmouter J., Taub E., Flor H. A spelling device for the paralysed. *Nature*, 1999, vol. 398, pp. 297–298. doi:10.1038/18581
10. Frolov A., Húsek D., Bobrov P., Korshakov A., Chernikova L., Konovalov R., Mokienko O. Sources of EEG activity most relevant to performance of brain-computer interface based on motor imagery. *Neural Network World*, 2012, vol. 22, no. 1, p. 21.
11. Frolov A. A., Mokienko O., Lyukmanov R., Biryukova E., Kotov S., Turbina L., Nadareyshvily G., Bushkova Y. Post-stroke rehabilitation training with a motor-imagery-based brain-computer interface (BCI)-controlled hand exoskeleton: a randomized controlled multicenter trial. *Frontiers in Neuroscience*, 2017, vol. 11, p. 400.
12. Bowyer S. M., Mason K., Weiland B., Moran J. E., Barkley G. L., Tepley N. Localization of motor cortex by MEG using a tremorometer. *International Congress Series*, 2007, vol. 1300, pp. 321–324. doi:10.1016/j.ics.2007.02.001
13. Wang Y., Veluvolu K. C., Lee M. Time-frequency analysis of band-limited EEG with BMFLC and Kalman filter for BCI applications. *J Neuroeng Rehabil*, 2013, vol. 10, no. 1, p. 109. doi:10.1186/1743-0003-10-109
14. Hamed M., Salleh Sh-H., Noor A. M. Electroencephalographic motor imagery brain connectivity analysis for BCI: A Review. *Neural Comput*, 2016, vol. 28, no. 6, pp. 999–1041. doi:10.1162/NECO\_a\_00838
15. Guirao J. L. G., Luo A. C. J. New trends in nonlinear dynamics and chaoticity. *Nonlinear Dynamics*, 2016, vol. 84, no. 1, pp. 1–2. doi:10.1007/s11071-016-2656-x
16. Ma T., Li H., Yang H., Lv X., Li P., Liu T., Yao D., Xu P. The extraction of motion-onset VEP BCI features based on deep learning and compressed sensing. *Journal of Neuroscience Methods*, 2017, vol. 275, pp. 80–92. doi:10.1016/j.jneumeth.2016.11.002
17. Quitadamo L. R., Cavrini F., Sberini L., Riillo F., Bianchi L., Seri S., Saggio G. Support vector machines to detect physiological patterns for EEG and EMG-based human-computer interaction: A Review. *J Neural Eng*, 2017, vol. 14, no. 1, 011001. doi:10.1088/1741-2552/14/1/011001
18. Балтер Б. М., Попова И. В. Нейронные сети с обратной связью крутизны и порога с текущим паттерном: распознавание коррелированных и небинарных образов. *Матем. моделирование*, 1992, т. 4, № 10, с. 101–110. doi:10.1109/RNNS.1992.268641
19. Дударов С. П. Модели самоорганизующихся искусственных нейронных сетей для идентификации стационарных промышленных источников загрязнения воздуха. *Матем. моделирование*, 2017, т. 29, № 1, с. 33–44. doi: 10.1134/S2070048217040032
20. Leung F. H. F., Lam H. K., Ling S. H., Tam P. K. S. Tuning of the structure and parameters of a neural network using an improved genetic algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2003, vol. 14, no. 1, pp. 79–88. doi:10.1109/TNN.2002.804317
21. Blankertz B., Dornhege G., Krauledat M., Muller K. R., Curio G. The non-invasive Berlin brain-computer interface: fast acquisition of effective performance in untrained subjects. *NeuroImage*, 2007, vol. 37, no. 2, pp. 539–550. doi:10.1016/j.neuroimage.2007.01.051
22. Grabherr L., Jola C., Berra G., Theiler R., Mast F. W. Motor imagery training improves precision of an upper limb movement in patients with hemiparesis. *NeuroRehabilitation*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 157–166.
23. Shakeel A., Navid M. S., Anwar M. N., Mazhar S., Jochumsen M., Niazi I. K. A review of techniques for detection of movement intention using movement-related cortical potentials. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2015, vol. 2015, Article ID 346217, 13 p.

24. Mokienko O., Chervyakov A., Kulikova S., Bobrov P., Chernikova L., Frolov A., Piradov M. Increased motor cortex excitability during motor imagery in brain-computer interface trained subjects. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2013, vol. 7, p. 168.
25. Ferrante A., Gavriel C., Faisal A. Data-efficient hand motor imagery decoding in EEG BCI by using Morlet wavelets & common spatial pattern algorithms. *2015 7th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, 2015, pp. 948–951. doi:10.1109/NER.2015.7146782
26. Babiloni C., Del Percio C., Lopez S., Di Gennaro G., Quarato P. P., Pavone L., Morace R., Soricelli A., Noce G., Esposito V., Galliese V. Frontal functional connectivity of electrocorticographic delta and theta rhythms during action execution versus action observation in humans. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 2017, vol. 11, p. 20.
27. Hramov A., Runnova A., Kurkin S., Musatov V. Gender differences in operators movement recognition on signals of electroencephalogram. *In 2018 2nd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR)*, 2018, p. 57.
28. Kurkin S., Musatov V. Yu., Runnova A. E., Grubov V. V., Efremova T. Yu., Zhuravlev M. O. Recognition of neural brain activity patterns correlated with complex motor activity. *Proc. SPIE 10717, Saratov Fall Meeting 2017: Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV*, 2018, vol. 107171J. doi:10.1117/12.2315161
29. Kotov S. V., Turbina L. G., Biryukova E. V., Frolov A. A., Kondur A. A., Zaitseva E. V., Bobrov P. D. Rehabilitation potential of post-stroke patients training for kinesthetic movement imagination: motor and cognitive aspects. *Human Physiology*, 2017, vol. 43, no. 5, pp. 532–541.
30. Frolov A. A., Husek D., Silchenko A. V., Tintera J., Rydlo J. The changes in the hemodynamic activity of the brain during motor imagery training with the use of brain-computer interface. *Human Physiology*, 2016, vol. 42, no. 1, pp. 1–12.

UDC 004.032.2

doi:10.31799/1684-8853-2019-6-77-84

### Classifying electrical activity of the brain during imaginary movements of untrained subjects using artificial neural networks

S. A. Kurkin<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, orcid.org/0000-0002-3438-5717, kurkinsa@gmail.comE. N. Pitsik<sup>a</sup>, Junior Researcher, orcid.org/0000-0003-1850-2394A. E. Hramov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, orcid.org/0000-0003-2787-2530<sup>a</sup>Neuroscience and Cognitive Technology Lab, Center for Technologies in Robotics and Mechatronics Components, Innopolis University, Universitetskaya 1, Innopolis, 420500, Russian Federation

**Introduction:** Developing new classification methods for human brain electrical activity patterns corresponding to actual movements or motor imagery is an essential interdisciplinary problem in brain-computer interface research. One of the most promising approaches is the development of methods based on artificial neural networks. **Purpose:** The development of ANN-based methods for classifying electroencephalographic patterns associated with motor imagery in untrained subjects. **Methods:** Classifiers based on linear neural networks, multi-layer perceptrons, radial basis function networks and support vector machines. **Results:** The authors selected the optimal type, topology, learning algorithms and parameters of an artificial neural network in order to provide the most accurate and fast classification of lower limb motor imagery EEG signals. It has been studied how the number of the analyzed channels of a multichannel EEG and their choice affect the quality of motor imagery patterns classification. Optimal configurations were obtained for the electrode arrangements. The influence of EEG pre-processing on the accuracy of motor imagery recognition was analyzed. A computational experiment showed the accuracy of 90–95% in untrained subjects. Radial basis function network demonstrated the best performance. Besides, the dataset dimensionality has been significantly reduced down to 6–12 channels without any classification accuracy loss. **Practical relevance:** The obtained results can be useful for the developers of motor imagery EEG classification algorithms used in brain-computer interfaces.

**Keywords** — neural networks, brain-computer interface, electroencephalogram, EEG signal analysis, brain activity, multi-layer perceptron, radial basis function, support vector machine.

**For citation:** Kurkin S. A., Pitsik E. N., Hramov A. E. Classifying electrical activity of the brain during imaginary movements of untrained subjects using artificial neural networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 77–84 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-77-84

### References

1. Kawase T., Sakurada T., Koike Y., Kansaku K. A hybrid BMI-based exoskeleton for paresis: EMG control for assisting arm movements. *J. Neural. Eng.*, 2017, vol. 14, no. 1, 016015. doi:10.1088/1741-2552/aa525f
2. Spüler M. A high-speed brain-computer interface (BCI) using dry EEG electrodes. *PLoS ONE*, 2017, vol. 12, no. 2, e0172400. doi:10.1371/journal.pone.0172400
3. Stacey W. C., Brian L. Technology Insight: neuroengineering and epilepsydesigning devices for seizure control. *Nature Reviews*, 2008, vol. 4., pp. 190–201. doi:10.1038/ncpneuro0750
4. Maksimenko V. A., Pavlov A., Runnova A. E., Nedaivozov V., Grubov V., Koronovskii A., Pchelintseva S. V., Pitsik E., Pisarchik A. N., Hramov A. E. Nonlinear analysis of brain activity, associated with motor action and motor imaginary in

- untrained subjects. *Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 91, 2803. doi:10.1007/s11071-018-4047-y
5. Peternel L., Noda T., Petrić T., Ude A., Morimoto J., Babić J. Adaptive control of exoskeleton robots for periodic assistive behaviours based on EMG feedback minimisation. *PLoS ONE*, 2016, vol. 11, pp. 1–16. doi:10.1371/journal.pone.0148942
  6. Alexandrov A. V., Frolov A. A., Massion J. Biomechanical analysis of movement strategies in human forward trunk bending. *J. Biol Cybern.*, 2001, vol. 84, no. 6, pp. 425–434. doi:10.1007/PL00007986
  7. Alexandrov A. V., Frolov A. A., Massion J. Biomechanical analysis of movement strategies in human forward trunk bending. II. Experimental study. *J. Biol Cybern.*, 2001, vol. 84, pp. 435–443. doi:10.1007/PL00007987
  8. Maksimenko V. A., Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Makarov V. V., Nedayvozov V. O., Grubov V. V., Pchelintseva S. V., Hramov A. E., Pisarchik A. N. Visual perception affected by motivation and alertness controlled by a noninvasive brain-computer interface. *PLoS ONE*, 2017, vol. 12, no. 12, p. e0188700. doi:10.1371/journal.pone.0188700
  9. Birbaumer N., Ghanayim N., Hinterberger T., Iversen I., Kotchoubey B., Kübler A., Perelmouter J., Taub E., Flor H. A spelling device for the paralysed. *Nature*, 1999, vol. 398, pp. 297–298. doi:10.1038/18581
  10. Frolov A., Húsek D., Bobrov P., Korshakov A., Chernikova L., Kononov R., Mokienko O. Sources of EEG activity most relevant to performance of brain-computer interface based on motor imagery. *Neural Network World*, 2012, vol. 22, no. 1, p. 21.
  11. Frolov A. A., Mokienko O., Lyukmanov R., Biryukova E., Kotov S., Turbina L., Nadareyshivily G., Bushkova Y. Post-stroke rehabilitation training with a motor-imagery-based brain-computer interface (BCI)-controlled hand exoskeleton: a randomized controlled multicenter trial. *Frontiers in Neuroscience*, 2017, vol. 11, p. 400.
  12. Bowyer S. M., Mason K., Weiland B., Moran J. E., Barkley G. L., Tepley N. Localization of motor cortex by MEG using a tremorometer. *International Congress Series*, 2007, vol. 1300, pp. 321–324. doi:10.1016/j.ics.2007.02.001
  13. Wang Y., Veluvolu K. C., Lee M. Time-frequency analysis of band-limited EEG with BMFLC and Kalman filter for BCI applications. *J Neuroeng Rehabil*, 2013, vol. 10, no. 1, p. 109. doi:10.1186/1743-0003-10-109
  14. Hamed M., Salleh Sh-H., Noor A. M. Electroencephalographic motor imagery brain connectivity analysis for BCI: A Review. *Neural Comput*, 2016, vol. 28, no. 6, pp. 999–1041. doi:10.1162/NECO\_a\_00838
  15. Guirao J. L. G., Luo A. C. J. New trends in nonlinear dynamics and chaoticity. *Nonlinear Dynamics*, 2016, vol. 84, no. 1, pp. 1–2. doi:10.1007/s11071-016-2656-x
  16. Ma T., Li H., Yang H., Lv X., Li P., Liu T., Yao D., Xu P. The extraction of motion-onset VEP BCI features based on deep learning and compressed sensing. *Journal of Neuroscience Methods*, 2017, vol. 275, pp. 80–92. doi:10.1016/j.jneumeth.2016.11.002
  17. Quitadamo L. R., Cavrini F., Sbernini L., Riillo F., Bianchi L., Seri S., Saggio G. Support vector machines to detect physiological patterns for EEG and EMG-based human-computer interaction: A Review. *J Neural Eng*, 2017, vol. 14, no. 1, 011001. doi:10.1088/1741-2552/14/1/011001
  18. Balter B. M., Popova I. V. Neural nets for correlated and non-binary patterns: feedback from current pattern to neuron response and threshold. *Matematicheskoe modelirovanie*, 1992, vol. 4, no. 10, pp. 101–110 (In Russian). doi:10.1109/RNNS.1992.268641
  19. Dudarov S. P. Models of self-organizing artificial neural networks for determination of stationary permanent industrial sources of air pollution. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2017, vol. 29, no. 1, p. 33–44 (In Russian). doi:10.1134/S2070048217040032
  20. Leung F. H. F., Lam H. K., Ling S. H., Tam P. K. S. Tuning of the structure and parameters of a neural network using an improved genetic algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2003, vol. 14, no. 1, pp. 79–88. doi:10.1109/TNN.2002.804317
  21. Blankertz B., Dornhege G., Krauledat M., Müller K. R., Curio G. The non-invasive Berlin brain-computer interface: fast acquisition of effective performance in untrained subjects. *NeuroImage*, 2007, vol. 37, no. 2, pp. 539–550. doi:10.1016/j.neuroimage.2007.01.051
  22. Grabherr L., Jola C., Berra G., Theiler R., Mast F. W. Motor imagery training improves precision of an upper limb movement in patients with hemiparesis. *NeuroRehabilitation*, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 157–166.
  23. Shakeel A., Navid M. S., Anwar M. N., Mazhar S., Jochumsen M., Niazi I. K. A review of techniques for detection of movement intention using movement-related cortical potentials. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2015, vol. 2015, Article ID 346217, 13 p.
  24. Mokienko O., Chervyakov A., Kulikova S., Bobrov P., Chernikova L., Frolov A., Piradov M. Increased motor cortex excitability during motor imagery in brain-computer interface trained subjects. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2013, vol. 7, p. 168.
  25. Ferrante A., Gavriel C., Faisal A. Data-efficient hand motor imagery decoding in EEG BCI by using Morlet wavelets & common spatial pattern algorithms. *2015 7th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*, 2015, pp. 948–951. doi:10.1109/NER.2015.7146782
  26. Babiloni C., Del Percio C., Lopez S., Di Gennaro G., Quarato P. P., Pavone L., Morace R., Soricelli A., Noce G., Esposito V., Gallesse V. Frontal functional connectivity of electrocorticographic delta and theta rhythms during action execution versus action observation in humans. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 2017, vol. 11, p. 20.
  27. Hramov A., Runnova A., Kurkin S., Musatov V. Gender differences in operators movement recognition on signals of electroencephalogram. In *2018 2nd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics (DCNAIR)*, 2018, p. 57.
  28. Kurkin S., Musatov V. Yu., Runnova A. E., Grubov V. V., Efremova T. Yu., Zhuravlev M. O. Recognition of neural brain activity patterns correlated with complex motor activity. *Proc. SPIE 10717, Saratov Fall Meeting 2017: Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV*, 2018, vol. 107171J. doi:10.1117/12.2315161
  29. Kotov S. V., Turbina L. G., Biryukova E. V., Frolov A. A., Kondur A. A., Zaitseva E. V., Bobrov P. D. Rehabilitation potential of post-stroke patients training for kinesthetic movement imagination: motor and cognitive aspects. *Human Physiology*, 2017, vol. 43, no. 5, pp. 532–541.
  30. Frolov A. A., Husek D., Silchenko A. V., Tintera J., Rydlo J. The changes in the hemodynamic activity of the brain during motor imagery training with the use of brain-computer interface. *Human Physiology*, 2016, vol. 42, no. 1, pp. 1–12.

## АВРАМЕНКО Владимир Семенович



Профессор кафедры автоматизированных систем специального назначения Военной академии связи, Санкт-Петербург.

В 1991 году окончил Киевское высшее военное инженерное училище по специальности «Автоматизированные системы управления», в 1997 году — Военную академию связи.

В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 150 научных публикаций.

Область научных интересов — автоматизированные системы управления, информационная безопасность автоматизированных систем, в том числе обнаружение компьютерных атак, анализ компьютерных инцидентов, контроль защищенности информации.

Эл. адрес: vsavr@yandex.ru

## БРОНФМАН Ирина



Ассистент инженерного колледжа Шамун, Ашдод, помощник преподавателя кафедр систем связи Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль.

В 2011 году окончила бакалавриат инженерного колледжа Шамун, Ашдод, 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 восьми 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

## ВОРОНОВ Михаил Владимирович



Профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Московского государственного психолого-педагогического университета, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1970 году окончил Ленинградский государственный университет по специальности «Физика».

В 1988 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 400 научных публикаций, в том числе 33 книг.

Область научных интересов — теория систем и системный анализ, управление организационными системами.

Эл. адрес: mivoronov@yandex.ru

## БЛАУНШТЕЙН Натан Шаевич



Профессор-эмеритус кафедры систем связи инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль.

В 1972 году окончил Томский государственный университет по специальности «Радиофизика и электроника, включая квантовую».

В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором около 200 научных публикаций, в том числе 12 монографий, пяти патентов и трех изобретений.

Область научных интересов — радиофизика, системы проводной и беспроводной связи, радары, оптика и лидары.

Эл. адрес:

nathan.blaunstein@hotmail.com

## ДЖУВИЛЕР Ирит



Заведующая кафедрой электротехники и электроники, старший преподаватель Технического колледжа им. Сами Шамуна, Ашдод, Израиль.

В 1995 году окончила магистратуру Негевского университета им. Бен-Гуриона по специальности «Электротехника и вычислительная техника».

В 2004 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора наук (PhD) в области электротехники и физической электроники в Тель-Авивском университете.

Является автором 28 научных публикаций.

Область научных интересов — нелинейная оптика и нанофотоника.

Эл. адрес: iritj@sce.ac.il

## ГАЛАНДЗОВСКИЙ Алексей Викторович



Старший преподаватель кафедр систем и средств радиоэлектронной борьбы Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 2005 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Средства радиоэлектронной борьбы».

В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 23 научных публикаций.

Область научных интересов — радиоэлектронное подавление радиоэлектронных средств.

Эл. адрес: avg\_1982@mail.ru

**КОМАРОВ**  
Владимир  
Александрович



Начальник группы комплексного моделирования космических систем АО «Информационные спутниковые системы им. академика М. Ф. Решетнёва», доцент Сибирского федерального университета, Железногорск. В 2005 году окончил Красноярский государственный технический университет по специальности «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования». В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 90 научных публикаций. Область научных интересов — компьютерные измерительные технологии, системы дистанционного управления объектами и др. Эл. адрес: VKomarov@iss-reshetnev.ru

**ЛЕВИН**  
Дмитрий  
Викторович



Преподаватель кафедры систем и средств радиоэлектронной борьбы Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 2006 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления». В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 25 научных публикаций. Область научных интересов — радиоэлектронная защита радиоэлектронных систем, техническая защита информации. Эл. адрес: dm.181@yandex.ru

**МАТВЕЕВ**  
Николай  
Валентинович



Старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2015 году окончил магистратуру Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Является автором пяти научных публикаций. Область научных интересов — математическая оптимизация, беспроводные сети, LTE, теория вероятностей, имитационное моделирование. Эл. адрес: n.matveev@vu.spb.ru

**КУРКИН**  
Семен  
Андреевич



Профессор лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра технологий компонентов робототехники и мехатроники Университета Иннополис. В 2003 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика и электроника». В 2017 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором более 150 научных публикаций и более 20 патентов на изобретения и свидетельств на программное обеспечение. Область научных интересов — нейронаука, применение искусственных нейронных сетей, исследование когнитивных процессов, Data Science, нелинейная динамика, электроника и др. Эл. адрес: kurkinsa@gmail.com

**МАЛИКОВ**  
Альберт  
Валерьянович



Адъюнкт Военной академии связи, Санкт-Петербург. В 2008 году окончил с отличием Военную академию связи по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Является автором 20 научных публикаций. Область научных интересов — автоматизированные информационные системы, информационная безопасность. Эл. адрес: mkv.vas@yandex.ru

**МИРОНОВСКИЙ**  
Леонид  
Алексеевич



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1962 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Инженер-электрофизик». В 1981 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 180 научных публикаций и более 50 патентов на изобретения. Область научных интересов — техническая диагностика, системы автоматического управления, алгебраические инварианты, аналитическая избыточность, моделирование систем управления, инварианты систем управления. Эл. адрес: mir@aanet.ru



**ПАРШУТКИН**  
**Андрей**  
**Викторович**



Профессор кафедры систем и средств радиоэлектронной борьбы Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург. В 1980 году окончил Военный инженерно-космический институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиотехнические системы и средства контроля». В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 145 научных публикаций и четырех патентов на изобретения. Область научных интересов — радиоэлектронная защита радиоэлектронных систем, техническая защита информации. Эл. адрес: andydc2010@mail.ru

**ПИМЕНОВ**  
**Илья**  
**Викторович**



Доцент кафедры вычислительных систем и информатики государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург. В 2011 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна по специальности «Прикладная информатика». В 2017 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 40 научных публикаций и двух свидетельств об интеллектуальной собственности. Область научных интересов — интеллектуальные системы, методы извлечения знаний, мультимедиа-технологии. Эл. адрес: i-pim@mail.ru

**САЕНКО**  
**Игорь**  
**Борисович**



Профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 1981 году окончил Белорусский государственный университет по специальности «Радиофизика и электроника», в 1989 году — Военную академию связи по специальности «Инженерная автоматизированных систем управления». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 350 научных публикаций и семи патентов на изобретения. Область научных интересов — автоматизированные информационные системы, информационная безопасность и др. Эл. адрес: ibsaen@comsec.spb.ru

**ПИМЕНОВ**  
**Виктор**  
**Игоревич**



Профессор, директор специализированного центра новых информационных технологий, заведующий кафедрой информационных технологий Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. В 1983 году окончил Ленинградский механический институт по специальности «Системы автоматического управления». В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 170 научных публикаций и 11 свидетельств об интеллектуальной собственности. Область научных интересов — распознавание образов, интеллектуальный анализ данных, 3D-моделирование. Эл. адрес: v\_pim@mail.ru

**ПИЦИК**  
**Елена**  
**Николаевна**



Младший научный сотрудник лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Университета Иннополис. В 2017 году окончила Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Программная инженерия». Область научных интересов — машинное обучение, искусственные нейронные сети, интерфейсы мозг-компьютер, анализ ЭЭГ, постинсультная реабилитация, нелинейная динамика. Эл. адрес: e.pitsik@innopolis.ru

**САРАФАНОВ**  
**Альберт**  
**Викторович**



Директор по развитию бизнеса департамента управления предприятиями ООО Вите Консалтинг (ГК «Ай-теко»), Москва. В 1986 году окончил Красноярский политехнический институт по специальности «Конструирование и производство радиоэлектронной аппаратуры». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 260 научных публикаций. Область научных интересов — методы комплексного математического моделирования физических процессов, интегрированные компьютерные технологии проектирования бортовых радиоэлектронных средств, автоматизация физических экспериментов, компьютерные измерительные технологии и др. Эл. адрес: sarafanov@i-teco.ru

**СОЛОВЬЕВА**  
**Татьяна**  
**Николаевна**



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2010 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника».

В 2013 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 24 научных публикаций.

Область научных интересов — техническая диагностика, теория динамических систем, теория автоматического управления, компьютерное моделирование.

Эл. адрес: al2tn@yandex.ru

**ТУМКОВСКИЙ**  
**Сергей**  
**Ростиславович**



Профессор департамента компьютерной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.

В 1981 году окончил Московский институт электронного машиностроения по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 140 научных и методических публикаций, 11 свидетельств о регистрации ПО.

Область научных интересов — информационные системы и технологии в различных сферах деятельности.

Эл. адрес: STumkovskiy@hse.ru

**ТЮРЛИКОВ**  
**Андрей**  
**Михайлович**



Профессор, директор Института информационных систем и защиты информации, заведующий кафедрой инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского университета аэрокосмического приборостроения.

В 1980 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Информационные системы управления».

В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 80 научных публикаций.

Область научных интересов — многообъектные системы связи, системы дистанционного обучения, протоколы передачи данных в реальном масштабе времени, алгоритмы сжатия видеoinформации.

Эл. адрес: turlikov@vu.spb.ru

**ХРАМОВ**  
**Александр**  
**Евгеньевич**



Профессор, заведующий лабораторией нейронауки и когнитивных технологий Центра технологического компонентов робототехники и мехатроники Университета Иннополис.

В 1996 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского.

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 200 научных публикаций.

Область научных интересов — нейронаука, теория сложных сетей, вейвлет-анализ и его приложения в нелинейной динамике и нейронауке, нейронинтерфейсы.

Эл. адрес: hramovae@gmail.com

**ШИНТЯКОВ**  
**Дмитрий**  
**Васильевич**



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника».

В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 20 научных публикаций.

Область научных интересов — клеточные автоматы, методы оптимизации, теория управления.

Эл. адрес: shintyakov@gmail.com

# СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ» ЗА 2019 г. [№ 1–6]

	№	Стр.
<b>Abuzin L. V., Balonin N. A., Đoković D. Ž., Kotsireas I. S.</b> Hadamard matrices from Goethals — Seidel difference families with a repeated block	5	2
<b>Anisimov V. G., Anisimov E. G., Saurenko T. N., Zotova E. A.</b> Models of forecasting destructive influence risks for information processes in management systems	5	18
<b>Favorskaya M. N., Jain L. C.</b> Saliency detection in deep learning era: trends of development	3	10
<b>Juwiler I., Bronfman I., Blaunstein N.</b> Analysis of total signal decay and capacity of information data in wireless atmospheric communication links. Part 1	6	43
<b>Juwiler I., Bronfman I., Blaunstein N. Sh.</b> Optical data signals in fiber optic communication links with fading	3	94
<b>Lyandres V.</b> Mobile network synthesis strategy	1	98
<b>Sergeev A. M., Blaunstein N. Sh.</b> Evolution of multiple-access networks — cellular and non-cellular — in historical perspective. Part 4	1	65
<b>Sorokin A. V., Shepeta A. P., Nenashev V. A., Wattimena G. M.</b> Comparative characteristics of anti-collision processing of radio signal from identification tags on surface acoustic waves	1	48
<b>Tsilika K. D.</b> An exact solution method for Fredholm integro-differential equations	4	2
<b>Vassiliev N. N., Parasidis I. N., Providas E.</b> Exact solution method for Fredholm integro-differential equations with multipoint and integral boundary conditions. Part 2. Decomposition-extension method for squared operators	2	2
<b>Аксенов Ю. В., Добренко Н. В., Ватъян А. С., Капустин Р. О., Осипов С. В., Маврин П. Ю., Гусарова Н. Ф., Шалыто А. А.</b> Применение автоматного подхода для персонализированной поддержки клинических процессов в медицине	5	64
<b>Астахова Т. Н., Верзун Н. А., Касаткин В. В., Колбанев М. О., Шамин А. А.</b> Исследование моделей связности сенсорных сетей	5	38
<b>Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Себерри Дж., Сеницына О. И.</b> Окружности на решетках и матрицы Адамара	3	2
<b>Балонин Н. А., Сергеев М. Б.</b> Как гипотезе Адамара помочь стать теоремой. Часть 2	1	2
<b>Бегишев В. О., Сопин Э. С., Молчанов Д. А., Самуйлов А. К., Гайдамака Ю. В., Самуйлов К. Е.</b> Оценка эффективности механизма резервирования полосы пропускания для технологии mMWave в сетях связи пятого поколения	5	51
<b>Белим С. В., Ракицкий Ю. С.</b> Использование семейств ортогональных функций для кодирования данных в схеме хаотической маскировки	2	76
<b>Бритов Г. С., Мироновский Л. А.</b> Достоверность и чувствительность терминального диагностирования управляемых динамических систем	4	29
<b>Васильев Н. Н., Дужин В. С., Кузьмин А. Д.</b> Исследование свойств классов эквивалентности перестановок с помощью обратного преобразования Робинсона — Шенстеда — Кнута	1	11
<b>Горбунова А. В., Медведева Е. Г., Гайдамака Ю. В., Шоргин В. С., Самуйлов К. Е.</b> Эффективные стратегии обслуживания пользователей в многопользовательской системе MIMO	4	69
<b>Гордеев А. В., Андреев А. В.</b> Структура каталога как фильтр поиска записей службы каталогов OpenLDAP	2	52
<b>Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л.</b> Безопасное управление SEMS при групповом взаимодействии	1	23
<b>Городецкий А. Е., Тарасова И. Л., Курбанов В. Г.</b> Управляемый микроробот для перемещения в сосудах человека	4	38
<b>Грузликов А. М., Колесов Н. В., Костыгов Д. В., Толмачева М. В.</b> Отказоустойчивая и энергоэффективная система обработки информации и управления на кристалле	4	9
<b>Дворников С. В., Дворников С. С., Пшеничников А. В.</b> Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты	4	62

	№	Стр.
<b>Иванько Д. В., Рюмин Д. А., Карпов А. А., Железны М.</b> Исследование влияния высокоскоростных видеоданных на точность распознавания аудиовизуальной речи	2	26
<b>Ключарёв А. А., Фоменкова А. А.</b> Математическая модель анаэробного биореактора с закрепленной биомассой как объекта управления	2	44
<b>Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р.</b> Многопользовательские распределенные измерительно-управляющие системы как элемент современной цифровой образовательной среды	2	83
<b>Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р.</b> Сравнение эффективности методов повышения пропускной способности экспериментального оборудования с удаленным доступом	6	68
<b>Коновалов П. А., Корнилова А. В., Королев Д. М., Ренева Г. В., Фрадков А. Л., Широколов И. Ю., Ярош Д. С.</b> Команда роботов-футболистов для соревнований RoboCup в лиге SSL: система и алгоритмы	2	19
<b>Кулешов С. В., Зайцева А. А., Шальнев И. О.</b> Подход к реализации распределенной системы виртуальных машин для самоорганизующихся сетей	5	30
<b>Куркин С. А., Пицик Е. Н., Храмов А. Е.</b> Использование искусственных нейронных сетей для классификации электрической активности головного мозга в процессе воображения движений у нетренированных испытуемых	6	77
<b>Маликов А. В., Авраменко В. С., Саенко И. Б.</b> Модель и метод диагностирования компьютерных инцидентов в информационно-коммуникационных системах, основанные на глубоком машинном обучении	6	32
<b>Мальцев Г. Н., Евтеев А. В.</b> Исследование помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации с шумоподобными фазоманипулированными сигналами при наличии ошибок синхронизации по задержке	3	105
<b>Марковников Н. М., Кипяткова И. С.</b> Исследование методов построения моделей кодер-декодер для распознавания русской речи	4	45
<b>Матвеев Н. В., Тюрликов А. М.</b> Обзор методов случайного множественного доступа к общему каналу для сценариев массовой межмашинной связи	6	54
Международная конференция по компьютерной математике — SAM-2019	2	95
<b>Мионовский Л. А., Соловьева Т. Н., Шинтяков Д. В.</b> Оптимизация терминального контроля управляемых динамических систем	6	12
<b>Монаков А. А.</b> Статистические характеристики среднего уровня полезности элитной группы в процессе отбора	1	57
<b>Морозов Р. А., Трифонов П. В.</b> Компактная спецификация полярных кодов	1	40
<b>Новикова Е. С., Котенко И. В.</b> Открытые задачи визуального анализа в системах управления информационной безопасностью	2	57
<b>Осипов В. Ю., Никифоров В. В.</b> Возможности рекуррентных нейронных сетей с управляемыми элементами по восстановлению потоков кадров	5	10
<b>Паршуткин А. В., Левин Д. В., Галандзовский А. В.</b> Имитационная модель обработки радиолокационной информации в сети радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех	6	22
<b>Пименов В. И., Воронов М. В., Пименов И. В.</b> Когнитивная визуализация классифицирующих правил, извлеченных из данных, на основе модели бинарной решающей матрицы	6	2
<b>Пономаренко В. И., Навроцкая Е. В., Кульминский Д. Д., Прохоров М. Д.</b> Оценка конфиденциальности системы передачи информации на основе хаотического генератора с запаздыванием и переключаемым временем задержки	4	54
<b>Рождественская К. Н.</b> Временной анализ системы управления в сети обработки данных	1	32
<b>Рукавицын А. Н.</b> Кластеризация данных в распределенных системах мониторинга	2	35
<b>Савищенко Н. В., Лебеда Е. В.</b> Вероятности ошибки когерентного приема многопозиционных сигналов в канале с общими гамма- или К-замираниями и белым шумом	1	76
<b>Сергеев М. Б., Ненашев В. А., Сергеев А. М.</b> Вложенные кодовые конструкции Баркера — Мерсенна — Рагхаварао	3	71

	№	Стр.
<b>Ситникова Е. Ю., Смирнов К. С., Грубов В. В., Храмов А. Е.</b> Принципы диагностики незрелой эпилептической (проэпилептической) активности на ЭЭГ у крыс с генетической предрасположенностью к абсанс-эпилепсии	1	89
<b>Смирнов А. В., Левашова Т. В.</b> Модели поддержки принятия решений в социкиберфизических системах	3	55
<b>Советов Б. Я., Татарникова Т. М., Пойманова Е. Д.</b> Организация многоуровневого хранения данных	2	68
<b>Татарникова Т. М.</b> Ограничения утечки информации посредством неочевидных функций смартфона Android 5	5	24
<b>Томчина О. П., Поляхов Д. Н., Токарева О. И., Фрадков А. Л.</b> Адаптивное управление нестационарными нелинейными объектами на основе алгоритмов скоростного градиента	3	37
<b>Хименко В. И.</b> Вероятностный анализ двумерных векторных случайных процессов на фазовой плоскости	2	10
<b>Хименко В. И.</b> Случайные процессы со случайными переходами между устойчивыми состояниями	3	82
<b>Хорев В. С., Максименко В. А., Пицик Е. Н., Руннова А. Е., Куркин С. А., Храмов А. Е.</b> Анализ двигательной активности с использованием сигналов электромиограмм	3	114
<b>Шилов Н. Г.</b> Персонализация предоставления информации на электронных табло: основные требования и методология	4	19
<b>Шокин Ю. И., Юрченко А. В.</b> О моделях организации хранения и использования научных данных: основные принципы, процессы и механизмы	3	45
Сведения об авторах	1	102
Сведения об авторах	2	96
Сведения об авторах	3	121
Сведения об авторах	4	82
Сведения об авторах	5	76
Сведения об авторах	6	85

## Уважаемые авторы!

**При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.**

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

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

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должностное), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, ORCID и электронный адрес одного из авторов. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисовочные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

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.

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

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

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

**Иллюстрации** предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio (\*.vsd, \*.vsdx); Coreldraw (\*.cdr); Excel (\*.xls); Word (\*.docx); Adobe Illustrator (\*.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 и названий таблиц на русском и английском языках 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>): Литература и References.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Правила для авторов».

### 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: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)

Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)