

ISSN 2500—0381
Электронная версия

ISSN 0021—3454
Печатная версия

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

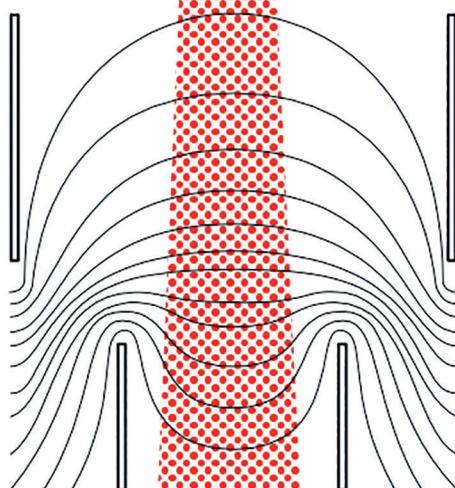
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



№ 9

Т. 67
2024



Journal of Instrument Engineering

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

*д-р техн. наук, проф. А. А. БОБЦОВ,
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*А. П. АЛЕШКИН, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
А. В. БЕЛИКОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. БЕССМЕРТНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. А. БОГАТЫРЕВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Д. В. ЕФАНОВ, д-р техн. наук, проф., СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
В. В. ЕФИМОВ, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
А. КЛИМЧИК, PhD, доцент, Университет Иннополис, Иннополис, Россия
С. А. КОЛЮБИН, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
И. А. КОНЯХИН, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. В. КРИШТОП, д-р физ.-мат. наук, проф., ПНИПУ, Пермь, Россия
Л. С. ЛИСИЦЫНА, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Ю. А. ЛИТВИНЕНКО, канд. техн. наук, Концерн «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, Россия
В. Д. ЛУКЬЯНОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., ОАО «Авангард», Санкт-Петербург, Россия
А. В. ЛЯМИН, д-р техн. наук, доцент, СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия
А. В. МАЛОЛЕТОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет Иннополис, Иннополис, Россия
Ю. Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук, ООО «ЦРТ-инновации», Санкт-Петербург, Россия
В. М. МЕДУНЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., ООО «Феррум», Санкт-Петербург, Россия
А. Н. МИРОНОВ, д-р техн. наук, проф., ВКА им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
В. М. МУСАЛИМОВ, д-р техн. наук, проф., ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия
А. А. ОЖИГАНОВ, д-р техн. наук, проф., АО «НИТИ «Авангард», Санкт-Петербург, Россия
А. А. ПЫРКИН (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
В. С. СИЗИКОВ, д-р техн. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Б. В. СОКОЛОВ, д-р техн. наук, проф., СПбФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия
С. В. СОЛК, д-р техн. наук, НИИ ОЭП, Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия
В. Ю. ТЕРТЫЧНЫЙ, д-р физ.-мат. наук, проф., Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Д. В. ТИТОВ, д-р техн. наук, доцент, ЮЗГУ, Курск, Россия
А. В. ФЕДОРОВ, д-р техн. наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Н. Б. ФИЛИМОНОВ (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
И. Б. ФУРТАТ, д-р техн. наук, доцент, ИПМаш РАН, Санкт-Петербург, Россия
В. П. ХОДУНКОВ, канд. техн. наук, ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия*

Ответственный секретарь М. В. Лебецкая

Редактор И. М. Игошина

Набор, верстка: Е. С. Егорова

Перевод: Ю. И. Копилевич

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А, Университет ИТМО
Телефон: (812) 480-02-73, E-mail: pribor@itmo.ru
<http://pribor.ifmo.ru/>

Подписано в печать 30.09.2024 г.

*Отпечатано в учреждении „Университетские телекоммуникации“
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А
Телефон: (812) 915-14-54, E-mail: Prudentov@tibir.ru*

Редколлегия просит авторов и рецензентов отнестись с пониманием к ужесточению требований к рукописям и изменению формы подачи материала в журнале

Аннотация объемом 150—250 слов должна отражать содержание статьи: предмет исследования, цель работы, метод проведения работы, краткое описание экспериментальных или теоретических исследований, полученные результаты и рекомендации по их применению.

Ключевые слова, служащие идентификаторами при предметном поиске, должны однозначно отражать содержание статьи. Основное ключевое слово/словосочетание указывается первым, общее количество ключевых слов — не менее 5.

Список литературы: для обзорной статьи рекомендуется приводить не менее 50 источников, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8.

Требования к оформлению рукописи размещены на сайте журнала <http://pribor.itmo.ru/>



Адрес: 197101, Санкт-Петербург,
Кронверкский пр., 49, лит. А,
Университет ИТМО
Телефон: (812) 480-02-73
[http:// pribor.ifmo.ru/](http://pribor.ifmo.ru/)
E-mail: pribor@itmo.ru

Журнал публикует научные обзоры, полнотекстовые статьи и краткие сообщения, отражающие результаты практических и теоретических исследований в области приборостроения.

Журнал содержит следующие разделы:

- информатика и информационные процессы;
- информационно-измерительные и управляющие системы;
- системный анализ, управление и обработка информации;
- приборы навигации;
- вычислительные системы и их элементы;
- оптические и оптико-электронные приборы и комплексы;
- методы и приборы для анализа и контроля материалов, изделий, веществ и природной среды;
- приборы, системы и изделия медицинского назначения;
- проектирование и технология производства приборов;
- метрология и метрологическое обеспечение;
- компьютерное моделирование и автоматизация проектирования;
- роботы, мехатроника и робототехнические системы.

По договоренности с Редакцией может быть опубликован специальный тематический выпуск, посвященный достаточно узкой проблеме приборостроения.

Рукопись подается по электронной почте: pribor@itmo.ru. Редакция принимает рукопись к рецензированию при условии получения полного комплекта документов, включающего:

- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (формат PDF);
- файлы рукописи статьи, оформленные в соответствии с требованиями журнала;
- сведения об авторах, заполненные по шаблону (на русском и английском языке);
- договор о передаче авторских прав.

Рукопись должна содержать:

- название статьи (на русском и английском языке), индекс УДК;
- аннотацию (150—250 слов, на русском и английском языке), ключевые слова (не менее 5 и не более 25, на русском и английском языке), основной текст, список литературы;
- рисунки: каждый на отдельном листе формата А4 (не заверстывать в текст), таблицы.

Объем текста (оформленного в соответствии с требованиями журнала — шрифт Times New Roman, размер — 14 пт, междустрочный интервал 1,5, поля — сверху и слева 25 мм, снизу 20 мм, справа 10 мм) должен составлять 10—20 страниц, краткого сообщения — 3—5. Объем обзора предварительно согласовывается с Редакцией.

Список литературы (рекомендуется): для обзорной статьи — не менее 50, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 литературных источников (не менее половины из них должны представлять собой ссылки на издания, включенные в международные базы цитирования Scopus и Web of Science). Список литературы должен формироваться в порядке появления ссылок в тексте.

Не допускается выравнивание с помощью пробелов, табуляций и символов конца абзаца. Эти символы при необходимости могут вставляться не более одного раза подряд (**не переносить с помощью дефисов**).

Формулы и отдельные символы набираются с использованием только редактора формул MathType.

Не вставлять формулы из пакетов MathCad и MatLab. Размер шрифта в формулах — по умолчанию. Все переменные набираются курсивом, греческие буквы — прямым шрифтом, полужирные символы в формуле — стилем „матрица вектор“, русские символы — стилем „текст“, векторы следует набирать полужирным шрифтом без стрелок.

Рисунки выполняются в градациях серого в одном из форматов приложений Microsoft (Word, Excel, PowerPoint), предпочтителен векторный формат. Кривые на графиках следует помечать цифрами (1, 2, 3 и т. д.) или/и задавать линиями разного стиля (пунктир, штрихпунктир, жирная); толщина осей должна быть не менее 0,5 пт, иначе качество печати не гарантируется.

Плата за публикацию не взимается.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

- Семенюк В. В., Складчиков М. В. Усовершенствование алгоритма идентификации эмоционального состояния человека с использованием MFCC 731

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИ

- Гончаров А. А., Быковский С. В. Метод динамической актуализации модели взаимодействия параллельных процессов во встроенных системах 741
- Винник П. М., Винник Т. В., Еськова Е. А. Оптимальное объединение интервалов группированной выборки для применения критерия типа χ^2 751
- Пастушок И. А., Тюрликов А. М. Анализ скорости алгоритма случайного доступа с разной длительностью слотов на основе алгоритма АЛОХА 759
- Унтерберг А. М., Пятаева А. В., Замыслова С. С., Рукосуева Е. Д., Богданов К. В. Распознавание рукописного текста исторических документов с применением технологий глубоких нейронных сетей 767

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

- Овсянников В. А., Овсянников Я. В. Усовершенствование расчетно-аналитической методики оценивания эффективности телевизионных камер при обнаружении и распознавании объектов 776
- Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Пушкина В. П., Дагаев А. В. Исследование низкокогерентного интерферометрического зонда при работе в сканирующем режиме измерений 790

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

- Коденко М. Р., Васильев Ю. А., Кульберг Н. С., Самородов А. В., Решетников Р. В. Распределение рентгеноконтрастного вещества в просвете и стенке брюшной аорты по данным КТ-ангиографического исследования 798

EDITOR-IN-CHIEF

*Dr. Sci., Prof. ALEXEY BOBTSOV,
ITMO University, St. Petersburg, Russia*

EDITORIAL BOARD

ALESHKIN ANDREY, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
BELIKOV ANDREY, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BESSMERTNY IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
BOGATYREV VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
EFANOV DMITRY, Dr. Sci., Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
EFIMOV VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
KHODUNKOV VYACHESLAV, PhD, D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia
KLIMCHIK ALEXANDER, PhD, Ass. Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
KOLYUBIN SERGEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KONYAKHIN IGOR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
KRISHTOP VIKTOR, Dr. Sci., Prof., PNRPU, Perm, Russia
LISITSYNA LYUBOV, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
LITVINENKO YULIA, PhD, Concern CSRI Electropribor, JSC, St. Petersburg, Russia
LUKYANOV VALERY, Dr. Sci., Prof., Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
LYAMIN ANDREY, Dr. Sci., Ass. Prof., SPbPU, St. Petersburg, Russia
MALOLETOV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., Innopolis University, Innopolis, Russia
MATVEEV YURIY, Dr. Sci., Speech Technology Center, St. Petersburg, Russia
MEDUNETSKY VIKTOR., Dr. Sci., Prof., Ferrum LLC, St. Petersburg, Russia
MIRONOV ANDREY, Dr. Sci., Prof., A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia
MUSALIMOV VIKTOR, Dr. Sci., Prof., IPMash RAS, St. Petersburg, Russia
OZHIGANOV ALEXANDER, Dr. Sci., Prof., SRTI Avangard JSC, St. Petersburg, Russia
PYRKIN ANTON, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, ITMO University, St. Petersburg, Russia
SIZIKOV VALERY, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
SOKOLOV BORIS, Dr. Sci., Prof., SPbFRC RAS, St. Petersburg, Russia
SOLK SERGEY, Dr. Sci., SRI OEP, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia
TERTYCHNY VLADIMIR, Dr. Sci., Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
TITOV DMITRY, Dr. Sci., Ass. Prof., SWSU, Kursk, Russia
FEDOROV ALEXEY, Dr. Sci., Ass. Prof., ITMO University, St. Petersburg, Russia
FILIMONOV NIKOLAY, Dr. Sci., Prof., Deputy Editor-in-Chief, M. V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia
FURTAT IGOR, Dr. Sci., Ass. Prof., IPMash RAS, St. Petersburg, Russia

Executive secretary Marina V. Lebedskaya

Editor Irina M. Igoshina

Page-proof, makeup Ekaterina S. Egorova

Translation of Yuriy I. Kopilevich

Address: ITMO University, Kronverksky pr. 49, bldg. A, St. Petersburg, Russia, 197101
Tel: (812) 480-02-73
Site: pribor.ifmo.ru
E-mail: pribor@itmo.ru

JOURNAL OF INSTRUMENT ENGINEERING

ITMO UNIVERSITY

The Journal is published since January 1958

Vol. 67

SEPTEMBER 2024

№ 9

CONTENTS

INFORMATICS AND INFORMATION PROCESSES

- Semenuk V. V., Skladchikov M. V.** Improvement of the Human Emotional State Identification Algorithm Using MFCC. 731

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL, AND INFORMATION PROCESSING

- Goncharov A. A., Bykovsky S. V.** Method of Dynamic Updating of the Interaction Model of Parallel Processes in Embedded Systems 741
- Vinnik P. M., Vinnik T. V., Eskova E. A.** Optimal Aggregation of Clustered Sample Intervals for Applying the χ^2 Test 751
- Pastushok I. A., Turlikov A. M.** Speed Analysis of ALOHA-Based Random-Access Algorithm with Various Slot Duration 759
- Unterberg A. M., Pyataeva A. V., Zamyslova S. S., Rukosueva E. D., Bogdanov K. V.** Handwritten Text Recognition of Historical Documents Using Deep Neural Network Technologies 767

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Ovsyannikov V. A., Ovsyannikov Ya. V.** Improvement of the Calculation and Analytical Method of TV-Camera Efficiency Assessment in Objects Detection and Recognition 776
- Maierov E. E., Arefiev A. V., Guliyev R. B., Pushkina V. P., Dagaev A. V.** Study of a Low-Coherence Interferometric Probe Operating in the Scanning Measurement Mode 790

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS, AND PRODUCTS

- Kodenko M. R., Vasiliev Yu. A., Kulberg N. S., Samorodov A. V., Reshetnikov R. V.** Contrast Agent Distribution in the Lumen and Wall of the Abdominal Aorta According to CT-Angiographic Study Data 799

To the Authors!

The Journal of Instrument Engineering publishes scientific reviews, full-text articles and short messages, reflecting the unpublished results of theoretical and practical research in the field of fundamental instrument making.

The Journal publishes articles on the following themes: information technologies and systems, devices and automatic control systems, computer engineering, gyroscopic and navigation systems, instruments of precision mechanics, electronic and electromagnetic devices, optical and optoelectronic devices and systems, thermal regimes and reliability of devices and systems, technology and instrumentation, scientific and practical development. In agreement with the Editorial Board can be published a special themed issue devoted to a fairly narrow issue of instrumentation.

The material of the article accepted in electronic form and on any media, executed in a text editor Word without formatting along with a hard copy on A4. Electronic version of the paper may be sent by E-mail: **pribor@mail.ifmo.ru**

The size of the article (in printed form) must not exceed eight pages, a short presentation of two. Size scientific review previously agreed with the Editorial Board.

Submission includes two copies of:

— the manuscript text; list of references (recommended): review article — not less than 50, for the full text of the article — no less than 15, for short messages — at least 8 of the literary source (at least half of them should be links to the editions listed in international database of citation Scopus and Web of Science); number citations consecutively as they appear in the text;

— extended abstract (150—250 words);

— keywords (not less than 5 and not more than 25);

— illustrations: each on a separate sheet of A4 (not overestimate in the text) — big, with a maximum fill;

— the recommendation of the Department (laboratory);

— information about the authors on a template (surname, name, patronymic, name of the organization in accordance with the latest edition of the Charter, the address of the organization, academic degree and title, position, e-mail address).

The article must also enclose agreement on the transfer of copyright.

The main text. The following requirements are common to good practice in the design documents.

Font — Times New Roman, size 14, line spacing 1.5, margins — top and left — 25 mm, bottom — 20 mm, right — 10 mm.

Not allowed alignment with spaces, tabs and end of a paragraph (in the layout will need to be cleared). These symbols must be inserted only when necessary, and not more than once in a row (not to carry with dashes).

Don't insert formulas from MathCad or MatLab!

Figures and tables are to be inserted after the list of references. Graphics are accepted in one of Microsoft formats (Word, Excel, and PowerPoint); vector format is preferable. Don't use color graphics; it is better to apply dotted, dash-and dot lines, etc., or mark lines with numerical symbols.

Editorial Staff

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MFCC

В. В. Семенюк^{1*}, М. В. Складчиков²

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова,
Новочеркасск, Россия

* semenuk.viktoriya@gmail.com

² Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия

Аннотация. Представлен подход к реализации алгоритма эмоционального состояния человека с использованием сверточных нейронных сетей. На основе общей концепции научного исследования рассмотрен вариант усложнения иерархии идентифицируемых эмоций. Проведен сравнительный анализ применения оконного преобразования Фурье и алгоритма MFCC в качестве инструмента для обработки информационных данных. Вариант усложнения предлагаемого метода рассматривается как логический переход от более простого математического аппарата, представленного в виде оконного преобразования Фурье, к мелкестральнойным коэффициентам. Благодаря данному подходу сформирован более информативный входной набор данных без усложнения архитектуры нейронной сети, скорректирована методология научного исследования и с использованием идеализированной базы данных достигнута точность идентификации, близкая к 100 %. Приведено обоснование применения Deep Network Designer как инструмента для создания архитектуры нейронной сети.

Ключевые слова: нейронная сеть, распознавание эмоций человека, сверточная нейронная сеть, дактилоскопия звука

Ссылка для цитирования: Семенюк В. В., Складчиков М. В. Усовершенствование алгоритма идентификации эмоционального состояния человека с использованием MFCC // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 731–740. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-731-740.

IMPROVEMENT OF THE HUMAN EMOTIONAL STATE IDENTIFICATION ALGORITHM USING MFCC

V. V. Semenuk^{1*}, M. V. Skladchikov²

¹ Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia

* semenuk.viktoriya@gmail.com

² Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia

Abstract. An approach to the implementation of an algorithm for the emotional state of a person using convolutional neural networks is presented. Based on the general concept of scientific research, a variant of complicating the hierarchy of identifiable emotions is considered. A comparative analysis of the application of the windowed Fourier transform and the MFCC algorithm as a tool for processing information data is carried out. The variant of complication of the proposed method is considered as a logical transition from a simpler mathematical apparatus, presented in the form of a windowed Fourier transform to the use of mel-frequency cepstral coefficients. This allowed to form a more informative input data set without complicating the neural network architecture, the methodology of scientific research was adjusted and, using an idealized database, the accuracy of identification close to 100% was achieved. The rationale for using Deep Network Designer as a tool for creating neural network architecture is given.

Keywords: neural network, human emotion recognition, convolutional neural network, sound fingerprinting

For citation: Semenuk V. V., Skladchikov M. V. Improvement of the human emotional state identification algorithm using MFCC.. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 9. P. 731–740 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-731-740.

Введение. В современном информационном обществе при интенсивном развитии технологий создание систем, способных распознавать эмоциональные состояния человека и адаптироваться к ним, имеет немаловажное значение. Эмоции играют ключевую роль в человеческом поведении, и точное определение эмоций может значительно повысить эффективность систем компьютерного взаимодействия, автоматизации и даже управления роботами.

Предлагаемый в настоящей статье подход обладает расширенным потенциалом по значительному улучшению производительности существующих систем идентификации эмоций, предоставляя более точные и надежные результаты. На основании достижений в области глубокого обучения и компьютерного зрения была поставлена задача создания инновационного инструмента, способного эффективно взаимодействовать с человеком и определять его эмоциональное состояние.

Известные системы идентификации эмоционального состояния, включающие различные методы и техники, такие как анализ речи, распознавание лиц, обработка биометрических данных и использование сенсоров для измерения физиологических параметров, применяются в разных областях, включая компьютерное зрение, медицину, робототехнику, маркетинг и др. Однако точность распознавания эмоционального состояния может варьироваться в зависимости от различных факторов, таких как качество входных данных, используемые алгоритмы и методы обучения.

Краткий обзор существующих систем. Ниже представлен обзор некоторых известных систем с указанием приблизительной точности распознавания ими объектов [1].

1. Microsoft Emotion API — использует анализ изображений лиц для распознавания эмоций. Система может обнаруживать следующие эмоции: счастье, грусть, удивление, гнев, отвращение и страх. Точность распознавания варьируется в зависимости от условий съемки, но обычно оценивается в 60–70%.

2. Affectiva — разработаны различные системы для распознавания эмоций на основе изображений лиц и анализа речи. Используемая технология демонстрирует точность распознавания от 70 до 90 % в зависимости от конкретного сценария и качества данных.

3. Emotient (приобретена Apple) — также специализируется на анализе эмоций на основе изображений лиц. Точность распознавания оценивается в диапазоне от 65 до 90 % в зависимости от контекста использования и качества данных.

4. IBM Watson Tone Analyzer — использует анализ текста для выявления тональности и эмоций в текстовых данных. Точность распознавания может быть высокой, особенно при анализе структурированных текстов.

5. Распознавание речи и голосовые ассистенты — голосовые ассистенты, такие как Siri, Alexa и Google Assistant, также могут распознавать эмоции в речи пользователей. Точность распознавания может варьироваться, но, как правило, достаточно хорошо распознаются основные эмоции: радость, грусть, гнев и т. д.

Общепризнанной единой метрики для оценки точности систем не существует. Кроме того, точность систем может существенно изменяться в зависимости от контекста применения и специфики данных, на которых они обучались.

Точность идентификации эмоций. Точность идентификации эмоций человека зависит от множества факторов, которые могут варьироваться в зависимости от используемого метода и технологии [2–12]. Перечислим некоторые из ключевых факторов, влияющих на точность идентификации эмоций.

Качество входных данных: качество изображений лиц, записей речи или других источников данных напрямую влияет на точность идентификации эмоций. Недостаточное освещение, низкое разрешение или шум в данных могут снизить точность распознавания.

Разнообразие эмоций: некоторые системы могут быть ориентированы на распознавание ограниченного набора базовых эмоций, таких как радость, грусть, гнев и т. д. Более сложные эмоции или их комбинации труднее распознавать и классифицировать.

Культурные и индивидуальные различия: эмоциональные выражения могут варьироваться в зависимости от культурных норм и индивидуальных особенностей. Некоторые системы могут иметь ограничения по распознаванию эмоций у людей разных культурных фонов или с разными эмоциональными выражениями.

Обучение модели и алгоритмы: качество обучающих данных и выбранные алгоритмы машинного обучения имеют решающее значение для точности системы. Недостаточное количество данных или неподходящие алгоритмы могут привести к низкой точности распознавания.

Контекст и ситуация: эмоции человека могут изменяться в зависимости от контекста и ситуации. Некоторые системы могут быть более или менее эффективными в распознавании эмоций в различных ситуациях, таких как разговор по телефону, встреча лицом к лицу или просмотр видеоконтента.

Внешние факторы: шум, артефакты данных, изменения освещения и другие внешние факторы могут оказывать влияние на точность идентификации эмоций.

Идентификация эмоций человека по голосу изучается в области эмоциональной речи и звука, которая анализирует физиологические изменения, происходящие в голосовых свойствах при различных эмоциональных состояниях. Рассмотрим несколько ключевых аспектов физиологии, влияющих на идентификацию эмоций по голосу.

1. Интонация и тембр голоса — эмоциональные состояния могут изменять интонацию и тембр голоса. Например, голос может стать более высоким или низким, более напряженным или расслабленным в зависимости от эмоции.

2. Скорость и ритм речи — эмоции также могут влиять на скорость и ритм речи. Например, человек может говорить быстрее и более ритмично при возбуждении или более медленно и плавно в спокойном состоянии.

3. Частотные характеристики — эмоциональное состояние может изменить частотные характеристики голоса, такие как основная и высшие частоты. Например, голос может стать более высоким или более низким в зависимости от эмоций.

4. Интонационные и темпоральные параметры — параметры, такие как интонационные контуры и длительность фраз, также могут отражать эмоциональное состояние. Например, увеличение или уменьшение интонационного разнообразия или изменение длительности пауз могут свидетельствовать о различных эмоциях.

5. Физиологические маркеры — физиологические изменения, такие как изменение частоты сердечных сокращений или дыхательного ритма, могут также влиять на голосовые характеристики и помогать идентифицировать эмоциональные состояния по голосу.

В настоящей работе для повышения качества распознавания эмоций человека было решено перейти от преобразования Фурье к иному варианту преобразования входных данных — алгоритму MFCC (Mel-Frequency Cepstral Coefficients — мел-частотные кепстральные коэффициенты). MFCC — это метод акустического анализа звука, используемый при обработке речи и распознавании речевых команд [13]. Он основан на преобразовании звукового сигнала в частотно-временное представление, которое затем анализируется с целью извлечения характеристик, содержащих информацию о звуковых особенностях, связанных с произношением.

Метод MFCC сначала преобразует звуковой сигнал в спектрограмму, представляющую собой распределение мощности звука по частотам и времени. Затем используется мел*-шкала, которая моделирует восприятие человеком частоты звука, для разделения спектрограммы на равномерные по мел-шкале частотные полосы. После этого применяется дискретное косинусное преобразование, чтобы извлечь наиболее значимые характеристики из полученных мел-частотных кепстральных коэффициентов.

* Мел — единица высоты звука, основанная на восприятии этого звука органами слуха.

Метод MFCC является мощным инструментом для извлечения характеристик звуков речи, таких как форманты и другие акустические особенности, которые могут быть использованы для распознавания речи, идентификации спикеров и других задач обработки речи и аудиоаналитики. Этот метод широко применяется в сферах распознавания речи, музыкального анализа, биомедицинской диагностики и других областях, где необходимо анализировать и классифицировать звуковые данные.

В предыдущем варианте исследования [13] была реализована концепция распознавания эмоций для трех классов — положительная, отрицательная, нейтральная. Изначальная картина исследования строилась на подготовке изображений как результат применения оконного преобразования Фурье к аудиоданным: см. рис. 1, *а* — дактилоскопия звука, *б* — спектрограмма.

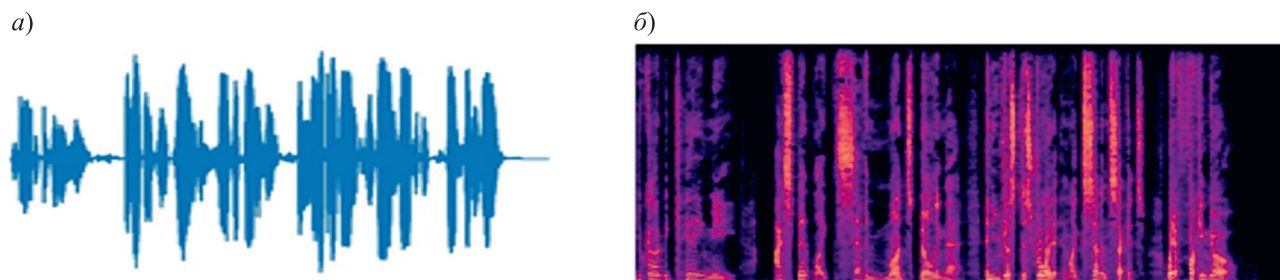


Рис. 1

Обучение было выполнено на основании RAVDESS (Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song) — базы данных, разработанной в Университете Райерсон (Торонто, Канада) в целях предоставления исследователям доступа к аудиовизуальным данным, связанным с эмоциональными выражениями в речи. Эта база данных была создана для поддержки исследований в области распознавания эмоций, а также машинного обучения и обработки сигналов.

Основные характеристики RAVDESS:

- многообразие эмоций — в базе данных представлены различные эмоциональные состояния, включая грусть, радость, страх, злость, удивление и отвращение; эти эмоции записаны в речи, чтобы предоставить богатый набор данных для анализа;

- множество голосов — датасет включает записи голоса, выражающего эмоции, что позволяет исследователям анализировать аудиоданные для распознавания эмоций;

- высокое качество данных — аудиоданные имеют высокое качество и разрешение, что обеспечивает точные и надежные результаты анализа;

- сбалансированная выборка — датасет содержит сбалансированный набор данных по эмоциональным категориям, что позволяет избежать смещения в сторону определенных эмоций и обеспечивает надежные результаты исследований;

- доступность и открытость — RAVDESS является открытым ресурсом, доступным для исследователей и разработчиков по всему миру, что способствует совместной работе и обмену знаниями в области распознавания эмоций и машинного обучения.

В целях упрощения алгоритма для распознавания был выбран более простой вариант, а именно три эмоции. По представленным на рис. 2 результатам исследования установлено, что подобный подход не позволяет добиться высокой точности идентификации (I) эмоций.

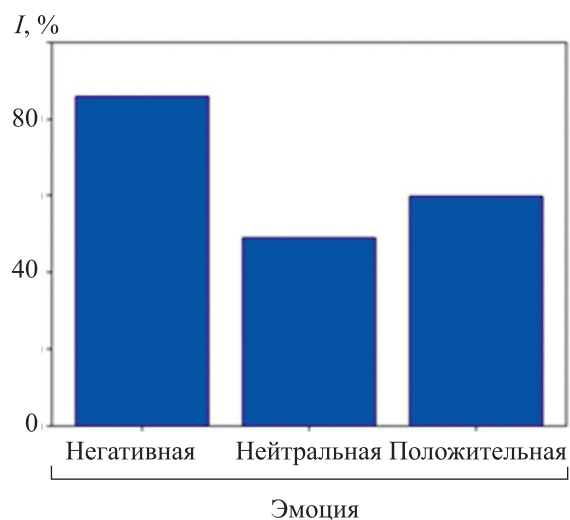


Рис. 2

Исходя из результатов, приведенных на рис. 2, было решено рассмотреть иную концепцию получения изображений для формирования базы данных. Был проведен сравнительный анализ алгоритма MFCC и оконного преобразования Фурье (STFT — Short-Time Fourier Transform) в задачах распознавания звука. Рассмотрим ключевые аспекты сравнения.

1. *Частотное разрешение:*

— MFCC — используется мел-шкала, более соответствующая восприятию звука человеческим ухом и имеющая более высокое разрешение на низких частотах и более низкое разрешение на высоких частотах;

— STFT — обеспечивается равномерное частотное разрешение по всему спектру.

2. *Информативность признаков:*

— MFCC — извлекаются характеристики, сосредоточенные на акустически важных частотах, что делает этот метод более информативным для распознавания речи и других аудиосигналов;

— STFT — предоставляется информация о спектральных характеристиках звука, но метод менее эффективен в распознавании речи вследствие меньшей специфичности для человеческого восприятия.

3. *Временное разрешение:*

— MFCC — используется временное среднее по времени для извлечения характеристик, что может снижать точность признаков на коротких временных интервалах. В данном исследовании при обучении нейронной сети основным критерием для принятия решения была мощность сигнала. Эту характеристику можно выделить из спектрограммы, которую и получают с помощью данной технологии. Однако чтобы сгладить сигнал, используется временное усреднение, а это приводит к потере деталей о быстрых изменениях в звуковом сигнале. Это снижает точность признаков на коротких временных интервалах, поскольку важная информация может быть утрачена, что усложняет анализ кратковременных звуковых событий;

— STFT — обеспечивается высокое временное разрешение и точное отражение динамических изменений в сигнале на коротких временных интервалах. Это математический метод, позволяющий анализировать частотные компоненты сигнала, изменяющегося во времени. В отличие от обычного преобразования Фурье, которое показывает только частотный состав сигнала в целом, STFT позволяет получить информацию о том, как частоты изменяются с течением времени.

4. *Размерность признаков:*

— MFCC — метод имеет, как правило, более низкую размерность признаков, что может сократить вычислительную сложность алгоритмов машинного обучения и повысить обобщающую способность модели;

— STFT — может генерировать больше признаков из-за увеличенного количества коэффициентов Фурье, что требует большего объема вычислительных ресурсов.

В целом, как было также установлено экспериментально, метод MFCC обычно предпочтительнее в задачах распознавания речи и других аудиосигналов благодаря своей специфичности для человеческого восприятия и более низкой размерности признаков. Однако STFT также может быть полезно в некоторых ситуациях, особенно в задачах, где требуется высокое временное разрешение или спектральная информация о звуке.

В результате был разработан алгоритм с использованием языка программирования MatLab, позволяющий получить мел-спектрограммы, см. рис. 3: *a* — аудиосигнал, *b* — спектрограмма MFCC.

Следующим этапом исследования была разработка архитектуры нейронной сети для обучения. Вследствие преимуществ пакета MatLab было решено разработать модель сверточной нейронной сети с использованием специализированного дополнения. Deep Network Designer (DND) — это мощный инструмент MatLab для создания, настройки и обучения нейронных сетей, позволяющий быстро прототипировать и анализировать различные архитектуры нейронных сетей без необходимости написания кода.

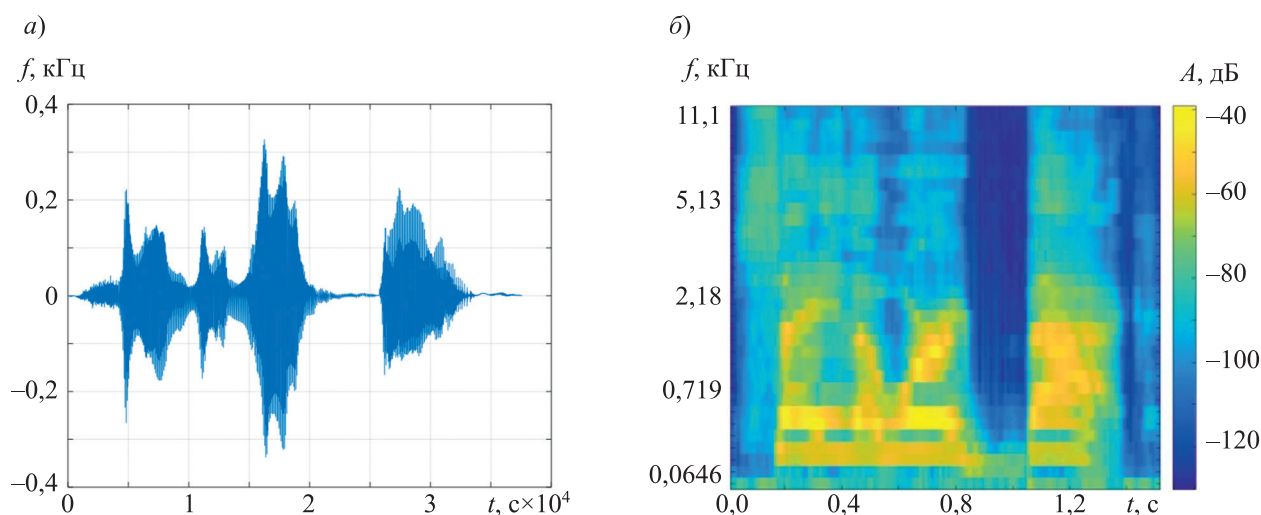


Рис. 3

Алгоритм идентификации. Благодаря описанным выше параметрам выбора, было решено усовершенствовать алгоритм идентификации эмоций, для чего следовало перестроить архитектуру нейронной сети, а также применить MFCC-преобразование для создания входного набора данных. Под усложнением алгоритма также понимается использование более расширенного варианта входного набора данных, позволяющего идентифицировать уже 7 эмоций. Новая архитектура нейронной сети приведена на рис. 4 (скриншот).

На рис. 5 представлена матрица ошибок и несколько других метрик, характеризующих результаты работы этой нейронной сети, обученной для классификации эмоций.

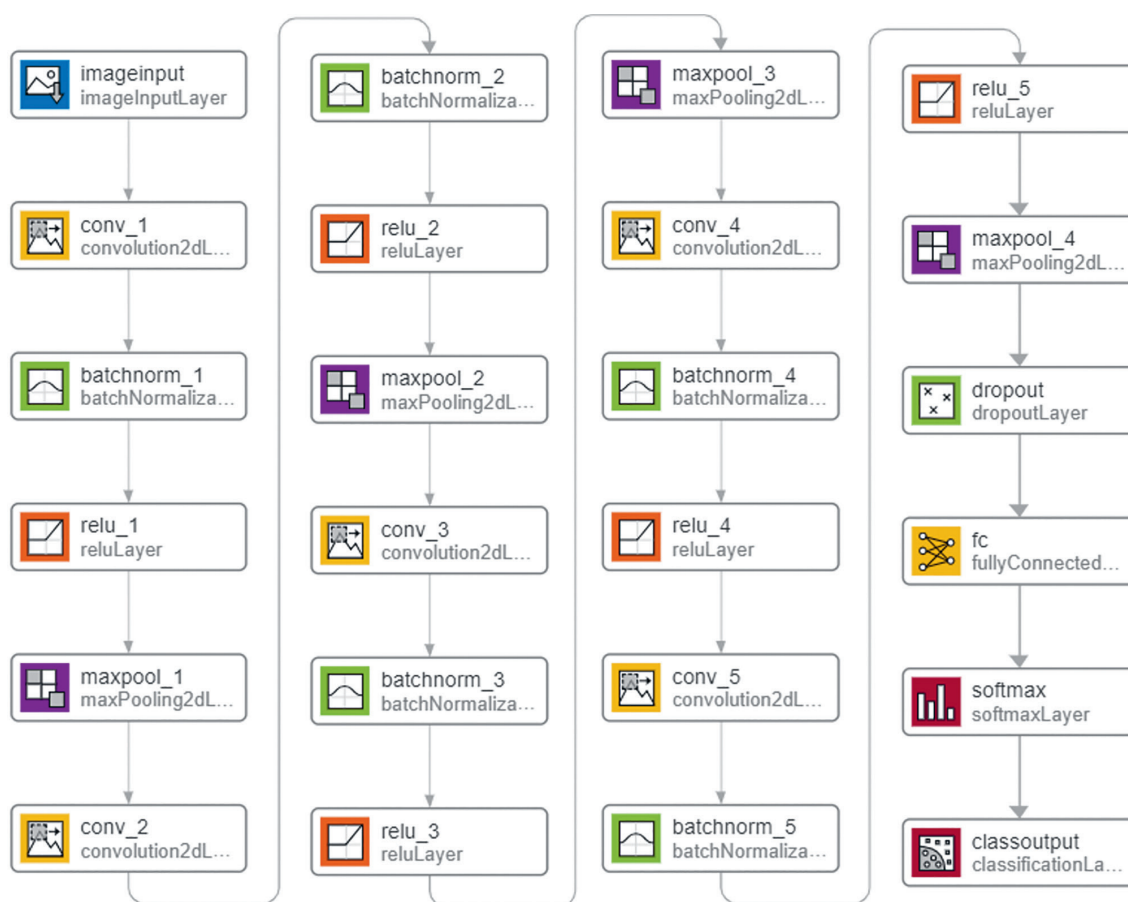


Рис. 4

Точность классификации на наборе данных, не участвовавших в обучении нейронной сети

96,3 %	3,7 %
96,3 %	3,7 %
90,0 %	10,0 %
95,0 %	5,0 %
93,8 %	6,3 %
98,8 %	1,2 %
88,8 %	11,3 %

Матрица ошибок

Агрессия	77	2		1			
Отвращение		77		1	1		1
Страх	1	1	72	1			5
Счастье		2		76			2
Нейтральное состояние			2		75	3	
Печаль		1				79	
Удивление	2	7					71

Точность классификации на наборе данных, участвовавших в обучении нейронной сети

96,3 %	85,6 %	97,3 %	96,2 %	98,7 %	95,2 %	91,0 %
3,7 %	14,4 %	2,7 %	3,8 %	1,3 %	4,8 %	9,0 %
Агрессия	Отвращение	Страх	Счастье	Нейтральное состояние	Печаль	Удивление

Рис. 5

Матрица ошибок позволяет оценить, насколько успешно модель распознает каждую из эмоций и где она допускает ошибки.

Общее понимание матрицы ошибок: на диагонали матрицы приведены значения, показывающие, сколько раз моделью правильно предсказана каждая эмоция: например, эмоция „агрессия“ была правильно классифицирована 77 раз, „отвращение“ также 77 раз и т. д. Остальные значения вне диагонали представляют собой количество ошибочных классификаций: например, эмоция „удивление“ неправильно классифицирована как „отвращение“ 7 раз, а „нейтральное состояние“ — как „печаль“ 3 раза.

Точность классификации на наборе данных, участвовавшем в обучении нейронной сети:

- агрессия: этот класс моделью предсказан с точностью 96,3 %;
- отвращение: точность 85,6 %;
- страх: высокая точность — 97,3 %;
- счастье: точность 96,2 %;
- нейтральное состояние: эмоция предсказана с точностью 98,7 %;
- печаль: точность 95,2 %;
- удивление: точность 91,0 %.

Точность классификации на наборе данных, не участвовавшем в обучении нейронной сети:

- агрессия: моделью правильно классифицировано 96,3 % случаев, но 3,7 % случаев были ошибочно отнесены к другим классам;
- отвращение: правильная классификация составила 96,3 % при 3,7 % ошибок;
- страх: точность 90,0 %, но в 10,0 % случаев ошибки;
- счастье: правильное распознавание в 95,0 % случаев, 5,0 % — ошибки;
- нейтральное состояние: 93,8 % случаев распознаны верно, 6,3 % ошибок;
- печаль: очень высокая точность — 98,8 %, ошибки составили лишь 1,2 %;
- удивление: сложности в распознавании, так как точность составила 88,8 %, а ошибок 11,3 %.

Нейронная сеть продемонстрировала хорошие результаты в распознавании эмоций, особенно для таких классов, как „печаль“ и „нейтральное состояние“, где точность была наиболее высокой. Однако сеть испытывает сложности в распознавании эмоций „удивление“ и „отвращение“, что проявляется в большем числе ошибочных классификаций и сравнительно низкой точности для этих классов. В целом сеть обладает высокой точностью и может быть эффективной в задачах классификации эмоций, но дальнейшие улучшения могут потребоваться для снижения ошибок в специфических случаях.

Выводы. По результатам разработки усовершенствованного алгоритма идентификации эмоций человека можно сделать следующие выводы.

1. Разработанный алгоритм на основе сверточной нейронной сети демонстрирует высокую эффективность в задаче идентификации эмоций человека. Полученные результаты подтверждают способность модели точно распознавать и классифицировать эмоциональные состояния на основе входных данных.

2. Проведенный сравнительный анализ алгоритма с другими методами и алгоритмами показывает преимущество разработанного подхода по эффективности и точности распознавания эмоций. Сверточные нейронные сети оказываются более адаптированными к анализу изображений лиц и способны извлекать более информативные признаки для идентификации эмоций.

3. Алгоритм представляет собой перспективное направление в области распознавания эмоций человека и может быть успешно применен в различных сферах, таких как компьютерное зрение, робототехника, медицина, психология и др.

4. Полученные результаты имеют практическую значимость и могут быть использованы для создания автоматизированных систем, способных анализировать эмоциональное состояние человека на основе визуальных данных. Это может быть полезно, например, при разработке систем управления эмоциональными интерфейсами, систем безопасности или в медицинской

диагностике. Практические результаты представленного исследования были внедрены в производство ООО „Русбирсофт“ (Биробиджан, Россия).

В ходе исследования были выявлены определенные ограничения для улучшения алгоритма. Дальнейшие исследования могут быть направлены на усовершенствование архитектуры нейронной сети, оптимизацию процесса обучения и расширение набора данных для обеспечения более высокой точности и обобщающей способности модели.

Таким образом, разработанный алгоритм представляет собой значимый вклад в область распознавания эмоций человека, обеспечивая высокую точность и перспективы для будущих исследований и практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топ-5 сфер применения систем распознавания объектов [Электронный ресурс]: <https://habr.com/ru/company/toshibarush/blog/433544/>, 10.03.2022.
2. Li X., Chen Y., Hu J., Zhang J., Zhang Z. Recognizing emotion in human-computer interaction-a survey / IEEE Transactions on Affective Computing. 2016. N 7 (2). P. 149–166.
3. Шиллер А. В. Выражение модернизируемых эффектов эмоций у искусственных агентов как визуальный язык // Праксема. Проблемы визуальной семиотики. 2019. № 4 (22). С. 223–243.
4. Рюмина Е. В., Карпов А. А. Аналитический обзор методов распознавания эмоций по выражениям лица человека // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20, № 2. С. 163–176.
5. Xu H., Liang X., Sun M., Chen S., Feng J. Fusion of Visual and Affective Features for Emotion Recognition in the Wild // IEEE Transactions on Affective Computing. 2018. N 9 (2). P. 261–274.
6. Zhao M., Adelhardt J., Kummert F. Real-time emotion recognition from facial images using deep neural networks // Proc. of the ACM on Intern. Conf. on Multimodal Interaction. 2018. P. 440–447.
7. Shan H., Kan M., Wang S., Yan S. Deep learning for emotion recognition: A survey // IEEE Transactions on Affective Computing. 2017. N 8 (4). P. 512–527.
8. Хрусталёв В. О., Зубков А. В. Разработка технологии распознавания эмоций человека на основе изображений, поступающих с веб-камеры // XXIV региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области. 2020. С. 223–224 [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?ysclid=m0425zwq1q320826398&id=42400458>.
9. Курицкий В. Ю., Садов С. В. Нейросетевой алгоритм распознавания эмоций по изображению лица // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2020). 2020. С. 245–248.
10. Хнюнин М. В., Ганелина Н. Д. Перспективы применения личных мобильных устройств для распознавания эмоций человека по фотографиям лица // Интеллектуальный потенциал Сибири. 2021. С. 179–182.
11. Артемьева Ж. Г., Крушина Н. А. Распознавание эмоций у других людей детьми с нарушениями опорно-двигательного аппарата // Человеческий фактор: социальный психолог. 2020. № 1 (39). С. 288–294.
12. Abadi M. K., Zeng Z. Emotion recognition from speech using deep learning // Proc. of the Interspeech. 2017. P. 2362–2366.
13. Семенюк В. В. Повышение качества компьютерного распознавания эмоционального состояния человека по голосу // Науч.-практ. конф. „Научные революции: Сущность и роль в развитии науки и техники“; Сб. докл. Челябинск: НИЦ „АЭТЕРНА“, 2021.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Виктория Валерьевна Семенюк** — аспирант; Южно-Российский государственный политехнический университет им. М. И. Платова, кафедра программного обеспечения вычислительной техники; E-mail: semenuk.viktoriya@gmail.com
- Максим Владимирович Складчиков** — аспирант; Донецкий национальный технический университет, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок; E-mail: maxsklad19981@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.04.2021; одобрена после рецензирования 19.04.2024; принята к публикации 23.07.2024.

REFERENCES

1. <https://habr.com/ru/company/toshibarus/blog/433544/>. (in Russ.)
2. Li X., Chen Y., Hu J., Zhang J., & Zhang Z. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2016, no. 2(7), pp. 149–166.
3. Shiller A.V. *Praxema. Journal of Visual Semiotics*, 2019, no. 4(22), pp. 223–243. (in Russ.)
4. Ryumina E.V., Karpov A.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, no. 2(20), pp. 163–176. (in Russ.)
5. Xu H., Liang X., Sun M., Chen S., & Feng J. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2018, no. 2(9), pp. 261–274.
6. Zhao M., Adelhardt J., & Kummert F. *Proceedings of the 2018 ACM on International Conference on Multimodal Interaction*, 2018, pp. 440–447.
7. Shan H., Kan M., Wang S., & Yan S. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2017, no. 4(8), pp. 512–527.
8. Khrustalev V.O., Zubkov A.V. *XXIV regional'naya konferentsiya molodykh uchonykh i issledovateley Volgogradskoy oblasti* (XXIV Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region), Volgograd, 2020, pp. 223–224. (in Russ.)
9. Kuritsky V.Yu., Sadov S.V. *Komp'yuternyye tekhnologii i analiz dannykh (CTDA'2020)* (Computer Technologies and Data Analysis (CTDA'2020)), Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Minsk, April 23–24, 2020, pp. 245–248. (in Russ.)
10. Khnyunin M.V., Ganelina N.D. *Intellektual'nyy potentsial Sibiri (RNSK-2021)* (Intellectual Potential of Siberia (RNSC-2021)), Collection of scientific papers of the 29th Regional Scientific Student Conference, Novosibirsk, 2021, vol. 3, pp. 179–182. (in Russ.)
11. Artemyeva Zh.G., Krushnaya N.A. *Human factor: social psychologist*, 2020, no. 1(39), pp. 288–294. (in Russ.)
12. Abadi M.K. & Zeng Z. *Proceedings of the INTERSPEECH*, 2017, pp. 2362–2366.
13. Semenyuk V.V. *Nauchnyye revolyutsii: Sushchnost' i rol' v razvitii nauki i tekhniki* (Scientific Revolutions: Essence and Role in the Development of Science and Technology), Scientific and practical conference, Chelyabinsk, 2021, 142 p. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- | | |
|-----------------------------|---|
| Victoria V. Semenuk | — Post-Graduate Student; Platov South-Russian State Polytechnic University, Department of Computer Software;
E-mail: semenuk.viktoriya@gmail.com |
| Maxim V. Skladchikov | — Post-Graduate Student; Donetsk National Technical University, Department of Electric Drives and Automation of Industrial Installations;
E-mail: maxsklad19981@yandex.ru |

Received 02.04.2021; approved after reviewing 19.04.2024; accepted for publication 23.07.2024.

МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОЙ АКТУАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ВСТРОЕННЫХ СИСТЕМАХ

А. А. Гончаров*, С. В. Быковский

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

* *aagoncharov@itmo.ru*

Аннотация. Рассматривается метод динамической актуализации формальной модели параллельных процессов, который предназначен для отладки и верификации программного обеспечения микроконтроллеров в процессе натурных испытаний. Предложенный метод основан на применении методов интеллектуального анализа процессов и изначально отличается от предыдущих подходов тем, что позволяет записывать наблюдаемое поведение системы в формальную модель и обновить эту модель в режиме реального времени в процессе функционирования системы. Такой подход позволяет существенно сократить затраты ресурсов памяти на журналирование событий, поддерживать причинно-следственную связь между ними, производить наблюдение за системой в случаях, когда доступ к ней ограничен в течение продолжительного времени, а также строить модели процессов для распределенных систем в режиме реального времени. Метод, воплощенный в виде библиотеки на языке C, был реализован в виде совокупности предварительно подготовленных таблиц, представляющих собой динамически актуализируемую модель процессов системы в форме событийного графа с частотными характеристиками, обновляемыми за счет поступления информации о событиях в системе. Приведена формула для оценки необходимых ресурсов для целевых платформ, а также даны указания по применению разработанного инструментария.

Ключевые слова: верификация, формальная модель процесса, встраиваемые системы, микроконтроллеры, интеллектуальный анализ процессов

Ссылка для цитирования: Гончаров А. А., Быковский С. В. Метод динамической актуализации модели взаимодействия параллельных процессов во встроенных системах // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 741–750. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-741-750.

METHOD OF DYNAMIC UPDATING OF THE INTERACTION MODEL OF PARALLEL PROCESSES IN EMBEDDED SYSTEMS

A. A. Goncharov*, S. V. Bykovsky

ITMO University, St. Petersburg, Russia,

* *aagoncharov@itmo.ru*

Abstract. A method for dynamic updating of a formal model of parallel processes, intended for debugging and verification of microcontroller software during field testing, is considered. The proposed method is based on the application of methods of process mining and initially differs from previous approaches in that it allows recording the observed behavior of the system in a formal model and updating this model in real time during the operation of the system. This approach allows to significantly reduce the memory resource costs for event logging, maintain the cause-and-effect relationship between them, monitor the system in cases where access to it is limited for a long time, and build process models for distributed systems in real time. The method, embodied in the form of a library in the C language, is implemented as a set of pre-prepared tables representing a dynamically updated model of the system processes in the form of an event graph with frequency characteristics updated due to the receipt of information about events in the system. A formula for assessing the necessary resources for target platforms is given, and instructions for using the developed toolkit are given.

Key words: verification, formal process model, embedded systems, microcontrollers, process mining

For citation: Goncharov A. A., Bykovsky S. V. Method of dynamic updating models of the interaction model of parallel processes in embedded systems. 2024. Vol. 67, N 9. P. 741–750 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-741-750.

Введение. Промышленные системы управления, бытовая техника, медицинское оборудование, автомобили, а также различные современные устройства — область применения встроенных систем на базе микроконтроллеров [1, 2]. Программное обеспечение таких систем должно соответствовать спецификациям, так как даже малейшие ошибки в коде могут привести к авариям.

Одним из эффективных способов проверки корректности программного обеспечения встроенных систем является формальная верификация [3]. Особый интерес представляет проверка на соответствие спецификации формальной модели в процессе работы системы.

Интеллектуальный анализ процессов (process mining) — это технология, основанная на сборе и обработке данных журналов событий системы, позволяющая анализировать процессы, восстанавливать их формальные модели, обнаруживать несоответствия ожидаемому поведению системы [4–6]. Использование такого подхода на целевых платформах во встроенных системах ограничено требованиями по относительно высокой производительности алгоритмов, а также необходимостью накопления объемных журналов событий для последующей обработки. Несмотря на эти сложности, некоторые методы интеллектуального анализа процессов можно применить для анализа встроенных систем.

Обзор публикаций. Возможность применения методов интеллектуального анализа процессов в области встроенных систем рассматривается во множестве исследований. Так, в работе [7] предлагается использовать эту технологию для получения актуальной информации о текущем состоянии наблюдаемых сложных киберфизических систем. Результат в виде моделей формируется на отдельном вычислительном сервере после сбора журналов событий со всех компонентов. Данный подход апробирован на реальных системах и рекомендован для киберфизических систем средней и высокой сложности. В [8] результат, полученный посредством интеллектуального анализа процессов, дополняется проверкой с помощью формул темпоральной логики устойчивости киберфизических систем к сбоям ресурсов. Подход к разработке крупномасштабных когнитивных киберфизических систем, характеризующихся высоким уровнем структурной, функциональной и архитектурной динамики, рассматривается в работе [9]. Основная идея заключается в использовании нескольких современных парадигм — непрерывной архитектуры, гибкой архитектуры, цифровых двойников и цифровых потоков. Важным моментом является предварительное заложение на этапе разработки системы возможности динамической актуализации системы во время работы.

В [10–12] интеллектуальный анализ процессов используется для проверки соответствия применительно к различным сферам: роботизированным механизмам, промышленным системам управления и интернету вещей. Возможность автоматизация анализа моделей процессов, полученных с использованием интеллектуального анализа процессов, показана в [13]. Работы [14, 15] посвящены использованию систем анализа моделей для сложных эксплуатируемых систем: солнечных электростанций и европейской системы управления железнодорожным движением. Возможность применения методов интеллектуального анализа процессов для выявления аномального поведения промышленных систем и обнаружения кибератак на эти системы продемонстрирована в [16].

В работе [17] авторами произведен сравнительный обзор алгоритмов интеллектуального анализа процессов по различным параметрам, например, таким как возможности обработки циклов различной длины, обнаружение повторяющихся задач, учет частоты событий, работа с „шумными“ журналами, скорость обработки журналов событий с относительно большим количеством строк. Был выбран индуктивный алгоритм для поиска общих зависимостей между действиями, который для обнаружения частотных характеристик дополнен алгоритмом выравнивания. Такой подход позволил авторам получить корректный событийный граф процессов.

На основе воспроизведения объектов достигнута полная автоматизация проверки корректности поведения системы.

Представленный обзор показывает возможность и актуальность использования методов интеллектуального анализа процессов для современных встроенных систем. Важно отметить, что в рассмотренных работах анализ данных, получаемых от различных компонентов системы, осуществляется вне целевой платформы, обычно на отдельном вычислительном устройстве оператора. В настоящей статье предложен метод динамической актуализации модели параллельных процессов встроенных систем, реализация которого полностью возможна на целевой платформе.

Предлагаемый метод. Анализ существующих работ показал отсутствие инструментов, способных обеспечить динамическую актуализацию модели процессов без использования внешнего относительно встраиваемой системы вычислительного устройства. Встраиваемые системы могут использоваться длительное время автономно и, соответственно, не иметь возможности передавать накопленный журнал событий для расчета модели. Поэтому в рамках данного исследования предлагается метод, позволяющий динамически обновлять модель процессов в режиме реального времени за счет данных, получаемых от встраиваемой системы. Хранение модели планируется также на целевой платформе. Таким образом, можно обеспечить хранение и обновление модели в рамках целевой платформы с периодической передачей полученной модели для дальнейшего анализа на другом вычислительном устройстве.

В первую очередь был разработан метод анализа модели процессов одиночного устройства, позволяющий отказаться от накопления журнала событий и последующей длительной обработки. Вместо классического подхода с постобработкой журналов событий предлагается создать на этапе инициализации устройства модель процессов в виде таблиц, учитывающих все возможные переходы между событиями, и по мере накопления событий, поступающих с компонентов системы, обновлять данные в таблицах.

Постепенно заполняемые таблицы представляют собой динамически актуализируемую модель процессов системы в виде событийного графа с частотными характеристиками, обновляемыми за счет поступления информации о событиях в системе. Матрица смежности графа, иллюстрирующая систему переходов между событиями (events), имеет следующий вид:

$$\text{Events} = \begin{bmatrix} e_1 \rightarrow e_1 & e_1 \rightarrow e_2 & e_1 \rightarrow e_3 & \dots & e_1 \rightarrow e_n \\ e_2 \rightarrow e_1 & e_2 \rightarrow e_2 & e_2 \rightarrow e_3 & \dots & e_2 \rightarrow e_n \\ e_3 \rightarrow e_1 & e_3 \rightarrow e_2 & e_3 \rightarrow e_3 & \dots & e_3 \rightarrow e_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_n \rightarrow e_1 & e_n \rightarrow e_2 & e_n \rightarrow e_3 & \dots & e_n \rightarrow e_n \end{bmatrix},$$

где e_i — некое событие в системе.

Предлагается создать несколько таблиц: таблицу, данные для которой должен ввести разработчик на этапе инициализации устройства, с максимально допустимым временем между переходами для учета недопустимых по времени переходов, например долгого ответа устройств, датчиков и т. д.; таблицу с переходами, время которых не превышает допустимое; таблицу с переходами, время которых превышает допустимое. Совокупность таких таблиц позволит не только получать актуализированную модель процессов и вести подсчет частотных характеристик между событиями, но и устанавливать нежелательное поведение системы в части скорости работы между событиями.

Таким образом, разработчик, использующий предлагаемый метод, может точно оценить необходимые затраты ресурсов системы по объему памяти, а также по необходимой вычислительной мощности.

Для разработанного метода основными временными затратами являются:

— затраты на добавление в таблицы нового события в системе — постоянная величина вне зависимости от количества ранее добавленных событий, состоящая из следующих операций:

извлечение из таблицы временных ограничений (чтение из массива и перемещение в переменную — две инструкции); сравнение времени между переходами с ранее извлеченным временем (сравнение и переход в зависимости от результата сравнения — две инструкции); инкрементирование ячейки таблицы с корректными или некорректными по времени переходами в зависимости от результата сравнения (чтение из массива, инкрементирование прочитанного массива и перемещение нового значения обратно в массив — три инструкции);

— выгрузка актуальной модели процессов на операторский персональный компьютер через проводной или беспроводной интерфейс (время изменяется пропорционально росту количества переходов между событиями и заполняемости ячеек таблиц).

На рис. 1 представлена схема, отображающая разработанный авторами метод динамической актуализации модели поведения системы для анализа процессов одиночного устройства встраиваемой системы.

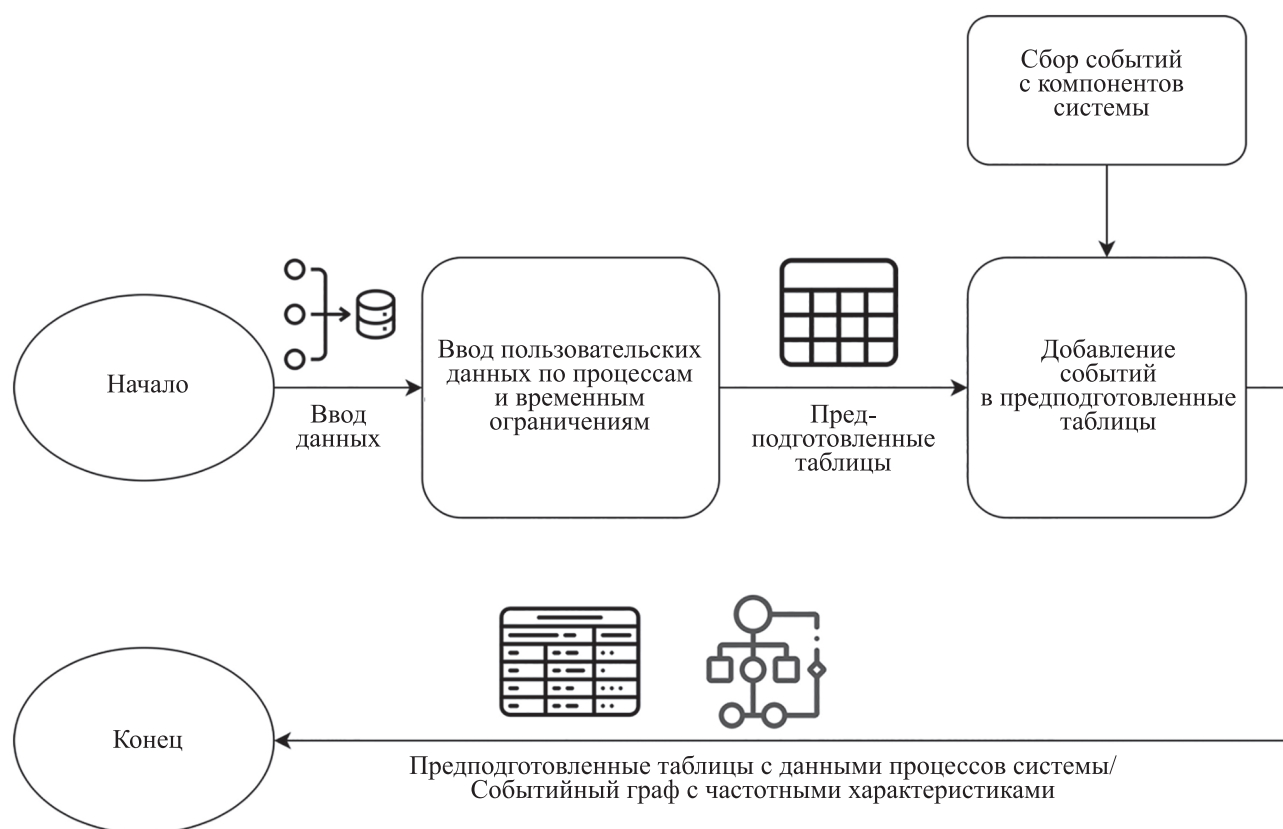


Рис. 1

Основные преимущества разработанного метода — прогнозируемость в части использования ресурсов памяти и требуемой производительности для обновления данных в таблицах, а также возможность контролировать изменения модели во время работы системы, т. е. возможность наблюдать динамику процессов. Недостатками подхода являются: отсутствие журнала событий системы и, соответственно, невозможность построения модели поведения системы с помощью других алгоритмов, а также невозможность получения всей цепочки событий от запуска системы до возникновения сбоя.

На рис. 2 приведена схема предлагаемого метода актуализации модели процессов во встроенных системах для параллельных процессов. Данный метод является расширением для множества устройств представленного выше метода динамической актуализации модели (см. рис. 1). В качестве точек объединения моделей предлагается использовать события взаимодействия между устройствами.



Рис. 2

Ниже для примера представлены матрицы смежности графов и матрица взаимодействия двух устройств:

$$\text{Events 1} = \begin{bmatrix} e_{1_1} \rightarrow e_{1_1} & e_{1_1} \rightarrow e_{1_2} & \dots & e_{1_1} \rightarrow e_{1_n} \\ e_{1_2} \rightarrow e_{1_1} & e_{1_2} \rightarrow e_{1_2} & \dots & e_{1_2} \rightarrow e_{1_n} \\ e_{1_3} \rightarrow e_{1_1} & e_{1_3} \rightarrow e_{1_2} & \dots & e_{1_3} \rightarrow e_{1_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{1_n} \rightarrow e_{1_1} & e_{1_n} \rightarrow e_{1_2} & \dots & e_{1_n} \rightarrow e_{1_n} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{Events 2} = \begin{bmatrix} e_{2_1} \rightarrow e_{2_1} & e_{2_1} \rightarrow e_{2_2} & \dots & e_{2_1} \rightarrow e_{2_n} \\ e_{2_2} \rightarrow e_{2_1} & e_{2_2} \rightarrow e_{2_2} & \dots & e_{2_2} \rightarrow e_{2_n} \\ e_{2_3} \rightarrow e_{2_1} & e_{2_3} \rightarrow e_{2_2} & \dots & e_{2_3} \rightarrow e_{2_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{2_n} \rightarrow e_{2_1} & e_{2_n} \rightarrow e_{2_2} & \dots & e_{2_n} \rightarrow e_{2_n} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\text{Events Cooperation 1\&2} = \begin{bmatrix} e_{1_1} \leftrightarrow e_{2_1} & e_{1_1} \leftrightarrow e_{2_2} & \dots & e_{1_1} \leftrightarrow e_{2_n} \\ e_{1_2} \leftrightarrow e_{2_1} & e_{1_2} \leftrightarrow e_{2_2} & \dots & e_{1_2} \leftrightarrow e_{2_n} \\ e_{1_3} \leftrightarrow e_{2_1} & e_{1_3} \leftrightarrow e_{2_2} & \dots & e_{1_3} \leftrightarrow e_{2_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{1_n} \leftrightarrow e_{2_1} & e_{1_n} \leftrightarrow e_{2_2} & \dots & e_{1_n} \leftrightarrow e_{2_n} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Размерность матриц (1) и (2) определяется количеством фиксируемых событий для устройства, а размерность матрицы (3) — количеством событий взаимодействия между устройствами:

например, если устройства только периодически обмениваются сообщениями в формате запрос-ответ, такую матрицу можно представить в виде $[e_{1_1} \rightarrow e_{2_1}]$. Вид (3) матрицы Events Cooperation 1&2 представлен для множества событий взаимодействия между устройствами. В случае когда система представляет собой множество устройств, необходимо построить матрицы взаимодействия для каждой пары из множества. События взаимодействия определяются разработчиком, внедряющим предлагаемый метод, а частотные характеристики для событий взаимодействия рассчитываются в соответствии с данными, полученными из моделей устройств.

Оценим необходимые затраты ресурсов памяти для использования во встраиваемых системах. Для начала представим формулы, позволяющие разработчику на этапе проектирования архитектуры системы рассчитать объем памяти, требуемой для хранения таблиц для каждого устройства. Так, минимальное количество потенциально фиксируемых переходов в событийном графе при заданных таблицах, их размерности и количестве фиксируемых событий определяется как

$$K_{\min} = a \cdot 2^{8 \cdot S}, \quad (4)$$

где a — количество активных переходов, т. е. переходов с максимальными частотами актуализации, а именно количество ячеек в таблице переходов, значения которых выше заданного порога, определяющего высокочастотные переходы (порог определяется в соответствии с особенностями проекта); S — размерность одной ячейки в таблице, байт.

Тогда требуемый объем памяти можно вычислить следующим образом:

$$V = TE^2S, \quad (5)$$

где T — количество предварительно подготовленных таблиц, например таблицы временных ограничений, таблицы корректных и некорректных переходов, таблицы взаимодействия между устройствами; E — количество фиксируемых событий в системе.

На основе формулы (4) можно вывести усредненное время работы системы до полного исчерпания памяти в предварительно созданных таблицах, зная усредненную частоту f возникновения событий в системе:

$$\bar{t} = \frac{K_{\min}}{f} = \frac{a \cdot 2^{8 \cdot S}}{f}.$$

Оценка эффективности метода. Для апробации предлагаемый метод был промоделирован на персональном компьютере. Модели независимых устройств были представлены в виде процессов, запущенных в отдельных потоках с периодической синхронизацией из отдельного потока. Для наглядности были созданы пять потоков с двумя видами типовых устройств, заданы временные ограничения, добавлена периодическая задержка для фиксации невыполнения заданного временного ограничения. Каждое независимое устройство представляет собой два блока: генератор событий, имитирующий некоторое устройство, и наблюдатель, используемый для реализации предлагаемого метода (монитор). Упрощенная схема взаимодействия имитатора устройства и персонального компьютера оператора представлена на рис. 3.

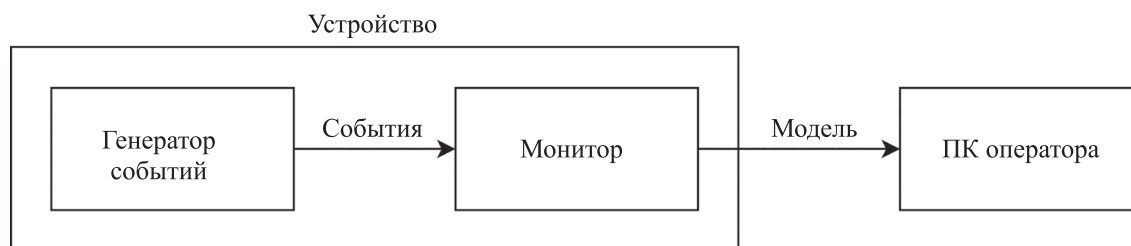


Рис. 3

На рис. 4 представлен результат работы метода — объединенный событийный граф, состоящий из событийных графов потоков, объединенных событиями взаимодействия потоков. События взаимодействия показаны синей линией и для упрощения восприятия объединенного графа соединены попарно между потоками, невыполнение требований по времени между событиями отмечено пунктирной линией.

На основе спецификации проекта разработчик может выделить ряд допустимых и недопустимых переходов между событиями для каждого из устройств. В случае выполнения некорректных переходов легко обнаружить отклонения в поведении системы. Пример событийного графа с некорректными переходами (отмечены красной линией) продемонстрирован на рис. 5; граф получен путем добавления случайных переходов для генератора событий во время работы системы.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет проверить требования к системе, регламентируемые спецификацией [18].

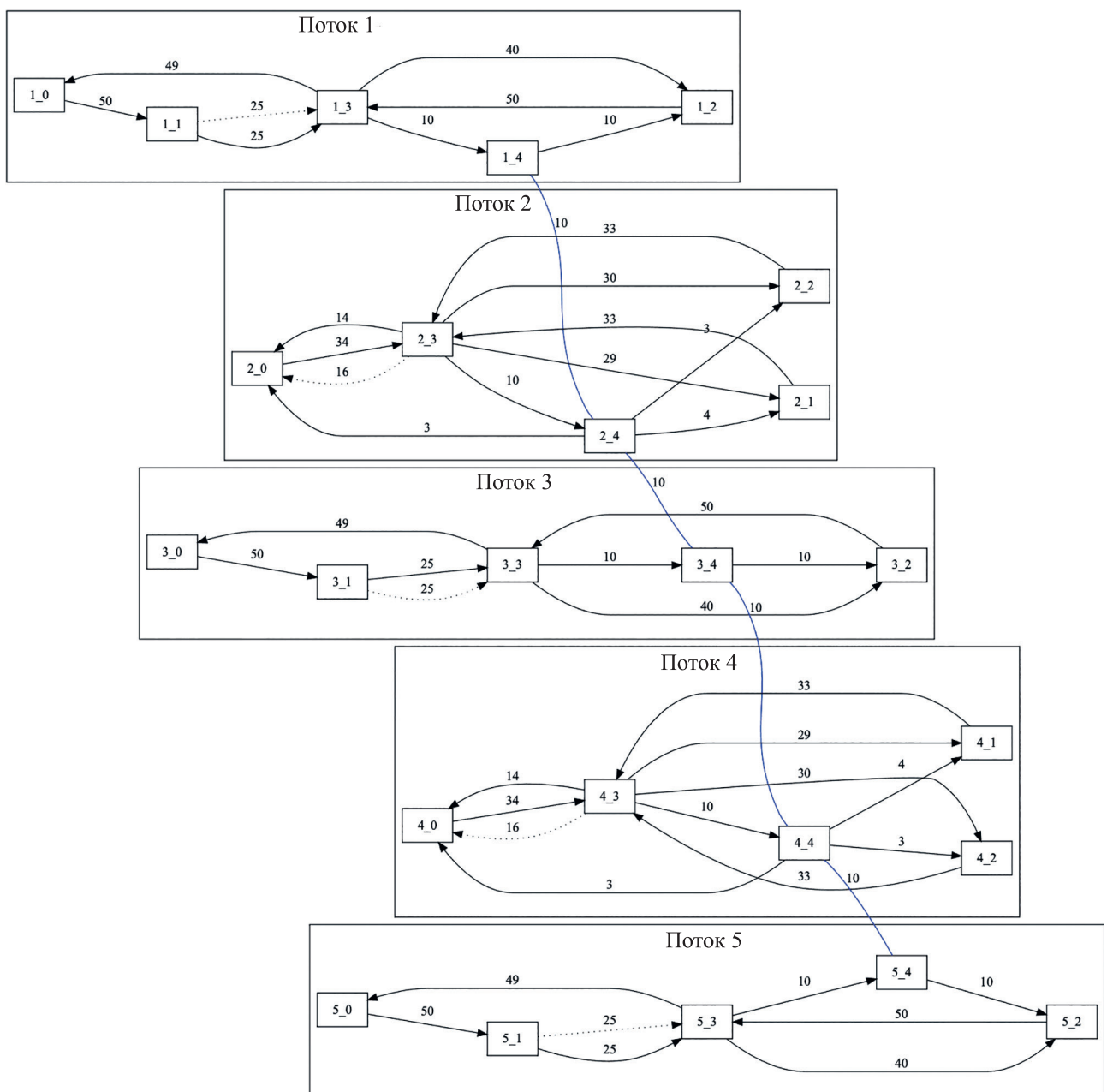


Рис. 4

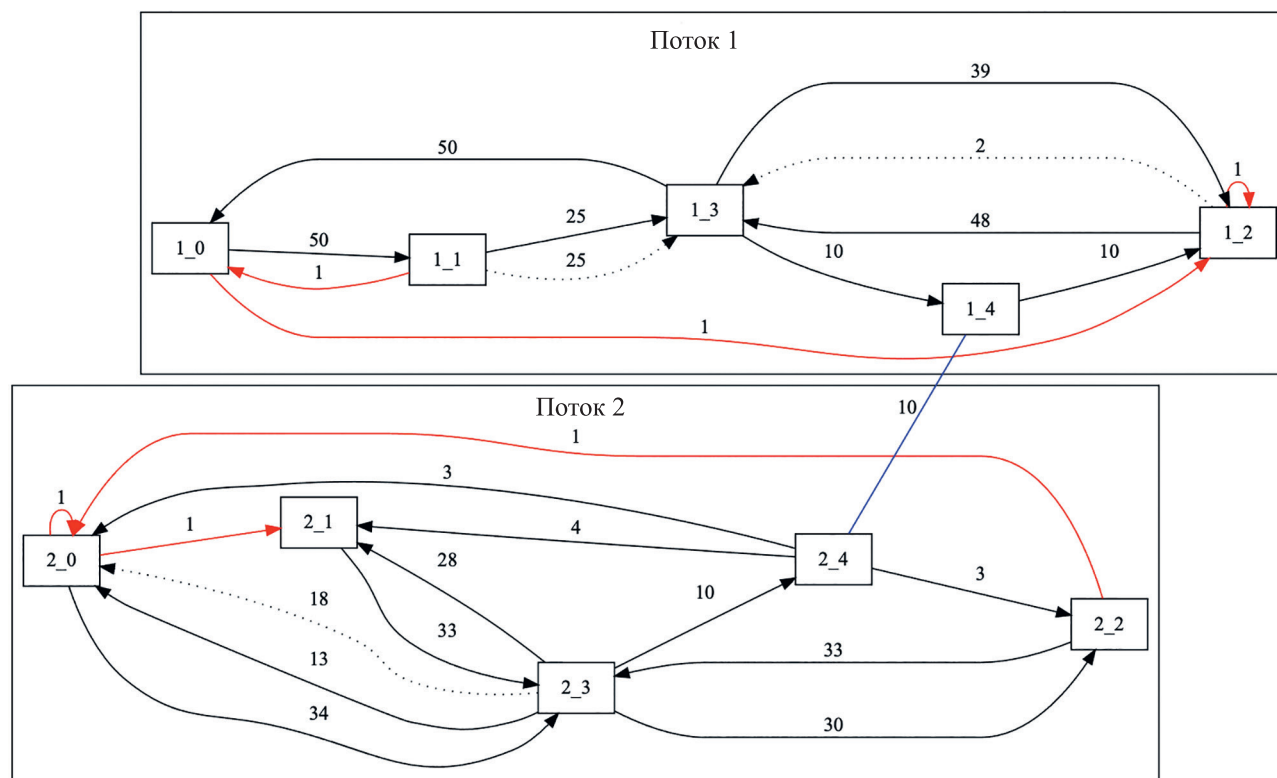


Рис. 5

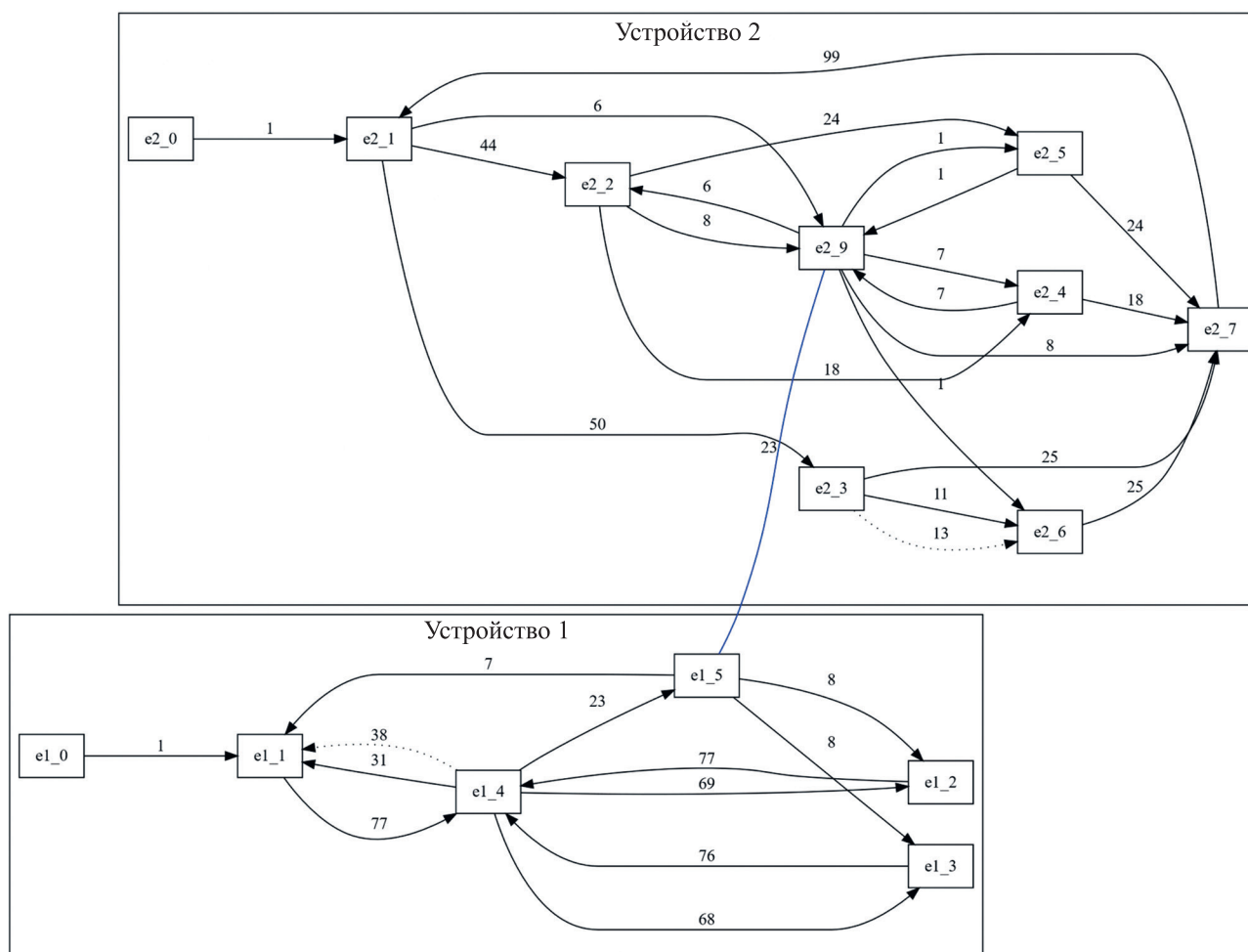


Рис. 6

Апробация метода была проведена также на целевых платформах с использованием библиотеки на языке C, реализующей представленный метод [19]. На рис. 6 продемонстрирован результат апробации для двух взаимодействующих устройств на базе микроконтроллеров STM32F103RB. С некоторой периодичностью устройство 1 отправляет данные на устройство 2, это взаимодействие между устройствами соответствует паре событий e_{1_5} – e_{2_9} . Каждое из устройств по отдельности передает модели процессов на ПК оператора, где впоследствии происходит объединение моделей через события взаимодействия. Необходимый объем памяти для устройств 1 и 2 можно вычислить следующим образом: $V_1 = TE^2S = 3 \cdot 6^2 \cdot 2 = 216$ байт, $V_2 = TE^2S = 3 \cdot 9^2 \cdot 2 = 486$ байт. Каждая табличная ячейка размерностью 2 байта позволяет сохранить до переполнения количество переходов между событиями 2^{16} . При необходимости более длительного времени наблюдения можно увеличить размерность ячейки до 4 байт.

Представленный метод можно использовать для всех типов задач, решаемых встраиваемыми системами, — управления, вычислительных, коммуникационных, комбинированных.

Заключение. Разработан и апробирован метод динамической актуализации модели процессов во встроенных системах для параллельных процессов в виде реализации библиотеки на языке C для программного обеспечения микроконтроллеров.

Преимуществом предлагаемого метода является фиксированное использование памяти микроконтроллера, объем которой разработчик может вычислить на этапе внедрения метода в архитектуру системы за счет отказа от журналирования событий.

Представленный метод позволяет масштабировать область исследования встраиваемой системы, например можно строить модели для отдельных устройств, выделяя в качестве событий системы атомарные операции микроконтроллера или более высокоуровневые операции, а также строить модели для нескольких устройств с необходимой степенью погружения относительно операций и команд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pivoto D. G. S. et al.* Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review // *Journal of manufacturing systems*. 2021. Vol. 58. P. 176–192.
2. *Hamzah M. et al.* Distributed Control of Cyber Physical System on Various Domains: A Critical Review // *Systems*. 2023. Vol. 11, N 4. P. 208.
3. *Pola G., Di Benedetto M. D.* Control of cyber-physical-systems with logic specifications: A formal methods approach // *Annual Reviews in Control*. 2019. Vol. 47. P. 178–192.
4. *Souza J. T. de et al.* Data mining and machine learning in the context of sustainable evaluation: A literature review // *IEEE Latin America Trans.* 2019. N 3. P. 372–382.
5. *Taranto V., G. et al.* Algorithms and software for data mining and machine learning: a critical comparative view from a systematic review of the literature // *The Journal of Supercomputing*. 2021. N 7. P. 11481–11513.
6. *Cheng T. et al.* Spatio-temporal data mining // *Handbook of Regional Science*. 2021. P. 1691–1709.
7. *Vodyaho A. et al.* Model Based Approach to Cyber-Physical systems status Monitoring // *Computers*. 2020. Vol. 9, N 2. P. 47.
8. *Hsieh F. S.* Temporal Analysis of Influence of Resource Failures on Cyber-Physical Systems Based on Discrete Timed Petri Nets // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. N 14. P. 6469.
9. *Chervontsev M. et al.* Use of Dynamic Models in Cognitive Cyber-Physical Systems // *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 33, N 1. P. 14.
10. *Nicoleta T. C.* Process Mining on a Robotic Mechanism // *Intern. Conf. on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW)*. IEEE, 2021. P. 205–212.
11. *Xavier M. et al.* Process mining in industrial control systems // *20th Intern. Conf. on Industrial Informatics (INDIN)*. IEEE, 2022. P. 1–6.
12. *Premchaiswadi W. et al.* Using IoT and Mobile Robots to Model and Analyze Work Processes with Process Mining Techniques // *Progress in Applied Science and Technology*. 2023.
13. *Zakarija I., Škopljanač-Maćina F., Blašković B.* Automated simulation and verification of process models discovered by process mining // *Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*. 2020. Vol. 61, N 2. P. 312–324.

14. Shaky S. A self monitoring and analyzing system for solar power station using IoT and data mining algorithms // *Journal of Soft Computing Paradigm*. 2021. Vol. 3, N 2. P. 96–109.
15. Vitale F. Run-Time Anomaly Detection with Process Mining: Methodology and Railway System Compliance Case-Study: Extended Abstracts of Master's Thesis. Linnaeus Univ., Sweden, 2021.
16. Myers D. et al. Anomaly detection for industrial control systems using process mining // *Computers & Security*. 2018. Vol. 78. P. 103–125.
17. Гончаров А. А., Быковский С. В. Метод восстановления модели процессов во встроенных системах по журналу событий // *Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки*. 2023. № 3. С. 5–17. DOI: 10.21685/2072-3059-2023-3-1.
18. Карпов Ю. Г. *Model checking. Верификация параллельных и распределенных программных систем*. СПб: БХВ-Петербург, 2010.
19. Table_miner [Электронный ресурс]: <https://github.com/GoncharovAleshka/micropm>, 09.03.2024.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Алексей Андреевич Гончаров** — аспирант; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; E-mail: aagoncharov@itmo.ru
- Сергей Вячеславович Быковский** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет программной инженерии и компьютерной техники; E-mail: bsv.serg@gmail.com, sergei_bykovskii@itmo.ru

Поступила в редакцию 21.03.2021; одобрена после рецензирования 31.05.2024; принята к публикации 23.07.2024.

REFERENCES

1. Pivoto D.G.S. et al. *Journal of manufacturing systems*, 2021, vol. 58, pp. 176–192.
2. Hamzah M. et al. *Systems*, 2023, no. 4(11), pp. 208.
3. Pola G., Di Benedetto M.D. *Annual Reviews in Control*, 2019, vol. 47, pp. 178–192.
4. de Souza J.T. et al. *IEEE Latin America Transactions*, 2019, no. 03(17), pp. 372–382.
5. Taranto-Vera G. et al. *The Journal of Supercomputing*, 2021, vol. 77, pp. 11481–11513.
6. Cheng T. et al. *Handbook of regional science*, 2021, pp. 1691–1709.
7. Vodyaho A. et al. *Computers*, 2020, no. 9, pp. 47.
8. Hsieh F.S. *Applied Sciences*, 2021, no. 14(11), pp. 6469.
9. Chervontsev M. et al. *Engineering Proceedings*, 2023, no. 1(33), pp. 14.
10. Nicoleta T.C. *International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW)*, IEEE, 2021, pp. 205–212.
11. Xavier M. et al. *20th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, 2022, pp. 1–6.
12. Premchaiswadi W. et al. *Progress in Applied Science and Technology*, 2023.
13. Zakarija I., Škopljanc-Maćina F., Blašković B. *Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, 2020, no. 2(61), pp. 312–324.
14. Shaky S. *Journal of Soft Computing Paradigm*, 2021, no. 2(3), pp. 96–109.
15. Vitale F. Run-Time Anomaly Detection with Process Mining: Methodology and Railway System Compliance Case-Study, Extended Abstracts of Master's Thesis. Linnaeus Univ., Sweden, 2021.
16. Myers D. et al. *Computers & Security*, 2018, vol. 78, pp. 103–125.
17. Goncharov A.A., Bykovskii S.V. *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*, 2023, no. 3, pp. 5–17, DOI: 10.21685/2072-3059-2023-3-1. (in Russ.)
18. Karpov Yu.G. *Model checking. Verifikatsiya parallel'nykh i raspredelennykh programmnykh sistem (MODEL CHECKING. Verification of Parallel and Distributed Software Systems)*, St. Petersburg, 2010. (in Russ.)
19. Table_miner, <https://github.com/GoncharovAleshka/micropm>

DATA ON AUTHORS

- Alexey A. Goncharov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; E-mail: aagoncharov@itmo.ru
- Sergey V. Bykovsky** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Software Engineering and Computer Systems; E-mail: bsv.serg@gmail.com, sergei_bykovskii@itmo.ru

Received 21.03.2021; approved after reviewing 31.05.2024; accepted for publication 23.07.2024.

**ОПТИМАЛЬНОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ИНТЕРВАЛОВ ГРУППИРОВАННОЙ ВЫБОРКИ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ КРИТЕРИЯ ТИПА χ^2** **П. М. Винник^{1*}, Т. В. Винник², Е. А. Еськова¹**¹ Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова,
Санкт-Петербург, Россия

* vinnik_pm@voenmeh.ru

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Обсуждается применение интервалов равной длины или интервалов равной вероятности для использования критерия типа χ^2 . При этом интервалы равной вероятности предопределяются проверяемым законом распределения. При формировании исходной выборки по данным реального производства она часто сразу является группированной с заранее заданными и неизменяемыми на производстве границами группировки и может не удовлетворять рекомендациям по применению критериев типа χ^2 . Предложен способ построения набора оптимальных интервалов группировки путем объединения некоторых из имеющихся в исходной выборке интервалов. Под оптимальным набором таких интервалов понимается набор интервалов, имеющий наименьшее квадратическое отклонение взвешенных частот попадания от дискретного равномерного распределения, что позволяет не изменять набор интервалов при смене подбираемого закона распределения и автоматически решить проблему выбора оптимального числа интервалов. Перечислены некоторые свойства таких наборов, рассмотрены примеры возникающих при их построении ситуаций, приведен пример формирования оптимального набора.

Ключевые слова: закон распределения, эмпирические данные, критерий типа χ^2 , интервалы группировки, группированные выборки, оптимальность группировки

Ссылка для цитирования: Винник П. М., Винник Т. В., Еськова Е. А. Оптимальное объединение интервалов группированной выборки для применения критерия типа χ^2 // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 751–758. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-751-758.

OPTIMAL AGGREGATION OF CLUSTERED SAMPLE INTERVALS FOR APPLYING THE χ^2 TEST**P. M. Vinnik^{1*}, T. V. Vinnik², E. A. Eskova¹**¹ D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, St. Petersburg, Russia

* vinnik_pm@voenmeh.ru

² St. Petersburg State Institute of Technology, St. Petersburg, Russia

Abstract. The use of intervals of equal length or intervals of equal probability for using the χ^2 -type criterion is discussed. In this case, intervals of equal probability are predetermined by the distribution law being tested. When forming the initial sample based on real production data, it is often immediately grouped with predetermined and unchangeable grouping boundaries in production and may not satisfy the recommendations for applying χ^2 -type criteria. A method is proposed for constructing a set of optimal grouping intervals by combining some of the intervals available in the initial sample. An optimal set of such intervals is understood to be a set of intervals that has the least square deviation of weighted frequencies of hits from a discrete uniform distribution, which makes it possible not to change the set of intervals when changing the selected distribution law and to automatically solve the problem of choosing the optimal number of intervals. Some properties of such sets are listed, examples of situations arising during their construction are considered, and an example of forming such an optimal set is given.

Key words: distribution law, empirical data, χ^2 test, grouping intervals, grouped samples, grouping optimality

For citation: Vinnik P. M., Vinnik T. V., Eskova E. A. Optimal aggregation of clustered sample intervals for applying the χ^2 test. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 9. P. 751–758 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-751-758.

Введение. Одним из возможных путей повышения качества и снижения себестоимости продукции машиностроительных производств является оптимизация методов выборочного контроля характеристик полуфабрикатов и готовых изделий на этапе их изготовления.

На предприятиях широко применяется контроль по количественному признаку¹. Для проверки гипотезы о законе распределения контролируемого количественного признака допускается [1, с. 363] проводить проверку по критериям согласия. Для группированных экспериментальных данных наиболее широко применяемыми являются критерии типа χ^2 [2, 3].

Для корректного применения критерия типа χ^2 исходные данные требуется сгруппировать по интервалам. В литературе предлагаются три основных варианта — интервалы равной длины [4, 5], интервалы равной вероятности [6, 7] и асимптотически оптимальные интервалы [8]. По выбору количества интервалов существуют различные рекомендации; см. ГОСТ Р 50.1-033-2001², а также [4, 5, 7, 9].

Интервалы равной длины, согласно [5], определяются выборкой и не зависят от принятия той или иной гипотезы H_0 . Количество интервалов рекомендуется выбирать так, чтобы число элементов выборки во всех интервалах было взаимно сравнимо и составляло не менее 10 (иногда 5). Недостатки интервалов равной длины заключаются в неоднозначности выбора таких интервалов и том, что с точки зрения мощности критерия равные интервалы проигрывают асимптотически оптимальным [8].

Интервалы равной вероятности, согласно [6, 7], требуют до определения их количества и границ принятия полностью заданного распределения (со всеми параметрами) гипотезы H_0 . Недостатки таких интервалов заключаются в зависимости от гипотезы H_0 , наличии исходной негруппированной выборки [7] и в том, что они тоже проигрывают асимптотически оптимальным.

Асимптотические интервалы [8] обладают преимуществом по мощности критерия, но требуют фиксации класса распределения гипотезы H_0 . Эта зависимость от гипотезы H_0 может считаться недостатком.

Отметим, что зависимость интервалов группировки от гипотезы представляется не вполне обоснованной и неудобной (при смене гипотезы необходимо строить новые интервалы).

Статистические данные, поступающие от предприятий промышленности и сельского хозяйства, во многих случаях предоставляются „как есть“. Иными словами, исследователь не имеет возможности изменить ни порядок извлечения образцов изделий, ни методику проведения их измерений, а также повлиять на точность измерения, тогда как погрешность любого измерительного инструмента предопределяет дискретность измерения любых физически непрерывных величин (например, геометрических и механических характеристик).

Поэтому указанные выборки часто следует полагать группированными с заданными границами интервалов группировки или в лучшем случае частично-группированными по терминологии [10]. Тем не менее возможно дробное перегруппирование исходных интервалов этих выборок (см. [11, ст. „Группировка“] и [12]), но в настоящей статье такие перегруппировки не рассматриваются.

Для группированных выборок с интервалами, границы которых исследователь получает „как есть“, существующие методы подготовки выборки для применения критерия типа χ^2 не являются полностью удовлетворительными.

Цель настоящей статьи — разработка такого способа перегруппировки исходной группированной выборки, который не зависит от выбора гипотезы H_0 и при котором интервалы сформированной группированной выборки наиболее близки к равновероятным интервалам.

Для достижения цели требуется решить две задачи:

¹ ГОСТ Р ИСО 3534-2-2019. Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Ч. 2. Прикладная статистика. М.: Стандартинформ, 2019.

² ГОСТ Р 50.1-033-2001. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Ч. I. Критерии типа χ^2 . М.: Стандартинформ, 2006.

1) определить, какую группированную выборку, построенную из исходной путем неоднократного объединения двух соседних интервалов в один, следует считать наиболее близкой к равновероятной;

2) разработать способ построения такой группированной выборки из исходной.

Выборки, формируемые из исходной группированной, наиболее близкие к равновероятным. Запишем исходную группированную выборку как $[k_1, \dots, k_{j-1}, k_j, k_{j+1}, \dots, k_M]$, где индексы обозначают номер интервала, а числа $k_1, \dots, k_{j-1}, k_j, k_{j+1}, \dots, k_M$ — количество элементов выборки в соответствующем интервале.

Объединяя два неких соседних (например, $(j-1)$ -й и j -й) интервала в один, из исходной выборки получаем выборку $[k_1, \dots, (k_{j-1}, k_j), k_{j+1}, \dots, k_M]$, состоящую из $M-1$ интервалов. Проведя несколько раз такое объединение соседних интервалов в один, получим новую группированную выборку $[(k_1, \dots, k_{i_1}), (k_{i_1+1}, \dots, k_{i_2}), \dots, (k_{i_{L-1}+1}, \dots, k_M)]$, назовем ее разбиением исходной выборки, а число L — количество интервалов сформированной выборки — рангом разбиения. Заметим, что разбиение, имеющее ранг L , однозначно определяется расстановкой $(L-1)$ „стенок“, отделяющих части друг от друга.

О п р е д е л е н и е 1. Пусть $[(k_1, \dots, k_{i_1}), (k_{i_1+1}, \dots, k_{i_2}), \dots, (k_{i_{L-1}+1}, \dots, k_M)]$ — некоторое разбиение выборки, имеющее ранг L . Вычислим суммы элементов частей разбиения: $\Sigma_1 = k_1 + \dots + k_{i_1}, \dots, \Sigma_L = k_{i_{L-1}+1} + \dots + k_M$. Величину N/L , где N — объем исходной группированной выборки, назовем оптимальным содержанием интервала (если N/L — натуральное число, а выборка получилась равновероятной, то в каждом из ее L интервалов будет по N/L элементов). Квадратичным отклонением разбиения назовем величину

$$\Delta L = (\Sigma_1 - N/L)^2 + \dots + (\Sigma_L - N/L)^2.$$

О п р е д е л е н и е 2. Назовем разбиение, имеющее ранг L , наиболее близким к равновероятному, если для него величина ΔL минимальна среди всех разбиений исходной выборки, имеющих ранг L .

Так как для построения разбиения, имеющего ранг L , из исходной выборки необходимо установить $(L-1)$ „стенку“ на неких из $(M-1)$ местах, то количество таких разбиений конечно и равно C_{M-1}^{L-1} . Поэтому минимум ΔL обязательно достигается.

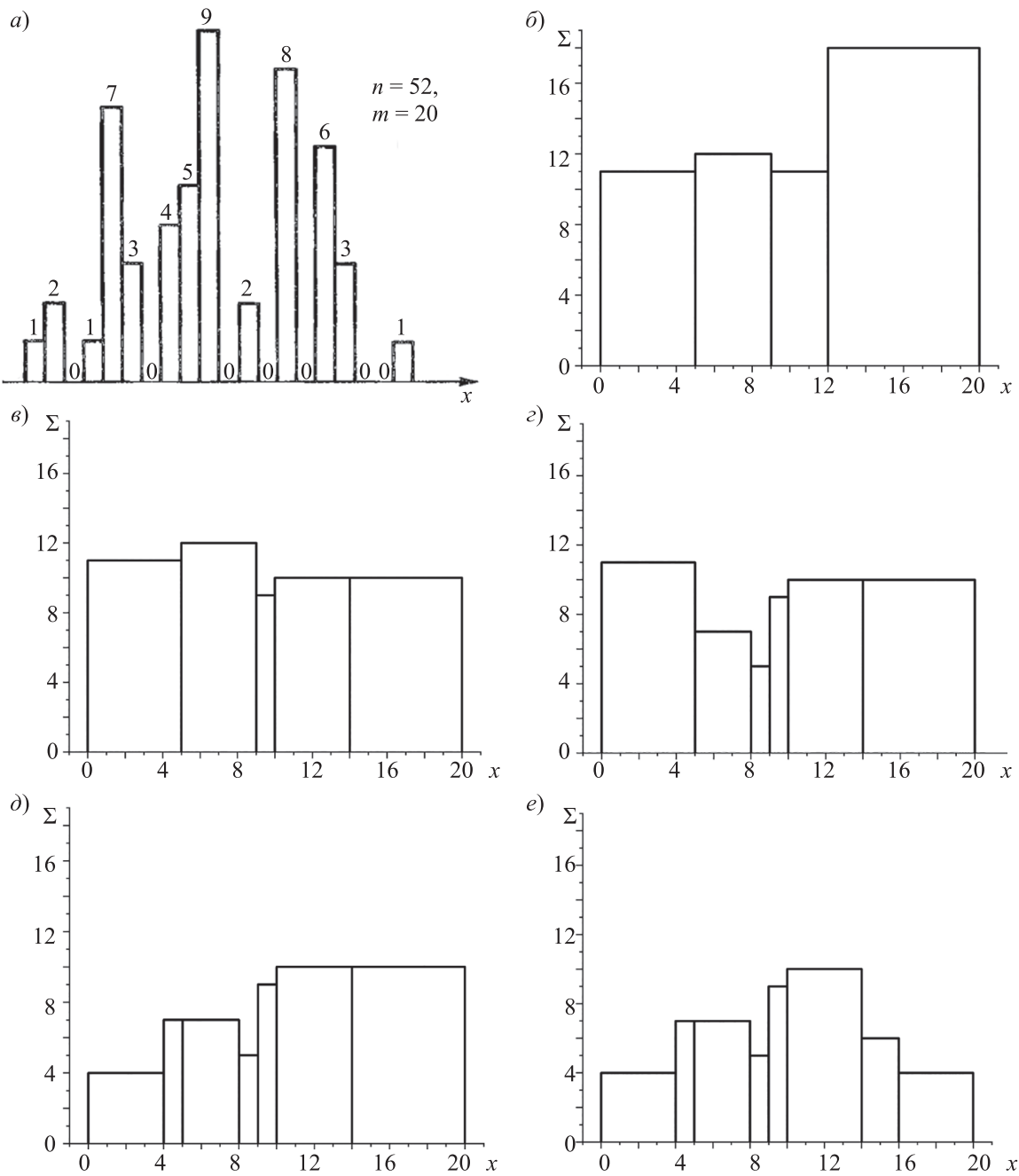
Пусть $M_{\min}$ — число интервалов разбиения, принятое в качестве минимально допустимого. В [4] $M_{\min} = 6$, в [9] $M_{\min} = 4$.

О п р е д е л е н и е 3. Разбиение исходной выборки, имеющей ранг $M_{\min} \leq L < M$, назовем наиболее близким к равновероятному, если для него усредненный ранг $\Delta L/L$ разбиения минимален. Разбиение, наиболее близкое к равновероятному, его ранг и его части, коротко будем называть оптимальными.

Приведем пример построения оптимального разбиения. Рассмотрим исходную выборку, изображенную на рисунке, а, — $[1, 2, 0, 1, 7, 3, 0, 4, 5, 9, 0, 2, 0, 8, 0, 6, 3, 0, 0, 1]$ (это выборка из работы [4, рис. 5.2, а]). Всего в выборке $n = 52$ наблюдения, распределяющихся на $m = 20$ интервалов. Построим ее оптимальные разбиения, имеющие ранги 4–8. Так, при 52 наблюдениях оптимальным содержанием интервала для ранга 4 (см. рисунок, б) является число 13. Непосредственным перебором находим оптимальное разбиение: $[(1, 2, 0, 1, 7), (3, 0, 4, 5), (9, 0, 2), (0, 8, 0, 6, 3, 0, 0, 1)]$. При этом объединенные интервалы содержат $[11, 12, 11, 18]$ наблюдений. Оценим качество разбиения, вычислив квадратическое отклонение от оптимального содержания интервала:

$$\Delta_4 = (11 - 13)^2 + (12 - 13)^2 + (11 - 13)^2 + (18 - 13)^2 = 4 + 1 + 4 + 25 = 35.$$

Разбивая исходную выборку на 4, 5, 6, 7, 8 оптимальных интервалов, получаем результаты, приведенные в таблице и на рисунке, б–е. Таким образом, оптимальным является разбиение, имеющее ранг 5.



Число интервалов, L	Оптимальное разбиение	Оптимальное содержание интервала	Δ_L	Δ_L/L
4	$[(1, 2, 0, 1, 7), (3, 0, 4, 5), (9, 0, 2), (0, 8, 0, 6, 3, 0, 0, 1)]$	13	35	8,75
5	$[(1, 2, 0, 1, 7), (3, 0, 4, 5), (9), (0, 2, 0, 8), (0, 6, 3, 0, 0, 1)]$	10,4	5,2	1,04
6	$[(1, 2, 0, 1, 7), (3, 0, 4), (5), (9), (0, 2, 0, 8), (0, 6, 3, 0, 0, 1)]$	26/3	25,33	4,22
7	$[(1, 2, 0, 1), (7), (3, 0, 4), (5), (9), (0, 2, 0, 8), (0, 6, 3, 0, 0, 1)]$	52/7	33,71	4,82
8	$[(1, 2, 0, 1), (7), (3, 0, 4), (5), (9), (0, 2, 0, 8), (0, 6), (3, 0, 0, 1)]$	6,5	34	4,25

Способ формирования оптимальной выборки. Простейший (но вычислительно затратный) способ построения оптимальной выборки — перебор всех вариантов расстановки „стенок“ для разбиения, имеющего фиксированный ранг; затем выбор оптимального распределения из всех рангов. С ростом числа ненулевых интервалов исходной выборки перебор быстро становится неприемлемым.

Для разработки конструктивного способа построения оптимальной выборки необходимо определить максимально возможное количество свойств оптимальных выборок. Два таких свойства доказываются в утверждениях 1 и 2.

Утверждение 1. Пусть среди чисел $k_1, \dots, k_M$ нет равных нулю. Пусть требуется разделить выборку $k_1, \dots, k_M$ на две части в соотношении $p : q$, где $p > 0, q > 0$ и $p + q = 1$. Обозначим через j номер интервала выборки, такой что $k_1 + \dots + k_j < pN$, а $k_1 + \dots + k_{j+1} \geq pN$.

Тогда наименьшее отклонение разбиения от соотношения $p : q$ будет иметь место либо при разбиении $(k_1, \dots, k_j)$ и $(k_{j+1}, \dots, k_M)$, либо при разбиении $(k_1, \dots, k_{j+1})$ и $(k_{j+2}, \dots, k_M)$.

Доказательство. Заметим, что для первого разбиения выполняются неравенства $k_1 + \dots + k_j < pN$ и $k_{j+1} + \dots + k_M > qN$, поэтому отклонение этого разбиения от соотношения $p : q$ будет следующим:

$$\Delta = (pN - (k_1 + \dots + k_j))^2 + (k_{j+1} + \dots + k_M - qN)^2, \quad (1)$$

где содержимое выражений в обеих скобках положительно.

Рассмотрим произвольное разбиение $(k_1, \dots, k_m)$ и $(k_{m+1}, \dots, k_M)$, где $m < j$. Для него сумма $(k_1 + \dots + k_j)$ в левых скобках выражения (1) заменится на $(k_1 + \dots + k_m)$, т. е. будет состоять из меньшего числа слагаемых, и, в силу их положительности, уменьшится, следовательно, само выражение в левых скобках (1) увеличится. При этом в правых скобках выражения (1) сумма $(k_{j+1} + \dots + k_M)$ заменится на $(k_{m+1} + \dots + k_j + \dots + k_M)$, т. е. будет состоять из большего числа слагаемых, а поэтому увеличится. Следовательно, само выражение в правых скобках (1) увеличится.

Таким образом, отклонение, аналогичное формуле (1), для выборок такого типа будет заведомо больше, чем для выборки с $m = j$.

Заметим, что для второго разбиения будут выполняться неравенства $k_1 + \dots + k_{j+1} \geq pN$ и $k_{j+2} + \dots + k_M \leq qN$, а поэтому отклонение этого разбиения от соотношения $p : q$ будет следующим:

$$\Delta = ((k_1 + \dots + k_{j+1}) - pN)^2 + (qN - (k_{j+2} + \dots + k_M))^2, \quad (2)$$

где содержимое выражений в обеих скобках неотрицательно.

Рассмотрим теперь произвольное разбиение $(k_1, \dots, k_m)$ и $(k_{m+1}, \dots, k_M)$, где $m > j + 1$. Для него сумма $(k_1 + \dots + k_{j+1})$ в левых скобках (2) заменится на $(k_1 + \dots + k_{j+1} + \dots + k_m)$, т. е. будет состоять из большего числа слагаемых, и, в силу их положительности, увеличится, следовательно, само выражение в левых скобках (2) увеличится. При этом в правых скобках (2) сумма $(k_{j+2} + \dots + k_M)$ заменится на $(k_{m+1} + \dots + k_M)$, т. е. будет состоять из меньшего числа слагаемых, а поэтому уменьшится. Следовательно, само выражение в правых скобках (2) увеличится.

Таким образом, отклонение, аналогичное формуле (2), для выборок такого типа будет заведомо больше, чем для выборки с $m = j + 1$. ■

Замечание 1. На примере выборок $[1, 3, 2]$ и $[2, 3, 1]$, которые оптимально разбиваются на две части как $[(1, 3), (2)]$ и $[(2), (3, 1)]$, видно, что оба варианта разбиения, указанные в утверждении 1, могут обеспечивать оптимальное разбиение на две части.

Замечание 2. На примере выборки $[1, 1, 1, 1, 8]$ видно, что второй из вариантов разбиения, указанных в утверждении 1, является вырожденным $[(1, 1, 1, 1, 8)()]$. Для выборки $[8, 1, 1, 1, 1]$ вырожденным будет первый вариант.

Утверждение 2. Пусть для выборки $k_1, \dots, k_M$ разбиение ее на L наиболее равновероятных частей $[(k_1, \dots, k_{m_1}), (k_{m_1+1}, \dots, k_{m_2}), \dots, (k_{m_{L-1}+1}, \dots, k_{m_L})]$ является оптимальным.

Тогда для выборки $[k_{m_i+1}, \dots, k_{m_{i+1}}, \dots, k_{m_{i+1}+1}, \dots, k_{m_{i+2}}]$ образованной двумя соседними частями, ее разбиение $[(k_{m_i+1}, \dots, k_{m_{i+1}}), (k_{m_{i+1}+1}, \dots, k_{m_{i+2}})]$ на две равновероятные части является оптимальным.

Доказательство. Пусть $W = N/L$ — „среднее содержание“ каждой из L частей исходной выборки. Наличие в оптимальном разбиении соседних частей $(k_{m_i+1}, \dots, k_{m_{i+1}}), (k_{m_{i+1}+1}, \dots, k_{m_{i+2}})$ означает, что сумма квадратов

$$(k_{m_{i+1}+1}, \dots, k_{m_{i+1}} - W)^2 + (k_{m_{i+1}+1}, \dots, k_{m_{i+2}} - W)^2 \quad (3)$$

является минимальной из возможных. В другом случае можно было бы, не изменяя остальные части разбиения исходной выборки, „подвинуть стенку“ между данными частями влево или вправо и уменьшить вклад этих двух частей в квадратическое отклонение, а следовательно, и общее квадратическое отклонение разбиения исходной выборки, что противоречило бы его оптимальности.

Временно введем обозначения:

$$x = k_{m_i+1} + \dots + k_{m_{i+1}}, Q = k_{m_i+1} + \dots + k_{m_{i+1}} + k_{m_{i+1}+1} + \dots + k_{m_{i+2}}.$$

Тогда $k_{m_{i+1}+1} + \dots + k_{m_{i+2}} = Q - x$. С учетом введенных обозначений сумму (3) можно переписать в виде $(x - W)^2 + (Q - x - W)^2 = F$. Для поиска минимального значения F на отрезке $x \in [0; Q]$ найдем производную и приравняем ее к нулю: $2(x - W) + 2(Q - x - W)(-1) = 0$ откуда точка минимума $x = Q/2$. Заметим, что точка минимума не зависит от „среднего содержания“ W каждой части. Так как значения переменной x изменяются дискретно, то искомое наименьшее значение будет достигаться при ближайшем к $x = Q/2$ значении переменной x из ряда $0, k_{m_i+1}, k_{m_i+1} + k_{m_{i+2}}, \dots, k_{m_i+1} + \dots + k_{m_{i+1}} + k_{m_{i+1}+1} + \dots, k_{m_{i+2}} = Q$.

При переходе от исходной выборки к выборке $[k_{m_i+1}, \dots, k_{m_{i+1}}, k_{m_{i+1}+1}, \dots, k_{m_{i+2}}]$ „среднее содержание“ части будет равным $W_0 = Q/2$. Однако, как установлено выше, точка минимума не зависит от „среднего содержания“ части, поэтому минимальное значение будет достигнуто в той же точке, т. е. разбиение $[(k_{m_i+1}, \dots, k_{m_{i+1}}), (k_{m_{i+1}+1}, \dots, k_{m_{i+2}})]$ останется оптимальным. ■

Следует отметить, что при переходе от оптимального разбиения к разбиению, имеющему больший ранг, может происходить дробление сразу нескольких интервалов. Например, при переходе от разбиения выборки $[2, 0, 1, 2, 4, 1, 2, 5, 6, 2, 3, 4, 2, 1, 8, 0, 2, 1, 1, 1, 0, 2]$ на 5 оптимальных интервалов $[(2, 0, 1, 2, 4, 1, 2), (5, 6), (2, 3, 4), (2, 1, 8), (0, 2, 1, 1, 1, 0, 2)]$ к разбиению на 6 оптимальных интервалов $[(2, 0, 1, 2, 4), (1, 2, 5), (6, 2), (3, 4, 2), (1, 8), (0, 2, 1, 1, 1, 0, 2)]$ дробятся все объединенные интервалы, кроме последнего.

Для разбиения исходной выборки на части, вероятности которых наиболее приближены к числам $p_1, p_2, \dots, p_L$, где $p_1 + p_2 + \dots + p_L = 1$, можно привести пример, что при переходе к подвыборке „стенка“ может быть смещена. Действительно, деля выборку $[27, 6, 30, 30, 147]$ на три части в соотношении $p_1 = 1/6, p_2 = 1/3, p_3 = 1/2$, находим оптимальное разбиение $[(27), (6, 30, 30), (147)]$, а при переходе к подвыборке $[27, 6, 30, 30]$ при ее делении на две части, вероятности $\tilde{p}_1 = 1/3, \tilde{p}_2 = 2/3$ которых пропорциональны исходным вероятностям $p_1 = 1/6, p_2 = 1/3$, получаем оптимальное разбиение $[(27, 6), (30, 30)]$.

На основании утверждения 1 представляется очевидным следующее решение задачи: накопление суммы элементов группированной выборки; для любого $j = 1, \dots, L - 1$ установление двух предполагаемых „стенок“ в точках $i(j)$ и $i(j) + 1$, таких что сумма $k_1 + \dots + k_{i(j)} < jN/L$, а $k_1 + \dots + k_{i(j)+1} < jN/L$; затем проверка всех вариантов расстановки „стенок“ с выбором по одной „стенке“ из каждой пары. Однако на примере выборки $[1, 1, 1, 1, 8]$ видно, что оптимальное разбиение ее на три части будет таким: $[(1, 1), (1, 1), (8)]$, тогда как предполагаемые „стенки“ $[1, 1, 1, 1, \|8\|]$ будут расположены по две с обеих сторон от 8. Перебор вариантов расстановки таких „стенок“ не позволит получить оптимальное разбиение.

Таким образом, разработка способа построения оптимальной выборки без перебора всех вариантов далека от завершения.

Математические аналоги задачи построения оптимальной выборки. В теории чисел существует направление задач, связанных с разбиением натурального числа в сумму натуральных чисел (см., например, [13]). Задача разбиения выборки на оптимальные интервалы дает некоторое разбиение натурального числа M , равного объему исходной выборки, в сумму натуральных чисел $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_L$ — объемов объединенных интервалов:

$$\Sigma_1 + \Sigma_2 + \dots + \Sigma_L = M.$$

В дискретной математике известна задача разбиения набора натуральных чисел (в том числе повторяющихся) на несколько подмножеств, имеющих как можно более близкие суммы [14]. В таких задачах качество разбиения определяется максимумом разности сумм подмножеств. Отличие задачи оптимального разбиения выборки от такой задачи заключается в том, что при построении оптимального разбиения нельзя переставлять части (интервалы).

В [15] доказывается предпочтительность метода равных частот относительно метода равных интервалов при использовании функции максимального правдоподобия, что тесно связано с рассматриваемой в настоящей статье задачей.

Заключение. Определено, какую группированную выборку, построенную из исходной группированной выборки путем неоднократного объединения двух соседних интервалов в один, следует считать наиболее близкой к равновероятной. Показано, что наиболее близкую к равновероятной выборку можно построить посредством перебора конечного числа вариантов, однако способ построения такой выборки без полного перебора не найден. Установлен ряд свойств выборок, что должно способствовать разработке такого способа в дальнейшем.

Использование полученных результатов позволяет из исходной группированной выборки, не удовлетворяющей рекомендациям по применению критерия типа χ^2 , сформировать удовлетворяющую рекомендациям группированную выборку, границы интервалов которой не зависят от принятия той или иной гипотезы H_0 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миттаг Х.-Й., Ринне Х. Статистические методы обеспечения качества. М.: Машиностроение, 1995. 616 с.
2. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
3. Лемешко Б. Ю., Постовалов С. Н. Статистический анализ одномерных наблюдений по частично группированным данным // Изв. вузов. Физика. 1995. № 9. С. 39–45.
4. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений Л.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
5. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 664 с.
6. Mann H. B., Wald A. On the choice of the number of class intervals in the application of the chi square test // Ann. Math. Stat. 1942. Vol. 13. P. 306–317.
7. Williams C. A. Jr. On the Choice of the Number and Width of Classes for the Chi-Square Test of Goodness of Fit // Journal of the American Statistical Association. 1950. Vol. 45, N 249. P. 77–86.
8. Лемешко Б. Ю., Постовалов С. Н. О зависимости предельных распределений статистик хи-квадрат Пирсона и отношения правдоподобия от способа группирования данных // Заводская лаборатория. 1998. Т. 64, № 5. С. 56–63.
9. Лемешко Б. Ю., Чимитова Е. В. О выборе числа интервалов в критериях согласия типа χ^2 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. С. 61–67.
10. Кулдорф Г. Введение в теорию оценивания по группированным и частично группированным выборкам. М.: Наука, 1966. 176 с.
11. Энциклопедия статистических терминов. Т. 1. Методологические основы статистики. М.: Федеральная служба государственной статистики, 2011 [Электронный ресурс]: [https://03.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/05_tom1\(1\).pdf](https://03.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/05_tom1(1).pdf), 18.03.2024.
12. Винник П. М., Винник Т. В., Еськова Е. А. Математические задачи, возникающие при статистическом контроле технологических процессов машиностроительных производств // Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. 2022. № 4. С. 24–30. DOI: 10.26163/RAEN.2022.32.23.003.

13. Эндрюс Г. Теория разбиений. М.: Наука, 1982. 256 с.
14. Korf R. Multi-way number partitioning // IJCAI'09: Proc. of the 21st Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Pasadena, California, USA, July 11–17, 2009. P. 538–543.
15. Бардасов С. А. Предпочтительность метода равных частот относительно метода равных интервалов при построении вариационных рядов // Вестн. Тюменск. гос. ун-та. 2003. № 5. С. 217–219.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Петр Михайлович Винник** — д-р техн. наук, доцент; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра высшей математики; заведующий кафедрой; E-mail: vinnik_pm@voenmeh.ru
- Татьяна Викторовна Винник** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), кафедра математики; доцент; E-mail: vinnik.tv92@gmail.com
- Екатерина Александровна Еськова** — Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра высшей математики; ассистент; E-mail: eskova_ea@voenmeh.ru

Поступила в редакцию 29.03.2024; одобрена после рецензирования 12.05.2024; принята к публикации 23.07.2024.

REFERENCES

1. Mittag H.-J., Rinne H. *Statistische Methoden der Qualitätssicherung*, Munchen, Wien, 1993.
2. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* (Applied Mathematical Statistics. For Engineers and Scientists), Moscow, 2006, 816 p. (in Russ.)
3. Lemeshko B.Yu., Postovalov S.N. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 1995, no. 9, pp. 39–45. (in Russ.)
4. Novitskiy P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy* (Evaluation of Errors in Measurement Results), Leningrad, 1991, 304 p. (in Russ.)
5. Hald A. *Statistical Theory with Engineering Applications*, NY, Wiley, 1952, 783 p.
6. Mann H.B., Wald A. *Ann. Math. Stat.*, 1942, vol. 13, pp. 306–317.
7. Williams C.A., jr., *Journal of the American Statistical Association*, 1950, no. 249(45), pp. 77–86.
8. Lemeshko B.Yu., Postovalov S.N. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 1998, no. 5(64), pp. 56–63. (in Russ.)
9. Lemeshko B.Yu., Chimitova E.V. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2003, vol. 69, pp. 61–67. (in Russ.)
10. Kulldorff G. *Contributions to the theory of estimation from grouped and partially grouped samples*, NY, John Wiley, 1963, 144 p.
11. [https://03.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/05_tom1\(1\).pdf](https://03.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/05_tom1(1).pdf).
12. Vinnik P.M., Vinnik T.V., Eskova E.A. *Bulletin of Education and Development of Science of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2022, no. 4, pp. 24–30, DOI: 10.26163/RAEN.2022.32.23.003. (in Russ.)
13. Andrews G.E. *The theory of partitions*, Addison-Wesley Pub. Co., 1976, 255 p.
14. Korf R. IJCAI'09, *Proceedings of the 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence Pasadena, California, USA*, July 11–17, 2009, pp. 538–543.
15. Bardasov S.A. *Bulletin of Tyumen State University*, 2003, no. 5, pp. 217–219. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Petr M. Vinnik** — Dr. Sci., Associate Professor; D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, Department of Higher Mathematics; Head of the Department; E-mail: vinnik_pm@voenmeh.ru
- Tatyana V. Vinnik** — PhD; St. Petersburg State Institute of Technology, Department of Mathematics; Associate Professor; E-mail: vinnik.tv92@gmail.com
- Ekaterina A. Eskova** — D. F. Ustinov Baltic State Technical University VOENMEH, Department of Higher Mathematics; Assistant; E-mail: eskova_ea@voenmeh.ru

Received 29.03.2024; approved after reviewing 12.05.2024; accepted for publication 23.07.2024.

**АНАЛИЗ СКОРОСТИ АЛГОРИТМА СЛУЧАЙНОГО ДОСТУПА
С РАЗНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ СЛОТОВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА АЛОХА****И. А. Пастушок*, А. М. Тюрликов***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия,*** pastushokirina22@mail.ru*

Аннотация. Для многоабонентных систем рассматривается способ организации случайного множественного доступа к общему каналу связи, использующий алгоритмы разрешения конфликтов, построенные на основе алгоритма АЛОХА. В таких системах время в общем канале разделено на слоты, равные длительности времени передачи сообщения, и абоненты случайным образом выбирают слот для передачи. В некоторых системах слоты имеют разную длительность, что при определенных условиях позволит повысить скорость алгоритма. Для определения этих условий рассмотрены варианты влияния длительности слотов на скорость алгоритма. Показано, что скорость алгоритмов, построенных на основе алгоритма АЛОХА, возможно увеличить, если относительная длительность пустого слота отлична от единицы. Предложен алгоритм, обеспечивающий при выполнении этого условия максимальную скорость. Сформулирована и решена оптимизационная задача по выбору оптимального значения параметра, при котором скорость предложенного алгоритма максимальна. Аналогичное решение показано и для случая, когда относительная длительность пустого слота намного больше единицы.

Ключевые слова: сотовые сети, алгоритм АЛОХА, случайный множественный доступ, телекоммуникационные сети, системы радиочастотной идентификации

Благодарность: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-19-00305: „Пространственно-временные стохастические модели беспроводных сетей с большим числом абонентов“.

Ссылка для цитирования: Пастушок И. А., Тюрликов А. М. Анализ скорости алгоритма случайного доступа с разной длительностью слотов на основе алгоритма АЛОХА // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 759–766. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-759-766.

SPEED ANALYSIS OF ALOHA-BASED RANDOM-ACCESS ALGORITHM WITH VARIOUS SLOT DURATION**I. A. Pastushok*, A. M. Turlikov***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia*** pastushokirina22@mail.ru*

Abstract: For multi-user systems of random multiple access to a common communication channel, built on the basis of the ALOHA algorithm, a method for organizing conflict resolution algorithms is considered. In such systems, the time in the common channel is divided into slots equal to the duration of the message transmission time, and subscribers randomly select a slot for transmission. In some systems, the slots have different durations, which under certain conditions can increase the speed of the algorithm. To determine these conditions, options for the influence of the slot duration on the speed of the algorithm are considered. It is shown that the speed of algorithms built on the basis of the ALOHA algorithm can be increased if the relative duration of the empty slot is different from one. An algorithm is proposed that provides the maximum speed when this condition is met. An optimization problem is formulated and solved for choosing the optimal value of the parameter at which the speed of the proposed algorithm is maximum. Similar results are demonstrated for the case when the relative duration of the empty slot is much greater than one.

Keywords: cellular networks, ALOHA algorithm, random multiple access, telecommunication networks, Radio Frequency Identification (RFID) systems

Acknowledgements: the work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-19-00305: “Space-time stochastic models of wireless networks with a large number of subscribers”.

For citation: Pastushok I. A., Turlikov A. M. Speed analysis of ALOHA-based random-access algorithm with various slot duration. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 9. P. 759–766 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-759-766.

Введение. В современных сотовых сетях для подключения абонента к базовой станции используются алгоритмы случайного множественного доступа (СМД) [1–4]. Такие алгоритмы могут использоваться также в компьютерных системах для их восстановления после возникновения различного рода ошибок [5–8]. Большинство алгоритмов СМД базируются на алгоритме АЛОХА. Основная идея алгоритма АЛОХА и его модификаций заключается в том, что абонент принимает решение о передаче сообщения некоторым случайным образом. В работе [9] предлагается рассматривать системы с потенциально неограниченным числом абонентов. Каждый абонент имеет единственное сообщение для передачи, и время передачи сообщения по каналу принимается за единицу времени. Процесс появления абонентов в системе описывается пуассоновским потоком с интенсивностью λ . Абонент, передав сообщение, покидает систему. В [9] доказывается, что для любого алгоритма существует такое значение R , называемое в [9] скоростью алгоритма, что при любом $\lambda < R$ система работает устойчиво, т. е. абоненты не накапливаются в системе, иначе с течением времени число абонентов неограниченно возрастает. (Следует отметить, что в англоязычных работах для определения скорости алгоритма используется термин „throughput“ — пропускная способность).

В работе [10] предложена в некотором смысле оптимальная стратегия выбора способа решения о передаче. Множество абонентов разделено на два подмножества: $\{A\}$ — активные, $\{B\}$ — неактивные. Активные абоненты — это те, кто имеет готовое для передачи сообщение в текущий момент времени. Принимается допущение, что всем абонентам системы известна мощность множества $\{A\}$, но какие именно абоненты входят в данное множество, неизвестно. С учетом этого допущения предлагается следующий алгоритм передачи: всем активным абонентам передавать сообщения с вероятностью $p = 1/|A|$, где $|A|$ — мощность множества активных абонентов. В работе [10] фактически формулируются и доказываются два взаимосвязанных утверждения. Первое утверждение: скорость алгоритма АЛОХА и его модификаций, которая характеризует эффективность использования общего канала, равна $R = e^{-1}$ и не существует других алгоритмов, которые имеют большую скорость. Второе утверждение: при любой интенсивности входного потока λ , не превышающей e^{-1} , алгоритм обеспечивает наименьшую среднюю задержку по сравнению с любым алгоритмом, построенным на основе алгоритма АЛОХА. Различные модификации алгоритма отличаются способом принятия решения о передаче сообщения.

Однако используемое в [10] допущение, что всем абонентам известно число активных абонентов, для большинства реальных систем несправедливо. В работах [11, 12] предложен подход, обобщающий алгоритм из [10] для случая, когда число активных абонентов неизвестно. Такой подход отражает основные особенности алгоритмов случайного множественного доступа и в настоящее время имеется большое число исследований различных вариантов реализаций этого подхода с учетом специфики современных систем передачи данных [13–16].

Как для алгоритма АЛОХА, так и для его адаптивной версии вследствие случайного характера передачи в канале могут произойти три события: „пусто“, „успех“ и „конфликт“. В [10] и в других работах предполагается, что время, затрачиваемое каналом на обработку всех трех событий, одинаково. Следует отметить, что во многих современных системах передачи данных это время может существенно различаться, однако число исследований по влиянию этого фактора на эффективность работы различных модификаций алгоритма АЛОХА достаточно мало. Только частично этот вопрос обсуждается при анализе систем радиочастотной идентификации [17, 18] и при описании характеристик стандарта IEEE 802.11 [19].

Цель настоящей статьи — показать, как результаты современных исследований, и в частности работ [10–12], посвященных адаптивному алгоритму АЛОХА, могут быть обобщены для случая, когда модель системы учитывает, что время, затрачиваемое каналом на обработку всех трех событий, разное. Также представлен способ вычисления скорости алгоритма в зависимости от параметров модели.

Модель системы и модификация базового алгоритма. Рассмотрим систему с потенциально неограниченным числом абонентов и одной базовой станцией. Интервалы между появле-

ниями абонентов в системе распределены по экспоненциальному закону со средним значением $1/\lambda$. Примем следующие допущения.

Допущение 1. В системе время в канале связи разделено на слоты.

Допущение 2. В течение слота может произойти одно из трех событий (ситуаций): „успех“ — один абонент передал одно сообщение, „пусто“ — никто из абонентов не передавал пакет, „конфликт“ — несколько абонентов приняли решение передавать сообщение в текущем слоте.

Допущение 3. Слоты с разными ситуациями имеют разную длительность: T_k — длительность слота с ситуацией „конфликт“, T_y — длительность слота с ситуацией „успех“, T_Π — длительность слота с ситуацией „пусто“.

Допущение 4. К концу слота абоненты достоверно узнают о событии, которое произошло в канале.

Допущение 5. В начале каждого слота известно количество активных абонентов.

С учетом введенных допущений опишем алгоритм работы абонентов. Обозначим через M_t число активных абонентов к началу слота с номером t . Каждый абонент с вероятностью $p_t = \min(1, G/M_t)$, где G — параметр алгоритма, характеризующий вероятность выбора способа передачи, независимо от других абонентов принимает решение, передавать сообщение в слоте с номером t или нет. Если такое решение принял один абонент, то в слоте происходит ситуация „успех“. Это означает, что его сообщение успешно доставлено до базовой станции и этот абонент покидает систему.

Текущая модель системы отличается от описанной в [10] тем, что в этой работе все слоты имеют равную длительность, а $G = 1$.

Выведем формулу для расчета скорости алгоритма с учетом новых параметров. Последовательность случайных величин M_t является марковской цепью со счетным числом состояний, и задача определения скорости алгоритма сводится к задаче определения условия эргодичности данной марковской цепи. В результате решения этой задачи выражение для скорости алгоритма имеет следующий вид:

$$R(T_y, T_\Pi, T_k, G) = \frac{Ge^{-G}}{Ge^{-G}T_y + e^{-G}T_\Pi + (1 - Ge^{-G} - e^{-G})T_k}. \quad (1)$$

При фиксированных значениях T_y, T_Π, T_k функция $R(T_y, T_\Pi, T_k, G)$ является унимодальной. Таким образом, для определения оптимального значения $G_{\text{опт}}$, при котором скорость алгоритма максимальна, следует взять производную данной функции по G и приравнять ее к нулю. В результате вычислений получим

$$e^{-2G}(T_\Pi - T_k) + T_k e^{-G}(1 - G_{\text{опт}}) = 0. \quad (2)$$

Заметим, что решение уравнения (2) зависит только от отношения длительности слота „пусто“ к длительности слота „конфликт“: T_Π/T_k . Используя функцию Ламберта, получим решение уравнения (2) в следующем виде:

$$G_{\text{опт}}(\alpha) = 1 + W(e^{-1}(\alpha - 1)), \quad (3)$$

где $\alpha = T_\Pi/T_k$, $W(\cdot)$ — функция Ламберта.

Зависимость $G_{\text{опт}}(\alpha)$ показана на рис. 1: с увеличением параметра α увеличивается значение $G_{\text{опт}}$.

Далее будем исследовать диапазон отношения T_Π/T_k : $0,01 \leq \alpha \leq 100$, именно такой диапазон значений используется в современных системах.

Значение $G_{\text{опт}}(\alpha)$ не зависит от длительности слотов, а зависит только от их соотношения, тогда как само значение скорости R зависит от длительности слотов. Для исследования влияния длительности слотов на скорость алгоритма примем, что $T_y = 1$, а сумма $T_k + T_\Pi$ равна некоему абсолютному значению β . Теперь исследуем влияние величин α и β на скорость алгоритма R .

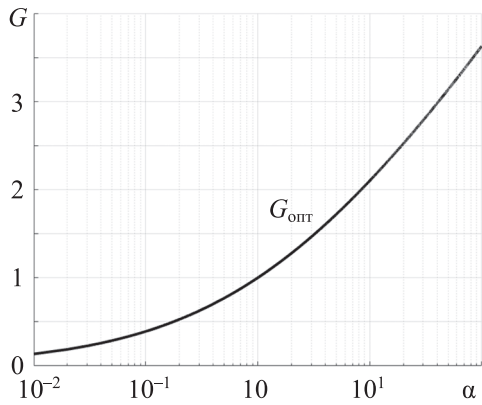


Рис. 1

Примем $\beta = 2$, так как при этом значении и $\alpha = 1$ все слоты имеют одинаковую длительность, равную единице, что соответствует модели из работы [10]. Также рассмотрим случай, когда $\beta = 1$ и $\alpha \ll 1$, отражающий основные особенности модели из работы [18].

Исследуем выигрыш системы. Под выигрышем будем понимать отношение скорости алгоритма R при использовании оптимального значения $G_{\text{опт}}(\alpha)$ к скорости алгоритма при использовании параметра $G = 1$ согласно [10]. Выигрыш вычисляется по следующей формуле:

$$\eta(\alpha, \beta) = \frac{R\left(1, \frac{\alpha\beta}{\alpha+1}, \frac{\beta}{\alpha+1}, G_{\text{опт}}(\alpha)\right)}{R\left(1, \frac{\alpha\beta}{\alpha+1}, \frac{\beta}{\alpha+1}, 1\right)}. \quad (4)$$

На рис. 2 представлены зависимости выигрыша η по скорости R от α при $\beta = 2$ и $\beta = 1$. Можно сделать вывод, что наибольший выигрыш достигается как при малых, так и при больших значениях α . Также заметим, что при $\beta = 1$ наибольший выигрыш достигается, когда величина α существенно отличается от единицы, тогда как при $\beta = 2$ выигрыш в 50 % достигается значительно раньше.

Асимптотика скорости алгоритма. Результаты, приведенные на рис. 2, показывают, что при изменении α и β в диапазонах $0,01 \leq \alpha \leq 100$ и $1 \leq \beta \leq 2$ выигрыш при использовании параметра $G_{\text{опт}}(\alpha)$ зависит от α и β . Для определения наибольшего выигрыша в скорости алгоритма исследуем асимптотику выражения (1) при стремлении параметра α к нулю и бесконечности. Рассмотрим асимптотику, которая показывает максимальную скорость алгоритма. Для этого сначала воспользуемся асимптотикой функции Ламберта при аргументе, стремящемся к $-e^{-1}$, подставив полученное выражение (3), имеем

$$G_{\text{опт}}(\alpha)|_{\alpha \rightarrow 0} = \sqrt{2\alpha}. \quad (5)$$

Используя выражение (5), вычислим предел скорости алгоритма R при $\alpha \rightarrow 0$:

$$\begin{aligned} \lim_{\alpha \rightarrow 0} R\left(1, \frac{\alpha\beta}{\alpha+1}, \frac{\beta}{\alpha+1}, G_{\text{опт}}(\alpha)\right) &= \\ &= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\sqrt{2\alpha} \cdot e^{-\sqrt{2\alpha}}}{\sqrt{2\alpha} \cdot e^{-\sqrt{2\alpha}} + e^{-\sqrt{2\alpha}} \frac{\alpha\beta}{\alpha+1} + \frac{\beta}{\alpha+1} \left(1 - \sqrt{2\alpha} \cdot e^{-\sqrt{2\alpha}} - e^{-\sqrt{2\alpha}}\right) T_k} = 1. \end{aligned} \quad (6)$$

Далее исследуем скорость алгоритма R при $\alpha \rightarrow \infty$. Также воспользуемся сначала асимптотикой функции Ламберта при аргументе, который стремится к бесконечности, и получим результат

$$G_{\text{опт}}(\alpha)|_{\alpha \rightarrow \infty} = 1 + \ln(e^{-1}(\alpha - 1)) - \ln(\ln(e^{-1}(\alpha - 1))), \quad (7)$$

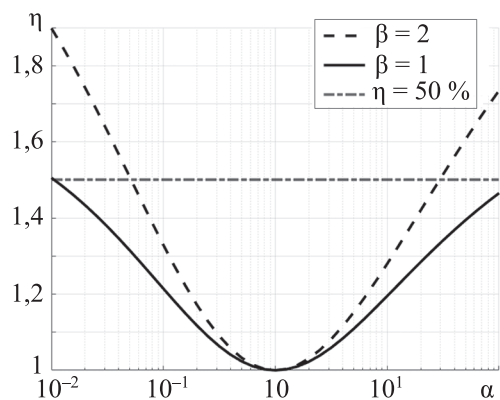


Рис. 2

на основе которого вычислим предел скорости алгоритма R при $\alpha \rightarrow \infty$:

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} R\left(1, \frac{\alpha\beta}{\alpha+1}, \frac{\beta}{\alpha+1}, G_{\text{опт}}(\alpha)\right) = \frac{\alpha e^{-1}}{\alpha e^{-1} + e^{-(1+\ln(e^{-1}(\alpha-1))-\ln(\ln(e^{-1}(\alpha-1))))} \frac{\alpha\beta}{\alpha+1} + \frac{\beta}{\alpha+1} (1 - \alpha e^{-1} + e^{-(1+\ln(e^{-1}(\alpha-1))-\ln(\ln(e^{-1}(\alpha-1))))})} = 1. \quad (8)$$

Из выражений (6) и (8) следует, что максимальная скорость в асимптотике равна единице и не зависит от суммы длительностей слотов „пусто“ и „конфликт“. Это наглядно демонстрирует график зависимости скорости алгоритма от параметра α , приведенный на рис. 3. Также заметим, что в точке, где $\alpha = 1$, максимальная скорость R достигается при $G_{\text{опт}}(\alpha) = 1$, что и было показано в работе [10].

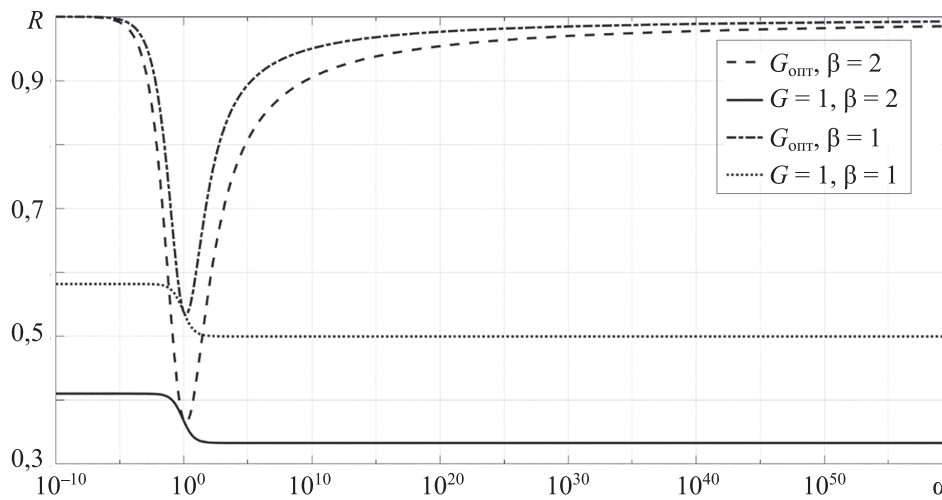


Рис. 3

Исследование средней задержки системы. Отметим следующий факт: даже для частного случая алгоритма, рассматриваемого в работе, когда все слоты имеют одинаковую длительность и параметр $G = 1$, на сегодняшний день неизвестно явное выражение зависимости средней задержки $\bar{D}$ от интенсивности входного потока, и эта зависимость может быть получена только численно или с помощью имитационного моделирования. С учетом отмеченного факта, а также допущения 3 исследуем с помощью имитационного моделирования зависимость средней задержки $\bar{D}$ от интенсивности λ , параметра алгоритма G , длительности слотов $T_{\text{п}}$, $T_{\text{к}}$ и при фиксированном значении $T_{\text{у}} = 1$ (единицу времени будем оценивать как некую относительную величину).

Ограничимся рассмотрением одного примера, когда $T_{\text{п}} = 0,1$, $T_{\text{к}} = 1$, $T_{\text{у}} = 1$. В этом случае $\alpha = 0,1$ и согласно формуле (3) $G_{\text{опт}}(\alpha) = 0,4$. Скорость алгоритма R при $G = G_{\text{опт}}$ достигает максимального значения, равного 0,676. Выберем два значения λ , меньшие, чем скорость алгоритма, и построим при этих значениях зависимость средней задержки системы от параметра G . Зависимость $\bar{D}(G)$ при $\lambda = 0,2$ и $\lambda = 0,4$ показана на рис. 4, а, б, соответственно.

Как следует из приведенных зависимостей, значение параметра $G = G_{\text{опт}}(\alpha)$, максимизирующее скорость алгоритма, не минимизирует среднюю задержку. При этом значение G , которое обеспечивает минимальную задержку, зависит от входной интенсивности λ . В рассматриваемом примере минимальная задержка при $\lambda = 0,2$ обеспечивается при $G = 1$, а при $\lambda = 0,4$ параметр $G = 0,6$. Для иллюстрации этого примера на рис. 5 приведена зависимость $\bar{D}(\lambda)$ при значениях параметра G , равных 0,4, 0,6 и 1.

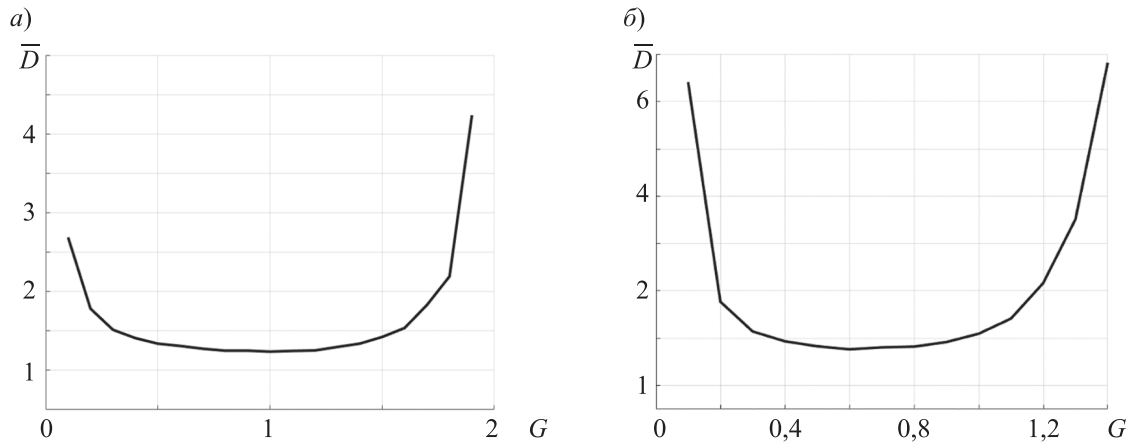


Рис. 4

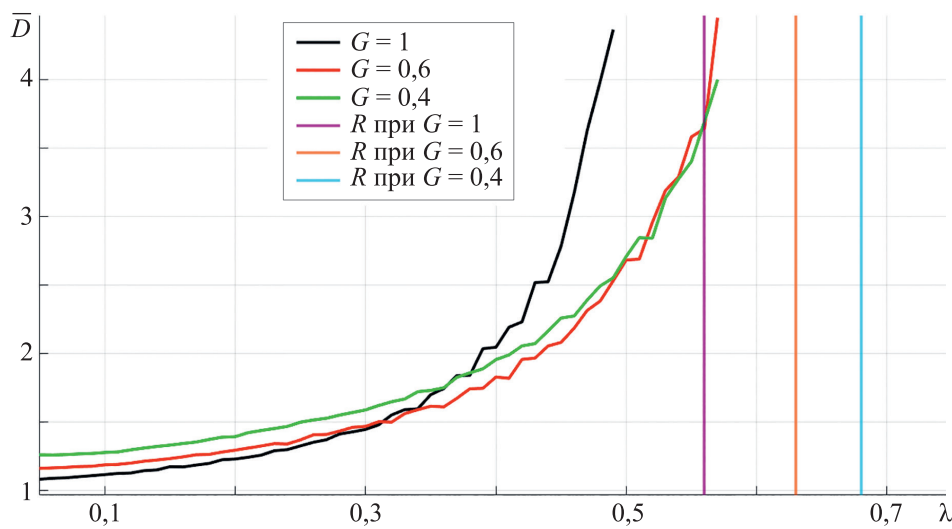


Рис. 5

Можно высказать две гипотезы, которые заключаются в следующем.

Первая гипотеза: при $\alpha = T_{\text{п}}/T_{\text{к}} < 1$ значения параметра G , которые минимизируют задержку, уменьшаются с ростом интенсивности входного потока λ ; если $\lambda \rightarrow 0$, то $G \rightarrow 1$, если $\lambda \rightarrow R(1, T_{\text{п}}, T_{\text{к}}, G_{\text{опт}}(\alpha))$, то $G \rightarrow G_{\text{опт}}(\alpha) < 1$.

Вторая гипотеза: при $\alpha = T_{\text{п}}/T_{\text{к}} > 1$ значения параметра G , минимизирующие задержку, увеличиваются с ростом интенсивности входного потока λ ; если $\lambda \rightarrow 0$, то $G \rightarrow 1$, если $\lambda \rightarrow R(1, T_{\text{п}}, T_{\text{к}}, G_{\text{опт}}(\alpha))$, то $G \rightarrow G_{\text{опт}}(\alpha) > 1$.

Обобщая положения работы [10] для случая, когда слоты имеют разную длительность, но $\alpha = T_{\text{п}}/T_{\text{к}} = 1$, можно доказать, что значение параметра G , которое минимизирует задержку, не зависит от входной интенсивности λ и при любом $\lambda < R(1, T_{\text{п}}, T_{\text{к}}, 1)$ $G = 1$.

Заключение. Рассмотрена система случайного множественного доступа, отличительная особенность которой заключается в том, что слоты, характеризующиеся событиями „конфликт“, „пусто“ и „успех“, имеют разную длительность. Описан алгоритм случайного множественного доступа, построенный на базе алгоритма АЛОХА. Основная идея алгоритма состоит в том, что вероятность передачи сообщения зависит от относительной длительности пустого слота. Показано, что если относительная длительность пустого слота намного меньше единицы, то скорость алгоритма будет близка к единице при любых абсолютных значениях длительности слотов „пусто“ и „конфликт“. Аналогичное решение показано и для случая, когда относительная длительность пустого слота намного больше единицы.

Высказаны гипотезы о взаимосвязи значения параметра алгоритма, которое минимизирует задержку, и фиксированной интенсивности входного потока. Доказательство этих гипотез может рассматриваться как направление дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yu Y., Giannakis G. High-throughput random access using successive interface cancellation in a tree algorithm // IEEE Trans. on Information Theory, 2007. N 12. P. 4628–4639.
2. Бурков А. А. Сравнение способов снижения затрат энергии в стабильных системах массовой межмашинной связи // Информационно-управляющие системы. 2023. Вып. 2. С. 39–50.
3. Jeon S.-W. Online estimation and adaptation for random access with successive interference cancellation // IEEE Trans. on Mobile Computing. 2022. Vol. 22. P. 5418–5433.
4. Цыбаков Б. С., Файнгольд В. Б. Блокированный стек-алгоритм СМД в сети с конечным числом станций // Проблемы передачи информации. 1992. Т. 28, № 1. С. 89–96.
5. Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Bogatyrev A. V. Model and interaction efficiency of computer nodes based on transfer reservation at multipath routing // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication. 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/weconf/2019.8840647.
6. Богатырев В. А. Надежность и эффективность резервированных компьютерных сетей // Информационные технологии. 2006. № 9. С. 25–30.
7. Богатырев В. А. Оценка надежности и оптимальное резервирование кластерных компьютерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 10. С. 18–21.
8. Богатырев В. А., Богатырев А. В. Надежность функционирования кластерных систем реального времени с фрагментацией и резервированным обслуживанием запросов // Информационные технологии. 2016. Т. 22, № 6. С. 409–416.
9. Цыбаков Б. С., Михайлов В. А., Лиханов Н. Б. Границы для скорости передачи пакетов в системе СМД // Проблемы передачи информации. 1983. Т. 19, вып. 1. С. 61–81.
10. Фалин Г. И. Оценка эффективности одного класса алгоритмов случайного множественного доступа в радиоканал // Проблемы передачи информации. 1982. Т. 18, вып. 3. С. 85–90.
11. 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.
12. Rivest R. Network control by Bayesian broadcast // IEEE Trans. on Information Theory. 1987. Vol. 33, N 3. P. 323–328.
13. Wu Y. Massive access for future wireless communication systems // IEEE Wireless Communications. 2020. Vol. 27, N 4. P. 148–156.
14. Alhashimi H. F. A Survey on Resource Management for 6G Heterogeneous Networks: Current Research, Future Trends, and Challenges // Electronics. 2023. Vol. 12, N 3. P. 647.
15. Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M. Analyzing and stabilizing multichannel ALOHA with the use of the preamble-based exploration phase // Информационно-управляющие системы. 2022. Т. 5. С. 49–59.
16. Burkov A., Shneer S., Turlikov A. An achievability bound of energy per bit for stabilized massive random access Gaussian channel // IEEE Communications Letters. 2020. Vol. 25, N 1. P. 299–302.
17. Salah H., Hazem A. A., Joerg R., Heuberger A. A Time and Capture Probability Aware Closed Form Frame Slotted ALOHA Frame Length Optimization // IEEE Communications Letters. 2015. Vol. 19. N11. P. 2009–2015.
18. Salah H., Gaydadjiev G. Toward Optimal RFID Frame Lengths // IEEE Journal of Radio Frequency Identification. 2023. P. 83–90.
19. Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2000. Vol. 18, N 3. P. 535–547.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Ирина Анатольевна Пастушок** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационной безопасности; E-mail: pastushokirina22@mail.ru
- Андрей Михайлович Тюрликов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи; заведующий кафедрой; E-mail: turlikov@k36.org

Поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена после рецензирования 09.04.2024; принята к публикации 23.07.2024.

REFERENCES

1. Yu Y., Giannakis G. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, no. 12(53), pp. 4628–4639.
2. Burkov A.A. *Information and Control Systems*, 2023, no. 2, pp. 39–50. (in Russ.)
3. Jeon S.-W. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2022, vol. 22, pp. 5418–5433.
4. Tsybakov B.S., Faingol'd V.B. *Problems of Information Transmission*, 1992, no. 1(28), pp. 79–86.
5. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication*, 2019, art. no. 8840647.
6. Bogatyrev V.A. *Information Technologies*, 2006, no. 9, pp. 25–30. (in Russ.)
7. Bogatyrev V.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2006, no. 10, pp. 18–21. (in Russ.)
8. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. *Information Technologies*, 2016, no. 6(22), pp. 409–416. (in Russ.)
9. Tsybakov B.S., Mikhailov V.A., Likhanov N.B. *Problems of Information Transmission*, 1983, no. 1(19), pp. 50–68.
10. Falin G.I. *Problemy Peredachi Informatsii*, 1982, no. 3(18), pp. 85–90. (in Russ.)
11. Mikhailov V.A. *Problems of Information Transmission*, 1988, no. 1(24), pp. 47–56.
12. Rivest R. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1987, no. 3(33), pp. 323–328.
13. Wu Y. *IEEE Wireless Communications*, 2020, no. 4(27), pp. 148–156.
14. Alhashimi H.F. *Electronics*, 2023, no. 3(12), pp. 647.
15. Burkov A.A., Rachugin R.O., Turlikov A.M. *Information and Control Systems*, 2022, no. 5, pp. 49–59, <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2022-5-49-59>.
16. Burkov A., Shneer S., Turlikov A. *IEEE Communications Letters*, 2020, no. 1(25), pp. 299–302.
17. Salah H., Hazem A.A., Joerg R., Heuberger A. *IEEE Communications Letters*, 2015, no. 11(19), pp. 2009–2015.
18. Salah H., Gaydadjiev G. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2023, pp. 83–90.
19. Bianchi G. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, no. 3(18), pp. 535–547.

DATA ON AUTHORS

- Irina A. Pastushok** — Student; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Information Security; E-mail: pastushokirina22@mail.ru
- Andrey M. Turlikov** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems; Head of the Department; E-mail: turlikov@guap.ru

Received 03.04.2024; approved after reviewing 09.04.2024; accepted for publication 23.07.2024.

**РАСПОЗНАВАНИЕ РУКОПИСНОГО ТЕКСТА ИСТОРИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ****А. М. Унтерберг*, А. В. Пятаева, С. С. Замыслова, Е. Д. Рукосуева, К. В. Богданов***Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия*** unterberg2012@gmail.com*

Аннотация. Рассматривается задача распознавания рукописного текста на дореформенном русском языке с применением технологий глубоких нейронных сетей. В качестве исходных данных использованы отсканированные JPG-снимки исторических документов, в частности XIX века, содержащие различные шумы и помехи, что затрудняет работу алгоритма распознавания. Распознавание текста выполнено в три этапа: устранение шумов, сегментация (выделение) строк текста на изображении, так как входными данными для работы глубокой нейронной сети являются именно строки, и затем распознавание текста выделенных строк с помощью дообученной модели Tesseract OCR, осуществляющей электронный перевод изображений рукописного или печатного текста в текстовые данные. В качестве модели использована сверточно-рекуррентная нейронная сеть; модель представляет собой комбинацию сверточной нейронной сети для извлечения локальных признаков из изображения и рекуррентной нейронной сети, представленной двумя слоями двунаправленных сетей LSTM для обработки последовательности. Использование именно такой модели позволяет достоверно распознавать рукописный текст.

Ключевые слова: *нейронные сети, обработка естественного языка, исторические документы, глубокое обучение, библиотека Tesseract OCR*

Ссылка для цитирования: *Унтерберг А. М., Пятаева А. В., Замыслова С. С., Рукосуева Е. Д., Богданов К. В. Распознавание рукописного текста исторических документов с применением технологий глубоких нейронных сетей // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 767–775. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-767-775.*

**HANDWRITTEN TEXT RECOGNITION OF HISTORICAL DOCUMENTS
USING DEEP NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES****A. M. Unterberg*, A. V. Pyataeva, S. S. Zamyslova, E. D. Rukosueva, K. V. Bogdanov***Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*** unterberg2012@gmail.com*

Abstract. The application of deep neural network technologies to the problem of handwriting recognition in pre-reform Russian is considered. The initial data used are scanned JPG images of historical documents from the 19th century, in particular containing various noises and interference, which complicates the work of the recognition algorithm. Text recognition is performed in three stages: noise removal, segmentation (highlighting) of text lines in the image, since the input data for the deep neural network are precisely the lines, and then recognition of the text of the highlighted lines using the pre-trained Tesseract OCR model, which performs electronic translation of images of handwritten or printed text into text data. The model used is a convolutional recurrent neural network; the model is a combination of a convolutional neural network for extracting local features from an image and a recurrent neural network represented by two layers of bidirectional LSTM networks for processing the sequence. Using this model allows for reliable recognition of handwritten text.

Keywords: *neural networks, natural language processing, historical documents, deep learning, Tesseract — OCR Library*

For citation: *Unterberg A. M., Pyataeva A. V., Zamyslova S. S., Rukosueva E. D., Bogdanov K. V. Handwritten text recognition of historical documents using deep neural network technologies. Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67, N 9. P. 767–775 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-767-775.*

Введение. Сохранение для потомков информации о различных исторических событиях является важной задачей не только для ученых-историков, но и для человечества в целом. Бумага и чернила, которые использовались при написании исторических документов, разрушаются со

временем, и хронология событий тех лет может быть навсегда утеряна. Преобразование таких документов из бумажного вида в цифровой формат позволит избежать утраты информации о важных исторических фактах.

Выполнение перевода текста с физического носителя на цифровой — процесс, требующий значительных человеческих затрат. Отсканированные исторические документы могут содержать различные артефакты, шумы либо информацию, тяжело воспринимаемую современным читателем; например, в книге „Акты, собранные в библиотеках и архивах Российской империи. Том I“, где собраны документы конца XIX века, встречается и рукописный текст на дореформенном русском языке, и машинописный текст; в отсканированных письмах Петра I встречается текст, написанный трудночитаемым почерком, а также текст с частично выцветшими чернилами. Автоматизация процесса распознавания текста, а затем и преобразование его в вид, аналогичный оригинальному, позволит решить задачу сохранения информации.

В настоящей статье эта задача решается на примере текста отчетов губернаторов Енисейской губернии XVIII–XX веков. Эти документы ценны для изучения истории региона и для понимания политических, экономических, социальных и культурных процессов, происходивших здесь в определенный период времени. Отчеты состоят в основном из текстовых сообщений и таблиц. Ранние отчеты — рукописные, а более поздние содержат машинописный текст. Особую трудность при распознавании документов представляет рукописный текст, так как требуется настройка алгоритма на распознавание особенностей почерка в представленных текстах.

Литературный обзор. Задача распознавания рукописных текстов исторических документов может быть решена различными способами. Современное решение заключается в применении технологий глубокого обучения для обработки текста, написанного на естественном языке. Так, в работе [1] исследуется сложность обработки текста, размещенного на разных частях страницы и имеющего различные направления чтения, представлена новая нейронная модель, которая может быть эффективно использована для локализации текста, его транскрипции и распознавания символов в документах. Сравнение рекуррентной (RNN) и сверточной (CNN) нейронных сетей для задачи распознавания рукописного текста выполнено в работе [2], показано, что CNN-модель имеет преимущество по скорости. В [3] представлена прогрессивная методика обучения для распознавания рукописного текста, имеющая ограниченные ресурсы. Авторы исследуют проблему ограниченного объема доступных обучающих данных и предлагают метод, который может эффективно обучаться при малом количестве данных. В [4] выполнены исследования построчного распознавания текста, описываются особенности, возможности и преимущества нереккуррентных моделей. Стратегия аугментации данных под названием “CycleAugment” для распознавания рукописного текста в изображениях исторических документов представлена в [5]. Методика “CycleAugment” основана на циклической генерации различных вариантов аугментированных изображений с помощью преобразований, таких как поворот, масштабирование, сдвиг и изменение контрастности. В [6] представлен новый подход к улучшению автономного распознавания рукописного текста исторических документов при наличии ограниченного числа размеченных строк; описывается методика, основанная на комбинировании двух подходов: “Transfer Learning” и “Active Learning”, и по результатам исследований показана эффективность методики. В работе [7] представлены результаты исследования, в ходе которого авторы использовали большой набор данных, состоящий из цифровых изображений исторических книг, созданных с помощью различных технологий печати. На основе этого набора с применением методов обучения, в частности CNN, были созданы модели, которые могут быть использованы для автоматической классификации технологий печати исторических книг на основе цифровых изображений, что способствует сохранению и изучению культурного наследия. Рассматриваемые в [8] различные методы и подходы, используемые для извлечения текста из изображений, включают как классические методы, например шаблонное сопоставление, статистические модели и правила, так и современные методы на основе глубокого обучения — RNN и CNN. Также в работе освещаются некоторые проблемы,

связанные с технологией OCR (Optical Character Recognition — оптическое распознавание символов), такие как неточность распознавания нестандартных символов и шум на изображениях, предлагаются некоторые пути решения этих проблем: например, применение ансамблей моделей, комбинирование классических и глубоких методов, использование контекстуальной информации для повышения точности распознавания. В [9] представлен обзор основанных на глубоком обучении методов и подходов, используемых для анализа и распознавания исторических документов. Методы включают в себя различные архитектуры нейронных сетей, такие как CNN, RNN, сети долгой краткосрочной памяти (LSTM). Также приведены рекомендации по подготовке и созданию наборов данных для использования в исследованиях. В работе [10] описывается метод повышения точности программы для распознавания текста на изображениях — OCR-движка Tesseract 4.0 — с использованием предварительной обработки на основе свертки. В [11] представлены результаты исследования, показывающие эффективность применения различных архитектур нейронных сетей — CNN, RNN и CRNN — для распознавания текста на изображениях.

Таким образом, глубокие нейронные сети являются современным и наиболее эффективным способом распознавания рукописных текстов исторических документов.

Распознавание текста отчетов. Исходные изображения исследуемых отчетов получены с использованием ресурсов библиотеки Президента РФ. Эти изображения представляют собой отсканированный разворот страниц или одну страницу оригинального документа. Пример изображения из отчета показан на рис. 1.

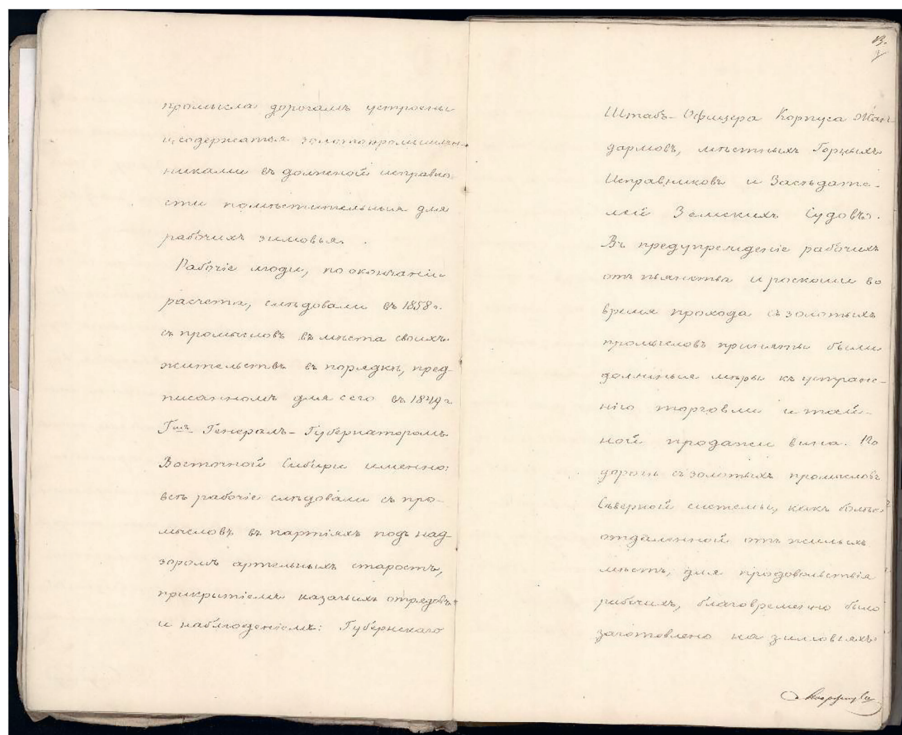


Рис. 1

Снимки документов, как уже упоминалось, могут содержать различные шумы: артефакты сканирования (по краям листа и от переплета по центру фотографии); следы от вмятин бумаги; помехи, связанные с тем, что в качестве письменного инструмента использовалось гусиное перо и капли чернил попадали на бумагу. Такие шумы могут значительно снижать качество алгоритма распознавания текста, поэтому их необходимо устранить. Таким образом, обработка изображений для распознавания текста включает в себя удаление шумов, выделение строк и применение глубоких нейронных сетей. Схема преобразования отчетов в цифровой вид, включающая перечисленные этапы, показана на рис. 2.

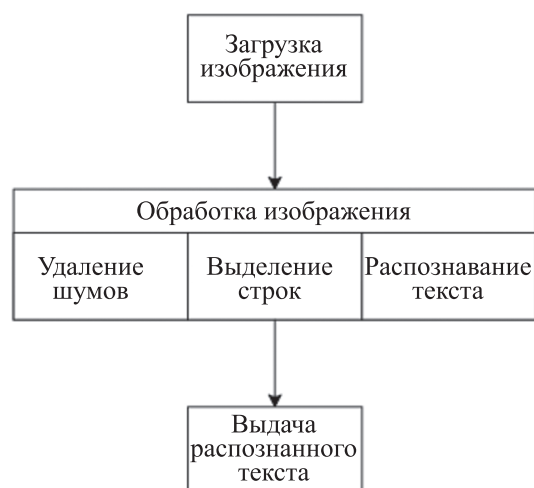


Рис. 2

Этап выделения строк текста на изображении необходим, так как входными данными для работы глубокой нейронной сети являются именно строки. Для того чтобы оставить только строки текста, необходимо „убрать“ с изображения все лишние элементы, что можно сделать с помощью полей серого цвета по краям изображения. Создание полей необходимо для отделения символов текста от различных шумов. Для выделения строк разработан алгоритм преобразования исходного изображения, содержащий следующие шаги (рис. 3).

Шаг 1. Исходное RGB-изображение (см. рис. 1) преобразуется в grayscale (оттенки серого)-

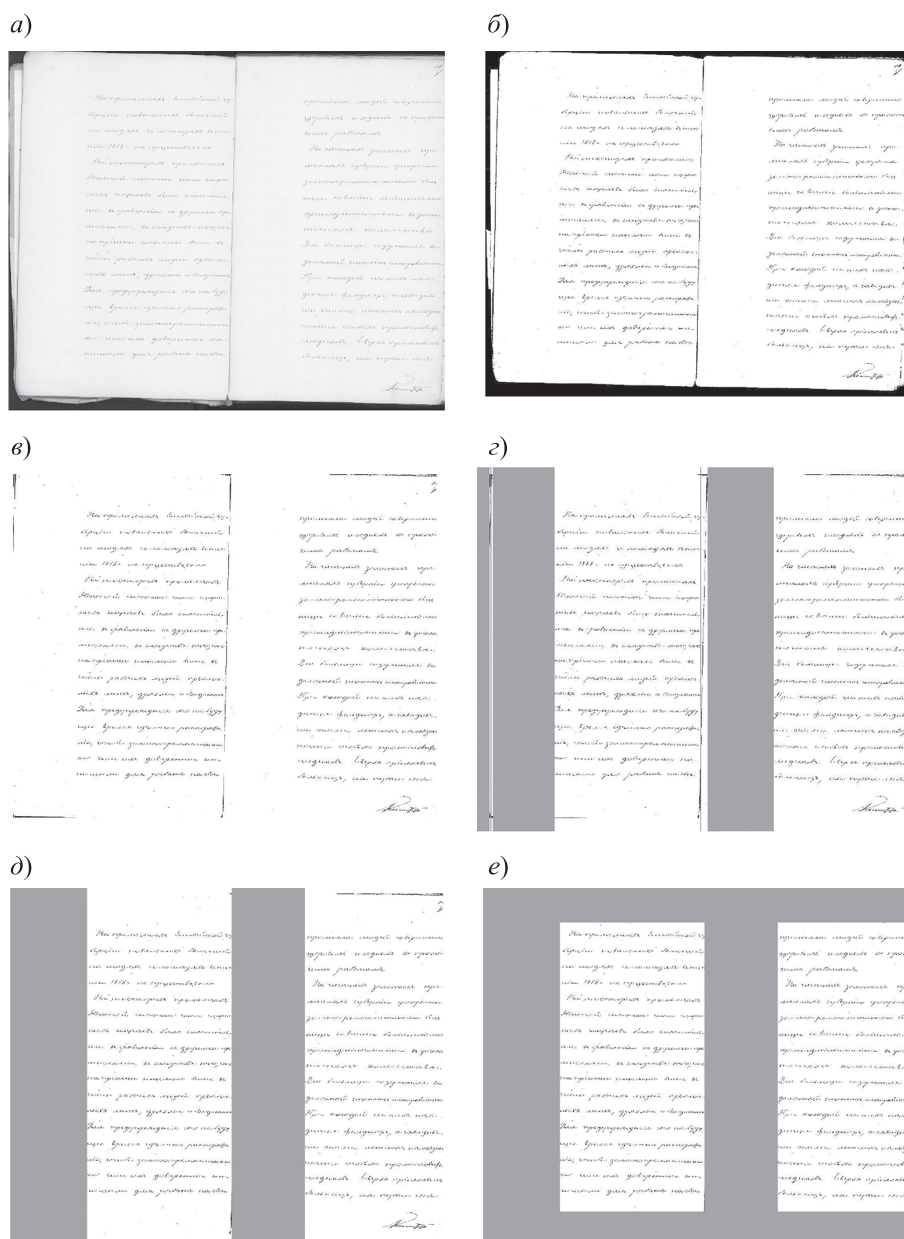


Рис. 3

изображение (рис. 3, а). Преобразование осуществляется с помощью функции библиотеки OpenCV — `cv.cvtColor(image, cv.COLOR_BGR2GRAY)`.

Шаг 2. Grayscale-изображение преобразуется в бинарное изображение (рис. 3, б). Преобразование осуществляется с помощью функции библиотеки OpenCV — `cv.threshold(image, 187, 255, cv.THRESH_BINARY)`.

Шаг 3. Черные поля закрашиваются в белый (рис. 3, в). Для осуществления данного этапа необходимо найти все горизонтальные и вертикальные столбцы пикселей на изображении, которые полностью состоят из черных пикселей, после чего найденные столбцы необходимо перекрасить в белый путем присвоения пикселям нового значения, равного 255.

Шаг 4. Все белые вертикальные столбцы закрашиваются в серый (рис. 3, г).

Шаг 5. Закрашиваются промежутки между серыми столбцами (рис. 3, д); пп. 4 и 5 выполняются для отделения частей изображения, не относящихся к тексту, от частей изображения, содержащих текст.

Шаг 6. Крайние верхние и нижние горизонтальные столбцы изображения, не относящиеся к тексту (количество белых пикселей превышает количество черных), закрашиваются в серый (рис. 3, е).

Шаг 7. Части изображения, не серые, делятся на отдельные строки (рис. 4). С помощью вложенных циклов обрабатываются все пиксели изображения: внешний цикл проверяет строки пикселей сверху вниз, а внутренний цикл — пиксели в каждой строке слева направо. Определяются начальные и конечные координаты строк.

Шаг 8. Создается список из начальных и конечных координат полученных строк, необходимый для обрезания исходного изображения по координатам.

Шаг 9. Строки делятся на отдельные изображения, сохраняются в папке `images line` и передаются для распознавания. Деление строк осуществляется с помощью команды `image[y1:y2, x1:x2]`, где `y1` и `x1` — начальные координаты строки, а `y2` и `x2` — конечные.

Шаг 10. Выделенные строки сохраняются в отдельные изображения для загрузки каждого из них в Tesseract-OCR.

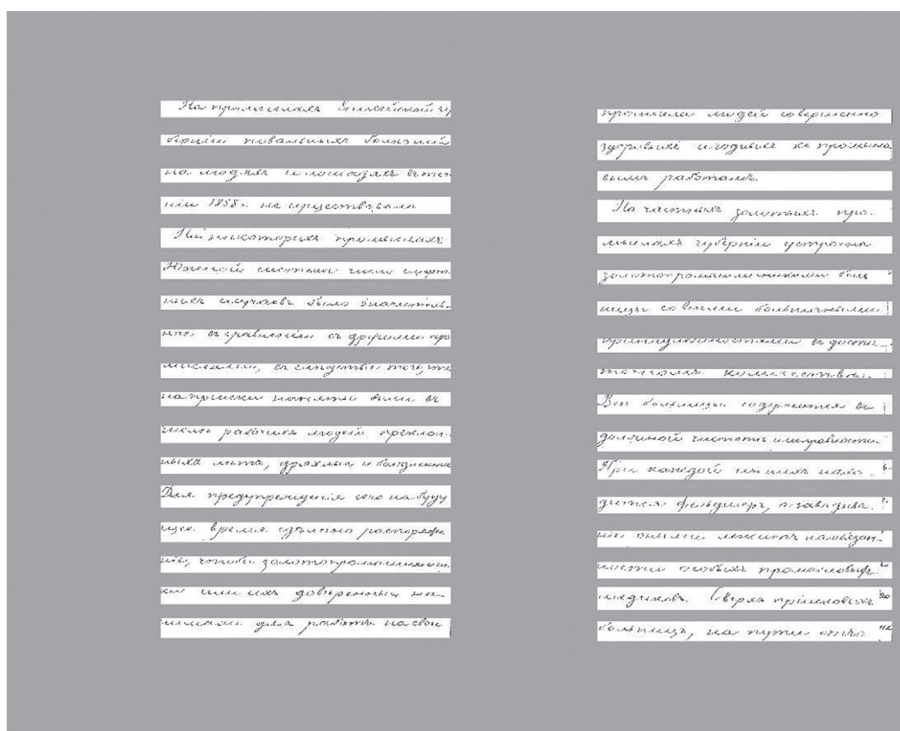


Рис. 4

В качестве модели использована сверточно-рекуррентная нейронная сеть CRNN, представляющая собой комбинацию CNN для извлечения локальных признаков из изображения и RNN, представленной двумя слоями двунаправленных LSTM для обработки последовательности. Использование именно такой модели позволяет достоверно распознавать рукописный текст.

Программная реализация и экспериментальные исследования. Для автоматизации процесса распознавания рукописных текстов отчетов было создано веб-приложение для работы с фотографиями документов. Приложение написано на языке Python, дизайн выполнен с помощью библиотеки Tkinter. Программа, реализующая алгоритм распознавания текста, может принимать на вход файлы изображений форматов JPG, JPEG, TIFF, TIF, PNG.

Распознавание текста отчетов выполняется согласно разработанному алгоритму в несколько этапов: фильтрация изображения для устранения шумов, сегментация строк текста и применение нейронной сети для распознавания текста. Устранение шумов реализовано с помощью функции `fastNIMeansDenoisingColored()` библиотеки OpenCV. Эта функция сначала преобразует RGB-изображение в цветовое пространство CIELAB, а затем отдельно удаляет основные виды шума.

Для сегментации строк реализован свой алгоритм выделения их на изображении. Сначала изображение конвертируется в бинарное двумя функциями библиотеки OpenCV: `cvtColor()`, `threshold()`. Далее реализуется алгоритм, меняющий пиксели, находящиеся на определенном расстоянии от основного текста, с белого на серый цвет, после чего выделенные строки текста сохраняются в отдельный файл в формате JPG.

Программная реализация распознавания текста с помощью глубоких нейронных сетей создана посредством библиотеки Pytesseract. Основным компонентом библиотеки Pytesseract является Tesseract OCR Engine — мощный инструмент с открытым исходным кодом, который необходимо установить, чтобы использовать Pytesseract. Эта библиотека хорошо зарекомендовала себя для решения задачи распознавания машинописного текста. Для распознавания рукописного текста потребовалось дообучение модели с помощью встроенных утилит tesseract. Для этого был создан набор обучающих данных, состоящий из следующих пар: изображения текста, взятого из отчетов, и текстового файла, содержащего текст с изображения. Для корректной работы алгоритма имена файлов изображения и текстового файла должны быть одинаковыми.

Данные для обучения модели были взяты из исследуемых отчетов. Для эксперимента было создано три набора данных:

- 1) набор данных, содержащий строки, — состоит из 500 изображений строк из отчетов и 500 текстовых файлов с распознанным текстом для каждого изображения;
- 2) набор данных, состоящий из отдельных слов, — состоит из 1000 изображений, на каждом из которых представлено только одно слово; к каждому слову прилагается текстовый файл с распознанным словом; тестирование модели в дальнейшем выполнялось на фотографиях отчетов, содержащих только эти слова;
- 3) набор данных, содержащий буквы, — состоит из 1500 изображений, содержащих буквы из отчетов, а также 1500 текстовых файлов, содержащих текст с изображений.

Тестирование модели выполнено с помощью 200 файлов (100 изображений и 100 текстовых файлов), взятых случайным образом из каждого из наборов данных. Изображения поступали на вход обученной модели, после чего генерировался ответ, который сравнивался с текстовым файлом из набора данных. Сравнение результатов выполнено с помощью двух метрик: CRR и WRR. Метрика WRR (Word Recognition Rate) показывает точность распознавания, которая определяется как процент правильно распознанных слов. Метрика CRR (Character Recognition Rate) показывает точность распознавания как отношение количества правильно распознанных символов к их общему количеству. Данные метрики показывают количество ошибок, допущенных нейронной сетью. В табл. 1 показаны результаты обучения модели на разных наборах данных с количеством итераций, равным 50 000.

Таблица 1

Метрика	Точность распознавания, %, на наборе данных		
	Строки	Слова	Буквы
CRR	99,8547	32,6979	16,9969
WRR	95,4640	14,9961	1,0699

Согласно результатам экспериментальных исследований качество распознавания текста моделью, обученной на отдельных строках, существенно выше, чем при ее обучении на словах или буквах, поэтому для построения системы распознавания текста была использована нейронная сеть, обученная именно на этом наборе данных. В табл. 2 приведены результаты работы алгоритма — примеры распознавания строк текста при обучении на наборах строк.

Таблица 2

Изображение	Результат
<i>На промыслах Енисейской гу</i>	На промыслах Енисейской гу
<i>бернии повальных болезней</i>	бернии повальных болезней
<i>на людях и лошадях вьтече</i>	на людях и лошадях вьтече
<i>нии 1858 г. не существовало</i>	нии 1858 г. не существовало
<i>На некоторых промыслах</i>	На некоторых промыслах

Распознанные таким образом строки текста объединяются и помещаются в отдельный текстовый файл. При этом отсутствующие в современном письменном русском языке символы заменяются на их современные аналоги, кроме символа „і“. Например, символы „Ѣ, ѣ“ заменены на „е“.

Заключение. Представлены подробные результаты по распознаванию рукописных нечетких текстов. Распознавание выполнено в три этапа: устранение шумов, сегментация строк текста, распознавание текста выделенных строк. Удаление шумов реализовано с помощью библиотеки OpenCV, для выделения строк создан оригинальный алгоритм на языке Python, распознавание текста выполнено с помощью дообученной модели библиотеки Tesseract OCR. В ходе разработки создано приложение с веб-интерфейсом. В дальнейшем планируется создание алгоритма сохранения верстки оригинального документа и перевод текста с дореформенного русского языка на современный для популяризации истории и обеспечения доступности исторических документов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carbonell M., Fornés A., Villegas M., Lladós J. A neural model for text localization, transcription and named entity recognition in full pages // Pattern Recognition Letters. 2020. Vol. 136. P. 219–227. DOI: 10.1016/j.patrec.2020.05.001.
2. Mestha P., Asif S., Mayekar M. Handwritten Text Line Recognition Using Deep Learning // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. P. 567–580. DOI: 10.1007/978-3-030-84760-9_48.
3. Souibgui M. A., Fornes A., Kessentini Y., Megyesi B. Few shots are all you need: A progressive learning approach for low resource handwritten text recognition // Pattern Recognition Letters. 2022. Vol. 160. P. 43–49. DOI: 10.1016/j.patrec.2022.06.003.
4. Kang L., Riba P., Rusinol M., Fornes A., Villegas M. Pay attention to what you read: Non-recurrent handwritten text-Line recognition // Pattern Recognition. 2022. Vol. 129. P. 108766. DOI: 10.1016/j.patcog.2022.108766.
5. Gonwirat S., Surinta O. CycleAugment: Efficient data augmentation strategy for handwritten text recognition in historical document images // Engineering and Applied Science Research. 2022. Vol. 49, N. 4 P. 505–520. DOI: 10.14456/easr.2022.50.
6. Aradillas J., Murillo-Fuentes J., Olmos P. Boosting Offline Handwritten Text Recognition in Historical Documents with Few Labeled Lines // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 76674–76688. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3082689.

7. Im C., Kim Y., Mandl T. Deep learning for historical books: classification of printing technology for digitized images // *Multimedia Tools and Applications*. 2022. Vol. 81. P. 5867–5888. DOI: 10.1007/s11042-021-11754-7.
8. Jiju A., Tuscano S., Badgujar C. OCR Text Extraction // *Intern. Journal of Engineering and Management Research*. 2021. Vol. 11. P. 83–86. DOI:10.31033/ijemr.11.2.11.
9. Lombardi F., Marinai S. Deep Learning for Historical Document Analysis and Recognition — A Survey // *Journal of Imaging*. 2020. Vol. 6, N. 10. P. 110 DOI: 10.3390/jimaging6100110.
10. Sporici D., Cusnir E., Boiangiu C. Improving the accuracy of Tesseract 4.0 OCR engine using convolution-based preprocessing // *Symmetry*. 2020. Vol. 12, N. 5. P. 715. DOI: 10.3390/sym12050715.
11. Pyataeva A. V., Genza S. A. Artificial neural network technology for text recognition // *CEUR Workshop Proc.* 2019. Vol. 2534. P. 248–252.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Александр Максимович Унтерберг** — студент; Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, кафедра систем искусственного интеллекта; E-mail: unterberg2012@gmail.com
- Анна Владимировна Пятаева** — канд. техн. наук, доцент; Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, кафедра систем искусственного интеллекта; руководитель научно-учебной лаборатории систем искусственного интеллекта; E-mail: anna4u@list.ru
- Светлана Сергеевна Замыслова** — студентка; Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, кафедра систем искусственного интеллекта; E-mail: zamyslova_svetlana_17-05@mail.ru
- Екатерина Дмитриевна Рукосуева** — студентка; Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, кафедра систем искусственного интеллекта; E-mail: rukosuevakatya@gmail.com
- Константин Валерьевич Богданов** — канд. техн. наук, доцент; Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий, кафедра программной инженерии; kbogdanov@sfsu-kras.ru

Поступила в редакцию 30.03.2024; одобрена после рецензирования 11.04.2024; принята к публикации 23.07.2024.

REFERENCES

1. Carbonell M., Fornés A., Villegas M., Lladós J. *Pattern Recognition Letters*, 2020, vol. 136, pp. 219–227, DOI: 10.1016/j.patrec.2020.05.001.
2. Mestha P., Asif S., Mayekar M. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, pp. 567–580, DOI: 10.1007/978-3-030-84760-9_48.
3. Souibgui M.A., Fornes A., Kessentini Y., Megyesi B. *Pattern Recognition Letters*, 2022, vol. 160, pp. 43–49, DOI: 10.1016/j.patrec.2022.06.003.
4. Kang L., Riba P., Rusinol M., Fornes A., Villegas M. *Pattern Recognition*, 2022, vol. 129, art. no. 108766, DOI: 10.1016/j.patcog.2022.108766.
5. Gonwirat S., Surinta O. *Engineering and Applied Science Research*, 2022, no. 4(49), pp. 505–520, DOI: 10.14456/easr.2022.50.
6. Aradillas J., Murillo-Fuentes J., Olmos P. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 76674–76688, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3082689.
7. Im C., Kim Y., Mandl T. *Multimedia Tools and Applications*, 2022, vol. 81, pp. 5867–5888, DOI: 10.1007/s11042-021-11754-7.
8. Jiju A., Tuscano Sh., Badgujar Ch. *International Journal of Engineering and Management Research*, 2021, no. 2(11), pp. 83–86, DOI:10.31033/ijemr.11.2.11.
9. Lombardi F., Marinai S. *Journal of Imaging*, 2020, no. 6(10), pp. 110, DOI: 10.3390/jimaging6100110.
10. Sporici D., Cusnir E., Boiangiu C. *Symmetry*, 2020, no. 5(12), pp. 715, DOI: 10.3390/sym12050715.
11. Pyataeva A.V., Genza S.A. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2534, pp. 248–252.

DATA ON AUTHORS

- | | |
|--------------------------------|---|
| Aleksander M. Unterberg | — Student; Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies, Department of Artificial Intelligence Systems;
E-mail: unterberg2012@gmail.com |
| Anna V. Pyataeva | — PhD, Associate Professor; Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies, Department of Artificial Intelligence Systems; E-mail: anna4u@list.ru |
| Svetlana S. Zamyslova | — Student; Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies, Department of Artificial Intelligence Systems;
E-mail: zamyslova_svetlana_17-05@mail.ru |
| Ekaterina D. Rukosueva | — Student; Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies, Department of Artificial Intelligence Systems;
E-mail: rukosuevakatya@gmail.com |
| Konstantin V. Bogdanov | — PhD, Associate Professor; Siberian Federal University, Institute of Space and Information Technologies, Department of Software Engineering;
E-mail: kbogdanov@sfu-kras.ru |

Received 30.03.2024; approved after reviewing 11.04.2024; accepted for publication 23.07.2024.

УДК 621.397.6
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-776-789

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕР ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ И РАСПОЗНАВАНИИ ОБЪЕКТОВ

В. А. Овсянников*, Я. В. Овсянников

Государственный институт прикладной оптики, Казань, Россия

** jar_ovs@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается усовершенствованная инженерная методика оценки вероятности обнаружения и распознавания объектов местности посредством телевизионных камер (ТК) воздушного и наземного базирования, работающих в видимом и/или ближнем инфракрасном диапазоне спектра в дневное и ночное время суток. Представленная методика концептуально схожа с таковой для тепловизионных приборов, что обеспечивает возможность получения сопоставимых оценок показателей эффективности этих видов аппаратуры наблюдения и, значит, прогнозирование эффективности всего оптико-электронного комплекса, состоящего из телевизионного и тепловизионного каналов. Предложенная расчетно-аналитическая методика, в отличие от известных, учитывает ряд дополнительных существенных факторов: работу ТК в зависимости от уровня естественной освещенности местности как в шумоограниченном, так и контрастно-ограниченном режиме, когда их эффективность лимитируется соответственно шумом ТК или же ограниченной контрастной чувствительностью зрительного анализатора человека-оператора; тип и балльность облачности, ослабляющей облученность объекта от Солнца; турбулентность атмосферы, размывающую изображение; дымку, увеличивающую фотонный шум ТК; возможность выбора условий дешифрирования изображения (яркости, контрастности, увеличения); усовершенствованную модель зрительного анализатора оператора при пространственно-временном интегрировании визуальных сигналов и его квалификацию.

Ключевые слова: телевизионная камера, операционная модель, обнаружение, распознавание объектов

Ссылка для цитирования: Овсянников В. А., Овсянников Я. В. Усовершенствование расчетно-аналитической методики оценивания эффективности телевизионных камер при обнаружении и распознавании объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 776–789. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-776-789.

IMPROVEMENT OF THE CALCULATION AND ANALYTICAL METHOD OF TV-CAMERA EFFICIENCY ASSESSMENT IN OBJECTS DETECTION AND RECOGNITION

V. A. Ovsyannikov*, Ya. V. Ovsyannikov

State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia

** jar_ovs@mail.ru*

Abstract. An improved engineering methodology for assessing the probability of detection and recognition of terrain objects using air- and ground-based television cameras operating in the visible and/or near infrared range of the spectrum during the day and night is considered. The presented methodology is conceptually similar to that for thermal imaging devices, which makes it possible to obtain comparable estimates of the performance indicators of these types of surveillance equipment and, therefore, to predict the performance of the entire optical-electronic complex, consisting of television and thermal imaging channels. The proposed calculation and analytical method, unlike the known ones, takes into account a number of additional significant factors: the television camera operation depending on the level of natural illumination of the area both in noise-limited and contrast-limited modes, when their efficiency is limited, respectively, by the noise of the camera or the limited contrast sensitivity of the visual analyzer of the human operator; the type and severity of cloudiness, weakening the irradiation of the object from the Sun; atmospheric turbulence, select image

deciphering conditions (brightness, contrast, visible magnification); an improved model of the operator's visual analyzer during spatial-temporal integration of visual signals and its qualifications.

Keywords: television camera, operational model, object detection, object recognition

For citation: Ovsyannikov V. A., Ovsyannikov Ya. V. Improvement of the calculation and analytical method of TV-camera efficiency assessment in objects detection and recognition. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 9. P. 776–789 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-776-789.

Введение. Одним из перспективных направлений развития видовых оптико-электронных систем воздушного и наземного базирования является объединение информации, получаемой разнотипными датчиками, работающими в различных спектральных диапазонах, причем особенно продуктивным считается комбинирование или комплексирование тепловизионного и телевизионного каналов этих систем, что повышает вероятность вскрытия (обнаружения и/или распознавания) объектов местности. Поскольку данные каналы, основанные на современной элементной базе, имеют практически одинаковую структуру, а потребителем видеoinформации в обоих случаях является человек, для обеспечения оптимального сочленения каналов и сопоставимости оценок их эффективности, необходимых для прогнозирования таковой всей системы, целесообразно использовать общие, унифицированные методики оценивания этой эффективности, определяемой вероятностями вскрытия объектов, находящихся на заданном удалении. Эти методики представляют собой соответствующие операциональные модели — совокупности зависимостей, связывающих показатели эффективности с основными техническими параметрами каналов и условиями их использования, а также с параметрами фоноцелевой, помеховой и погодной обстановки. Задачей, рассматриваемой в настоящей статье, является развитие операциональной модели одного из основных компонентов оптико-электронных систем — твердотельных телевизионных камер (ТК).

Актуальность поставленной задачи определяется тем, что известные методики оценивания эффективности ТК при вскрытии объектов (например, [1–5]) чрезмерно упрощены и, главное, построены на существенно различной теоретической базе, что дезориентирует пользователя и далеко не всегда позволяет получать достаточно надежные, вызывающие доверие результаты. В отличие от этих методик, представленная ниже операциональная модель ТК учитывает:

- влияние на эффективность ТК не только ее шума, но и контрастной чувствительности зрительного аппарата оператора-дешифровщика, т. е. работу ТК в зависимости от естественной освещенности местности как в шумоограниченном, так и контрастно-ограниченном режиме;
- тип и балльность облачности, ослабляющей облученность объекта от Солнца, турбулентность атмосферы, размывающую телевизионное изображение, и дымку, увеличивающую фотонный шум ТК;
- возможность выбора условий наблюдения изображения, комфортных для оператора-дешифровщика;
- усовершенствованную модель зрительного анализатора оператора при пространственно-временном интегрировании визуальных сигналов.

Корректный учет этих дополнительных и уточнение влияния других существенных факторов расширяет диапазон применения ТК и снижает погрешность прогнозирования показателей их эффективности, доводя ее до уровня, который определяется только методической погрешностью, присущей используемой в операциональной модели ТК самой концепции эквивалентных мир [6].

Методика решения задачи. Для оценки вероятности вскрытия посредством ТК наземных объектов далее используем подход, аналогичный подходу, разработанному для оценки эффективности несканирующих тепловизионных приборов, методы расчета которых достаточно хорошо отработаны [7].

Считаем, что в ТК используются кремниевые фотоприемники — приборы с зарядовой связью, чувствительные в диапазоне спектра $\Delta\lambda = 0,4 \dots 1,1$ мкм, весьма малые размеры элементов

которых обеспечивают максимально высокую разрешающую способность ТК — их основное достоинство. При этом существенно то, что в летних условиях в видимом диапазоне спектра, в котором облученность земной поверхности от Солнца максимальна, разность спектральных коэффициентов яркости типовых наземных объектов, в частности транспортной техники, и естественных фонов положительна, а в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне 0,7–1,1 мкм отрицательна, причем контрасты объектов в этой спектральной области в 1,5–2 раза больше (по абсолютной величине) их контрастов в видимом диапазоне. Помимо этого, в данном диапазоне спектра имеют место лучшие, чем в видимом, внешние условия функционирования ТК — более высокая прозрачность и меньшая турбулентность атмосферы.

Однако в зимнее время года яркостные контрасты типовых объектов на фоне снежного покрова однополярны (конкретно — отрицательны) во всем диапазоне спектра 0,4–1,1 мкм, поэтому для повышения эффективности ТК их спектральные рабочие диапазоны $\Delta\lambda$ рекомендуется адаптировать к времени года следующим образом:

$$\Delta\lambda = \begin{cases} 0,4 - 0,7 \text{ или } 0,7 - 1,1 \text{ мкм} & \text{— летом;} \\ 0,4 - 1,1 \text{ мкм} & \text{— зимой.} \end{cases}$$

Как известно, одним из основных технических параметров тепловизионных приборов является разность температур ΔT_0 , К, эквивалентная шуму, входящая в состав исходных данных методик прогнозирования их эффективности. В спецификациях же ТК, как правило, используется другая величина — чувствительность (фактически — пороговая чувствительность) — освещенность объекта ΔE_0 , лк, от эталонного источника с определенным спектральным составом излучения (для отечественных ТК это обычно источник типа А с цветовой температурой 2856 К, для зарубежных — галогенная лампа с цветовой температурой 3200 К), создающая в нормированных условиях на выходе ТК без учета влияния атмосферы определенное отношение m_0 „сигнала на белом к шуму на черном“ (т. е. без учета фотонного шума от объекта), обычно равное 10 (иногда 6) [8,9].

В отличие от визуально-оптических приборов (бинокли и др.), а также электронно-оптических приборов ночного видения первых поколений, в ТК, так же как и в тепловизионных приборах, в каждом конкретном случае реализуется оптимальный для оператора выбор условий дешифрирования изображений — их яркости, контрастности, видимого увеличения. Это означает, что ТК фактически реагирует не на относительный контраст объектов $k = (r_{об} - r) / (r_{об} + r)$, где $r_{об}$, r — интегральные коэффициенты яркости объекта и фона соответственно в диапазоне $\Delta\lambda$, а на разность этих коэффициентов $\Delta r = r_{об} - r$, инициирующую видеосигнал в виде разности яркости изображения объекта и фона, пропорциональной Δr .

Поскольку в ТК усиление видеосигнала происходит лишь по переменной составляющей, искусственно создаваемая постоянная составляющая сигнала, формирующего изображение, связана не с энергетической яркостью поля объектов, приведенной к ТК, а с яркостью пространства, окружающего оператора. Поэтому от яркости атмосферы, определяющей контраст изображения в визуально-оптических приборах, контраст телевизионного изображения, вообще говоря, не зависит, однако ее рассеянное излучение (дымка) влияет на величину фотонного шума и, как следствие, на отношение сигнал/шум.

На практике при работе с ТК оператор путем регулирования коэффициента усиления видеосигналов подбирает такой контраст изображения, чтобы, для обеспечения возможности наблюдения объекта и его окружения, приведенные к ТК разность коэффициентов яркости объекта и фона и вариации коэффициента яркости близлежащего фона укладывались в диапазон регистрируемой разности коэффициентов яркости. При этом значение коэффициента усиления должно быть по возможности большим, чтобы на изображении был замечен шум, не превышающий, однако, субъективно приемлемого уровня, — тогда достигается максимально высокая пороговая чувствительность камеры и она работает в шумоограниченном режиме, характерном для ТК при низком уровне освещенности, т. е. ночью. Если же видимый шум отсутствует, что имеет место в дневное время суток или в сумерках, то дальность действия этой ТК по сути

лимитируется контрастной чувствительностью глаз оператора и камера функционирует в контрастно-ограниченном режиме.

Рассмотрим вначале шумограниченный режим работы, когда важное значение имеет отношение сигнал/шум. Так как шум на выходе ТК при определении ее чувствительности ΔE_0 обусловлен лишь темновым шумом (в основном это шум считывания), отношение сигнал/шум m_0 при аттестации ТК равно (см., например, [6])

$$m_0 = \frac{N_{\Phi 0}}{\sqrt{N_T}}; N_{\Phi 0} = \frac{10^{-12} r_0 \tau_0 \lambda_m \eta_m t_0 a^2 \int_{\Delta \lambda} E_0(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{B_0 h c}; B_0 = \frac{4}{\omega_0^2} + 1, \quad (1)$$

где $N_{\Phi 0}$ — дисперсия фотонного шума, численно равная полезному сигналу от объекта, электрон; N_T — дисперсия темнового шума, электрон; $E_0(\lambda)$ — спектральная плотность облученности объекта от эталонного излучателя, Вт/(м²·мкм); $S(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность фотоприемника; λ_m — длина волны, для которой $S(\lambda_m) = \max$, мкм; η_m — квантовая эффективность фотоприемника на длине волны λ_m ; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^{14}$ мкм/с — скорость света; t_0 — время накопления зарядов при аттестации ТК, с; a — размер чувствительного элемента фотоприемника, мкм; ω_0 — относительное отверстие объектива при аттестации ТК (обычно 1:1,4); τ_0 — коэффициент пропускания объектива в диапазоне $\Delta \lambda$; r_0 — коэффициент яркости объекта в диапазоне $\Delta \lambda$ при аттестации ТК (обычно $r_0 = 0,75$).

Графики относительной спектральной плотности облученности земли от Солнца $E(\lambda)$, относительной спектральной чувствительности кремниевого фотоприемника $S(\lambda)$ и кривой видности глаза $V(\lambda)$ представлены на рис. 1, кривые 1–3 соответственно.

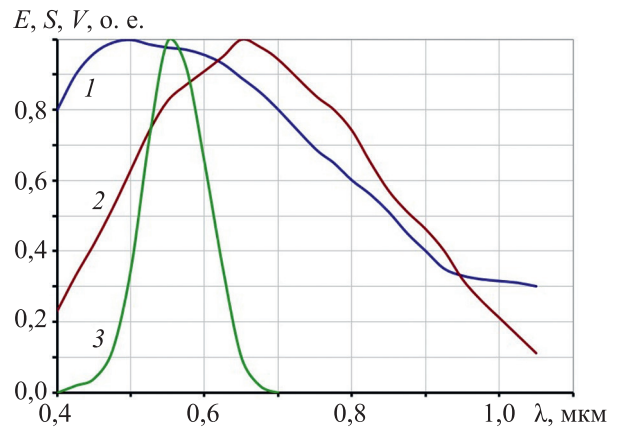


Рис. 1

Учитывая соотношения

$$\Delta E_0 = 683 \int_0^{\infty} E_0(\lambda) V(\lambda) d\lambda; \lambda_m \eta_m \int_{\Delta \lambda} E_0(\lambda) S(\lambda) d\lambda = \eta \int_{\Delta \lambda} \lambda E_0(\lambda) d\lambda,$$

где $V(\lambda)$ — кривая видности (относительная спектральная чувствительность) глаза; η — средняя квантовая эффективность фотоприемника в диапазоне $\Delta \lambda$, выражение (1) для $N_{\Phi 0}$ перепишем в виде

$$N_{\Phi 0} = \frac{10^{-12} \Delta E_0 r_0 \beta_0 \tau_0 \eta t_0 a^2}{683 B_0 h c}; \beta_0 = \frac{\int_{\Delta \lambda} \lambda E_0(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_0(\lambda) V(\lambda) d\lambda}. \quad (2)$$

Тогда искомое среднеквадратическое значение темнового шума $\sqrt{N_T} = N_{\Phi 0}/m_0$, это обычно величина порядка 10 электрон.

Иногда значение $\sqrt{N_T}$ приводится непосредственно в спецификации ТК, и для расчетов предпочтительно использовать именно его, поскольку условия аттестации ТК (тип и температура эталонного источника излучения, способ определения — с учетом или без учета влияния фотонного шума и отсекающего ИК спектрального фильтра — и величина нормированного отношения сигнал/шум, время накопления, относительное отверстие объектива) не стандартизованы и могут варьироваться [9], что нередко обусловлено стремлением производителей искусственно улучшить в рекламных целях чувствительность ТК, не повышая их реальной эффективности.

Таблица 1

Условия	$E_{\text{ЕНО}}$, лк
Сумерки	1–10
Лунная безоблачная ночь	10^{-1} –1
Лунная облачная ночь	10^{-2} – 10^{-1}
Безлунная звездная ночь	10^{-3} – 10^{-2}
Безлунная облачная ночь	10^{-4} – 10^{-3}

применение в ТК объективов с высоким относительным отверстием, она может достигать до 10^{-4} лк [10], что обеспечивает работу ТК при ЕНО в безлунную облачную ночь (табл. 1).

Значения ЕНО подвержены значительным колебаниям, поэтому важной характеристикой $E_{\text{ЕНО}}$ является функция распределения $F(E_{\text{ЕНО}})$ — вероятность того, что текущее значение $E_{\text{ЕНО}}$ не превысит заданного. Среднегодовые значения этой функции для средней полосы России составляют: $F(10^{-4}) = 0,01$, $F(10^{-3}) = 0,2$, $F(10^{-2}) = 0,75$, $F(10^{-1}) = 0,95$.

Дисперсия фотонного шума ТК $N_{\text{ф}}$ в ночное время суток в реальных условиях применения определяется формулой, аналогичной (2):

$$N_{\text{ф}} = \frac{10^{-12} E_{\text{ЕНО}} r \tau_a \beta_{\text{ЕНО}} \eta t a^2}{683 B h c}; B = \frac{4}{\omega^2} + 1; \beta_{\text{ЕНО}} = \frac{\int_{\Delta\lambda} \lambda E_{\text{ЕНО}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\text{ЕНО}}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}; \quad (3)$$

$$r_{\text{об}} = \frac{\int_{\Delta\lambda} E_{\text{ЕНО}}(\lambda) S(\lambda) r_{\text{об}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\text{ЕНО}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}; r = \frac{\int_{\Delta\lambda} E_{\text{ЕНО}}(\lambda) S(\lambda) r(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\text{ЕНО}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

где $E_{\text{ЕНО}}(\lambda)$ — относительная спектральная плотность ЕНО; τ_a — коэффициент пропускания атмосферы на трассе до объекта в диапазоне $\Delta\lambda$; t — фактическое время накопления зарядов, с; ω — фактическое относительное отверстие объектива ТК.

Зависимости $E_{\text{ЕНО}}(\lambda)$ в различных условиях приведены на рис. 2 [11]: 1 — безлунная ночь; 2 — лунная ночь, облачно; 3 — лунная ночь, ясно; 4 — сумерки. Рассчитанные по формулам (2) и (3) значения β_0 (при T , равном 2856 и 3200 К) и $\beta_{\text{ЕНО}}$ (для зависимостей 1–4 рис. 2) представлены в табл. 2.

Фотонный шум ТК при наблюдении объектов через слой атмосферы, в том числе в ночное время суток, увеличивает дымка, обусловленная рассеянием излучения. Для инженерных оценок ее влияния целесообразно воспользоваться понятием „коэффициент погоды“ w , который определяется как [12]

$$w = \pi \frac{\int_{\Delta\lambda} L_{\text{д}}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} E(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

где $L_{\text{д}}(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической яркости пригоризонтной дымки, Вт/(м²·ср·мкм); $E(\lambda)$ — спектральная плотность облученности земной поверхности, Вт/(м²·мкм).

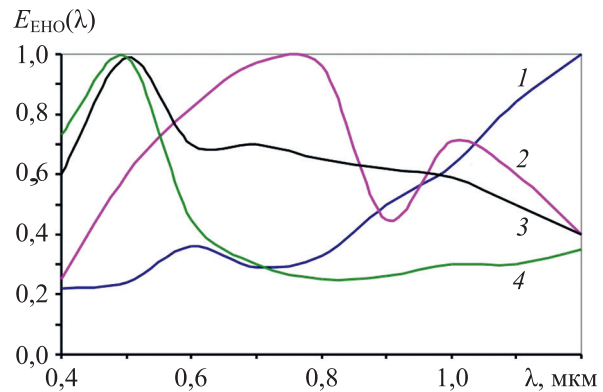


Рис. 2

Таблица 2

$\Delta\lambda$, мкм	β_0 (2856 К)	β_0 (3200 К)	$\beta_{\text{ЕНО}}$ (1)	$\beta_{\text{ЕНО}}$ (2)	$\beta_{\text{ЕНО}}$ (3)	$\beta_{\text{ЕНО}}$ (4)
0,4–0,7	1,5	1,5	1,9	1,7	1,5	1,0
0,7–1,1	7,9	6,4	7,5	3,6	2,7	1,4
0,4–1,1	9,4	7,9	9,4	5,3	4,2	2,4

Значения w в сумерках и ночью, практически не зависящие от направления визирования, приведены в табл. 3 [12].

Таблица 3

Сезон	Коэффициент w в темное время суток			
	Сплошная низкая облачность			Звездное небо
	Сумерки	Лунная ночь	Безлунная ночь	
Лето	0,56	0,58	0,61	0,85
Зима	0,95	0,90	0,97	1,0

Отношение энергетической яркости дымки L_a в направлении визирования объекта к энергетической яркости пригоризонтной дымки L_d равно $L_a/L_d = 1 - \tau_a$ [13]. Следовательно, с учетом (5), дисперсия фотонного шума ТК, обусловленного дымкой N_d , будет определяться формулой

$$N_d = \frac{10^{-12} E_{\text{ЕНО}} w \tau_o (1 - \tau_a) \beta_d \eta t a^2}{683 B h c}; \quad \beta_d = \frac{\int_{\Delta\lambda} \lambda L_d(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \lambda L_d(\lambda) V(\lambda) d\lambda}. \quad (6)$$

В ночное время суток зависимости $L_d(\lambda)$ и $E_{\text{ЕНО}}(\lambda)$ качественно схожи, поэтому можно принять $\beta_d = \beta_{\text{ЕНО}}$. Тогда, пренебрегая незначительным пространственным шумом фотоприемника, обусловленным остаточной (после коррекции) неоднородностью чувствительности его элементов, находим дисперсию суммарного шума: $N_\Sigma = N_\Phi + N_d + N_T$.

Спектральные коэффициенты отражения (для диффузных отражателей они совпадают со спектральными коэффициентами яркости) многих естественных и антропогенных объектов, в том числе зарубежной военной техники, можно найти, например, в [11]; см. также [14–16] и электронную библиотеку спектров Aster [17].

Выходное отношение сигнал/шум m ТК „в точке“ (т. е. без учета пространственно-временного интегрирования видеосигналов), соответствующее протяженному объекту, составляет

$$m = \frac{10^{-12} E_{\text{ЕНО}} |\Delta r| \tau_o \tau_a \beta_{\text{ЕНО}} \eta t a^2}{683 B h c \sqrt{N_\Sigma}}, \quad \Delta r = r_{\text{об}} - r. \quad (7)$$

Коэффициент пропускания атмосферы τ_a в (3), (6) и (7) для наклонных трасс в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, в которых доминирует аэрозольное рассеяние излучения, можно оценить по формуле (например, [6])

$$\tau_a = \exp(-3,91 K (0,55/\lambda_0)^{1,3} D/S_M); \quad K = h_0 [1 - \exp(-H/h_0)]/H; \quad (8)$$

$$D = H/\sin|\psi|; \quad h_0 = 0,78 + 0,038 S_M,$$

где D — длина трассы, км; K — коэффициент приведения данной трассы к эквивалентной приземной горизонтальной; H — высота расположения ТК, км; λ_0 — средняя длина волны диапазона $\Delta\lambda$, мкм; S_M — метеорологическая дальность видимости, км; $\psi \leq 0$ — угол места объекта (от горизонта).

Для горизонтальных приземных трасс $K = 1$.

Важнейшей характеристикой ТК, определяющей ее разрешающую способность, является функция передачи модуляции $K(v)$, являющаяся произведением функций передачи модуляции всех компонентов информационного тракта ТК. Однако в спецификации ТК указываются параметры не всех ее компонентов, определяющих данную функцию, что препятствует прямому расчету. Тем не менее для оценки функции $K(v)$ можно использовать тот факт, что она хорошо описывается гауссовской зависимостью с параметром σ , мрад: $K(v) = \exp(-2\pi^2 \sigma^2 v^2)$, где v — угловая частота, мрад⁻¹.

При анализе ТК, как и тепловизионных приборов, целесообразно использовать вместо σ более обозримый параметр — эффективное элементарное поле зрения δ , мрад, связанное с

σ соотношением $\delta = \sigma/0,55$ и, значит, в отличие от номинального элементарного поля зрения, также зависящее от всего информационного тракта ТК.

Между тем разрешающую способность ТК R , лин, принято оценивать максимальным числом укладываемых в высоту изображения черных и белых полос (линий) стандартной периодической, имеющей единичный относительный яркостный контраст миры, разрешаемой оператором при оптимальных условиях освещения миры и наблюдения ее изображения [8,18,19]. Отсюда вытекает, что

$$R = 2n_k\delta_0v_m/\kappa; \delta_0 = a/f; \kappa = a/\Delta a, \quad (9)$$

где n_k — число элементов фотоприемника по высоте кадра; δ_0 — элементарное поле зрения, мрад; v_m — максимальная угловая частота разрешаемой миры, мрад⁻¹; f — фокусное расстояние объектива, мм; κ — коэффициент заполнения фотоприемника по одной координате; Δa — шаг (период) элементов фотоприемника, мкм.

Можно считать [18], что значение v_m является корнем уравнения $K(v_m) = 0,2$, откуда следует $v_m = 0,5/\delta$. Тогда, учитывая (9), получаем оценочное выражение для эффективного элементарного поля зрения ТК:

$$\delta = n_k\delta_0/\kappa R. \quad (10)$$

Следует отметить, что величина R для конкретной ТК не является строго постоянной, она зависит от степени диафрагмирования объектива, определяющей размер его кружка рассеяния, и некоторых других факторов [19].

Наиболее популярной в мире операциональной моделью видовых оптико-электронных систем, в том числе ТК, является модель NVTherm Центра ночного видения и электронных датчиков (США) [6]. Эта модель, определяющая вероятность P вскрытия объектов, хорошо описывается следующим выражением, учитывающим дополнительный существенный фактор — квалификацию оператора:

$$P = 1 - \exp[-0,7(\gamma h_{об}/2AC)^2], \quad (11)$$

где $h_{об}$ — критический размер объекта — корень квадратный из его видимой площади, м; A — разрешение на местности, м, — полупериод эквивалентной яркостной миры, разрешаемой с вероятностью 0,5; C — критерий Джонсона, в среднем равный 1 при обнаружении, 3 — при классификации (распознавании класса) и 6 — при идентификации (распознавании типа) объекта; $\gamma = 0,65 \dots 1,5$ — показатель квалификации оператора (от низкой до высокой соответственно).

Введем для ТК понятие „яркостно-частотная характеристика“ (ЯЧХ) — зависимость разности коэффициентов яркости полос стандартной яркостной миры с соотношением размеров полос 7:1 и фона от ее угловой частоты, при которой эта мира разрешается по ее изображению с вероятностью 0,5. ЯЧХ является, по сути, неким аналогом температурно-частотной характеристики тепловизионных приборов. Для ТК, работающих в шумоограниченном режиме, применима следующая аппроксимация относительной эквивалентной ЯЧХ $Y(x)$, общей для всех образцов ТК (для $x > 0,15$) [7]:

$$Y(x) = mq\kappa\epsilon\delta/\delta_0 = 2,6x/K(x) \approx 0,26\exp(3,7x^2 + 4,35x), \quad (12)$$

где $x = v\delta = D\delta/2A$ — относительная частота миры; q — коэффициент, учитывающий визуальное накопление видеосигналов в смежных кадрах ТК; ϵ — коэффициент, учитывающий различие длины полос стандартной и эквивалентной мир.

Принимая, что для ТК рабочей является высокочастотная ветвь ЯЧХ, которой соответствует сравнительно небольшая длина изображения полос этих мир, не превышающая области пространственного интегрирования визуальных сигналов глазом оператора, и учитывая, что длина полос стандартной миры составляет $7A$, а эквивалентной — $h_{об}$, получаем: $\epsilon = (h_{об}/7A)^{1/2}$.

Коэффициент q в (12) составляет [7]

$$q = \sqrt{[1 + \exp(-1/Ft_{\text{гл}})]/[1 - \exp(-1/Ft_{\text{гл}})]}; t_{\text{гл}} = 0,019 + 0,078/L'^{0,17},$$

где F — частота кадров, Гц; $t_{\text{гл}}$ — постоянная времени глаза оператора, с; L' — средняя яркость изображения, комфортная для оператора, кд/м² (по [6] $L' = 100$ кд/м² при дешифрировании изображения на свету, $L' = 3 \dots 30$ кд/м² — в полутьме, $L' = 0,3 \dots 1$ кд/м² — в темноте).

Результирующее, с учетом турбулентности атмосферы, элементарное поле зрения δ_{Σ} , мрад, которое и следует использовать вместо δ , определяется как [7]

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta^2 + \delta_T^2}; \quad (13)$$

$$\delta_T = 2,6 \cdot 10^6 C_{n\Sigma}^{0,6} D^{0,6} / \lambda_0^{0,2}; C_{n\Sigma} = 2,67 \cdot 10^{-8} C_n [0,375 + 0,75(10^4 H^{4/3} - 1)] / H^{8/3}, \quad (14)$$

где δ_T — эквивалентное элементарное поле зрения турбулентности, мрад; C_n — структурная характеристика атмосферы на высоте 1 м, м^{-2/3}.

Средние $C_{n \text{ ср}}$, максимальные $C_{n \text{ max}}$ и минимальные $C_{n \text{ min}}$ (для значений функции распределения 0,5, 0,95 и 0,05 соответственно) значения C_n , полученные по данным работы [20], приведены в табл. 4.

При $H \gg 0,001$ км имеем $C_{n\Sigma} = 2 \cdot 10^{-4} C_n / H^{4/3}$ и влиянием турбулентности можно пренебречь: $\delta_T = 0$. Для приземных трасс ($H = 0,001$ км) $C_{n\Sigma} = C_n$.

Тогда, решая уравнение (12) относительно x , получаем выражение для разрешения на местности A :

$$A = \frac{D\delta_{\Sigma}}{2x} = \frac{0,85D\delta_{\Sigma}}{\sqrt{1 + 0,78 \ln(mq\epsilon\delta_{\Sigma}/0,26\delta_0) - 1}}. \quad (15)$$

Поскольку коэффициент ϵ зависит от разрешения на местности, его приходится искать методом последовательных приближений.

Рассмотрим далее оценку разрешения на местности при работе ТК в контрастно-ограниченном режиме. Интегральная облученность горизонтальной земной поверхности прямой солнечной радиацией $E_{\text{п}}$, Вт/м², определяется как

$$E_{\text{п}} = \tau_{\text{обл}} E_s^* \sin h_s; E_s^* = \frac{E_s}{1 + 0,43m_s}; m_s = \min(1/\sin h_s, 35), \quad (16)$$

где $E_s = 1370$ Вт/м² — солнечная постоянная (облученность перпендикулярной площадки вне атмосферы); h_s — высота Солнца над горизонтом, ...°; m_s — оптическая масса атмосферы в направлении Солнца; $\tau_{\text{обл}}$ — коэффициент пропускания облачностью прямого солнечного излучения (табл. 5).

Таблица 4

Условия	$C_{n \text{ ср}}, \text{ м}^{-2/3}$		$C_{n \text{ max}}, \text{ м}^{-2/3}$		$C_{n \text{ min}}, \text{ м}^{-2/3}$	
	День	Ночь, утро, вечер	День	Ночь, утро, вечер	День	Ночь, утро, вечер
Центральная Европа (лето)	$5 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-15}$
Центральная Европа (зима)	$4 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$6 \cdot 10^{-14}$	$4 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-15}$
Пустынная зона (лето)	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$7 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-15}$
Пустынная зона (зима)	$4 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-14}$	$8 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$4 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-16}$
Субарктика (лето, зима)	$5 \cdot 10^{-14}$	$6 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$6 \cdot 10^{-15}$	$6 \cdot 10^{-15}$

Примечание. Значения $C_{n \text{ max}}$ могут быть достигнуты в ясную погоду при высокой температуре и низкой влажности воздуха, безветрии и сухой земной поверхности, а значения $C_{n \text{ min}}$ — при сплошной облачности, низкой температуре и высокой влажности воздуха, сильном ветре и мокрой земной поверхности.

Таблица 5

Форма облаков	$\tau_{\text{обл}}$ при $h_s, \dots^\circ$					
	≤ 10	15	20	30	40	50
Перистые	0	0,18	0,33	0,54	0,71	0,82
Высоко-кучевые	0	0	0	0	0,14	0,28
Слоистые	0	0	0	0	0	0

Для расчета $\sin h_s$ известно выражение [21]

$$\sin h_s = \sin \varphi \sin \delta_s - \cos \varphi \cos \delta_s \cos \left(\frac{360 t_M}{t_c} \right); \delta_s = 23,5 \sin \left[\frac{360}{365} (d - 81) \right], \quad (17)$$

где φ — географическая широта местоположения объекта, $\dots^\circ$; δ_s — склонение Солнца, зависящее от порядкового номера d дня года (начиная с 1 января), $\dots^\circ$; t_M — местное время, ч; $t_c = 24$ ч — длительность солнечных суток.

Интегральная облученность фона рассеянной солнечной радиацией E_p , Вт/м², оценивается по приближенной формуле, полученной с учетом результатов [21]:

$$E_p = 0,15 E_s^* [\tau_{\text{обл}}(1 - n/10) + \vartheta n/10], \quad (18)$$

где n — балльность облачности ($n = 0 \dots 10$); ϑ — коэффициент, учитывающий наличие облачности для рассеянного излучения (табл. 6).

При оценке облученности достаточно компактных объектов целесообразно представлять их в виде эквивалентного шара, площадь сечения которого равна видимой площади объекта. Так как объекты обычно покрыты матовой эмалью, их отражение можно считать диффузным. Тогда средние облученности объекта прямой $E_{\text{п.об}}$, Вт/м², и рассеянной $E_{\text{р.об}}$, Вт/м², солнечной радиацией, усредненные по площади проекции всей видимой поверхности шара, составляют [22]

$$E_{\text{п.об}} = \frac{2 E_s^* \tau_{\text{обл}}}{3\pi} (\sin \alpha_s - \alpha_s \cos \alpha_s); \alpha_s = \arccos(\cosh_s \cos \psi \cos \theta_s + \sin h_s \sin \psi); \quad (19)$$

$$E_{\text{р.об}} = 0,5 [E_p + \rho_s (E_p + E_{\text{п}}) - (2/3) \sin \psi (E_p - \rho_s (E_p + E_{\text{п}}))], \quad (20)$$

где α_s — угол между линией визирования объекта и направлением на Солнце, рад ($\alpha_s = 0 \dots \pi$); θ_s — солнечный азимут — угол между проекцией на местность линии визирования и плоскостью солнечного вертикала ($\theta_s = 0 \dots \pi$); ρ_s — альбедо местности для солнечного облучения, в среднем равное 0,2 (трава, листва), 0,3 (грунт, песок) и 0,8 (снег).

Таблица 6

Форма облаков	ϑ при $h_s, \dots^\circ$								
	2,5	5	10	15	20	25	30	40	50
Перистые	2	2	1,5	1,8	1,8	2,2	2,1	2,2	2,5
Перисто-слоистые	3	2	2	2	2,2	2,7	2,7	3	3,5
Высоко-кучевые	3	2	1,5	2,2	2,5	3	3,1	3,4	3,9
Высоко-слоистые	2	2	1,5	1,8	2	2,3	2,4	2,6	3
Слоисто-кучевые	0	0,5	0,7	1,2	1,5	2	2	2,4	2,9
Слоистые	1	2	0,7	0,8	1	1,2	1,3	1,4	1,6
Слоисто-дождевые	—	0,5	0,5	0,8	0,85	1	1	1	1,2
Кучево-дождевые	—	—	1	1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7

Формула (20) учитывает, в том числе, отраженное от земной поверхности прямое и рассеянное солнечное излучение. В отсутствие облачности объект и близлежащий фон могут быть затенены, в частности, окружающими предметами, и, значит, суммарные облученности объекта $E_{\Sigma об}$ и фона E_{Σ} будут равны

$$E_{\Sigma об} = \alpha E_{п.об} + E_{р.об}; E_{\Sigma} = \alpha E_{п} + E_{р}, \quad (21)$$

где коэффициент $\alpha = 1$ для объекта и окружающего его фона на солнце и $\alpha = 0$ — в тени.

Тогда эффективная разность интегральных коэффициентов яркости объекта и фона будет определяться как

$$\Delta r_{эф} = r_{об}(E_{\Sigma об}/E_{\Sigma}) - r, \quad (22)$$

где $r_{об}$ и r рассчитываются по (4) при замене $E_{ЕНО}(\lambda)$ на относительную спектральную плотность облученности местности от Солнца $E(\lambda)$ (см. рис. 1).

При дешифрировании изображений, формируемых ТК при работе в контрастно-ограниченном режиме, имеет значение функция порогового контраста $M(v')$ — зависимость минимального еще обнаруживаемого глазом оператора контраста $M = (L'_{\max} - L'_{\min})/(L'_{\max} + L'_{\min})$, где $L'_{\max}$, $L'_{\min}$ — максимальное и минимальное значения яркости соответственно, изображения разрешаемой синусоидальной миры от ее угловой частоты. Для функции $M(v')$ известно эмпирическое выражение (например, [6])

$$M(v') = \frac{(1 + 0,7/L')^{0,2}[1 + 12/w'(1 + v'/3)^2]}{540v'\exp(-bv')\sqrt{1 + 0,06\exp(bv')}}; b = 0,3(1 + 100/L')^{0,15},$$

где v' — угловая частота миры в пространстве изображений, $1/\dots^\circ$; w' — угловой размер изображения миры, $\dots^\circ$.

Взаимосвязь частоты v' и соответствующей угловой частоты v в пространстве предметов определяется соотношением

$$v' = 17,45v/\Gamma; \Gamma = \kappa\Delta\delta'/\delta_0,$$

где Γ — видимое увеличение ТК — отношение угловых размеров изображения объекта и самого объекта; $\Delta\delta'$ — угловой размер элемента изображения, мрад, соответствующий шагу элементов фотоприемника; далее принимаем оптимальное значение [23] $\Delta\delta' = 0,95$ мрад.

Функция порогового контраста $M(v')$ для рабочего интервала угловых частот $v' = 5 \dots 15$ 1° , соответствующего оптимальному видимому увеличению ТК, типовых значений углового размера изображения эквивалентной миры w' и средней яркости изображения L' достаточно хорошо аппроксимируется формулой $M(v') = \mu \exp(\xi v'^2)$ с параметрами μ и ξ , зависящими от значений w' и L' . Для средних угловых размеров изображения миры w' , равных 0,15, 0,5 и 1° , соответствующих обнаружению, классификации и идентификации объектов, параметры μ и ξ при различных значениях средней яркости изображения L' принимают значения, приведенные в табл. 7.

Таблица 7

Задача вскрытия	Параметр	$L', \text{кд/м}^2$					
		0,6	1	3	10	30	100
Обнаружение	μ	0,090	0,075	0,053	0,036	0,026	0,021
	ξ	0,005	0,004	0,0025	0,0015	0,00096	0,0006
Классификация	μ	0,032	0,027	0,019	0,014	0,010	0,0084
	ξ	0,0062	0,0052	0,0036	0,0026	0,0018	0,0015
Идентификация	μ	0,019	0,016	0,012	0,008	0,0053	0,0042
	ξ	0,0075	0,0065	0,0049	0,0035	0,0028	0,0023

Таким образом, относительную ЯЧХ $Y(x)$ можно описать формулой [7]

$$Y(x) = \frac{|\Delta r_{\text{эф}}| \tau_a K_M}{\Delta r_M} = \frac{\pi M(x)}{4K(x)} = \frac{\pi \mu}{4} \exp \left[\left(\left(\frac{305\xi}{\Gamma^2 \delta^2} \right) + 6 \right) x^2 \right]; K_M = \frac{L'_2 - L'_1}{L'_2 + L'_1}, \quad (23)$$

где Δr_M — диапазон регистрируемой разности коэффициентов яркости, соответствующий рабочему диапазону яркости монитора $\Delta L'_M = L'_2 - L'_1$, кд/м²; K_M — коэффициент сохранения контраста для протяженного объекта, определяемый диапазоном $\Delta L'_M$, обычно близкий к 0,95.

Значение Δr_M при поиске и обнаружении объектов, возможно расположенных на горбах и впадинах яркостных фоновых неоднородностей, должно, по аналогии с тепловизионными приборами [6], составлять $\Delta r_M = \max(\Delta r_{\text{max}}, 6|\Delta r_{\text{эф}}|)$, где Δr_{max} — максимальный перепад интегральных коэффициентов яркости фоновых неоднородностей в диапазоне $\Delta \lambda$.

Тогда, решая уравнение (23) относительно x , находим выражение для разрешения на местности A :

$$A = \frac{D\delta_\Sigma}{2x} = D\delta_\Sigma \left[\frac{1,5 + 85\xi\delta_0^2/(\kappa\delta_\Sigma)^2}{\ln(1,2|\Delta r_{\text{эф}}|\tau_a/\Delta r_M\mu)} \right]^{1/2}. \quad (24)$$

При вскрытии объекта с известным местоположением, в том числе при распознавании уже обнаруженного объекта, фоновые неоднородности роли практически не играют и оператор может подобрать яркость и контраст изображения объектов так, чтобы диапазон Δr_M принял оптимальное значение [6]: $\Delta r_M = 6|\Delta r_{\text{эф}}|\tau_a$. Тогда вместо (24) получаем

$$A = D\delta_\Sigma \sqrt{\frac{1,5 + 85\xi\delta_0^2/(\kappa\delta_\Sigma)^2}{\ln(0,2/\mu)}}. \quad (25)$$

Поскольку контраст изображения объекта здесь остается постоянным независимо от значений $\Delta r_{\text{эф}}$ и τ_a , разрешение на местности ТК, работающих в контрастно-ограниченном режиме, от них также не зависит. Если не известно, в каком режиме — контрастно-ограниченном или шумоограниченном — работает ТК, то следует рассчитать разрешение на местности для обоих вариантов и выбрать из них наибольшее. Найденные по (15), (24) или (25) значения A определяют согласно (11) вероятность вскрытия объекта.

Пример. Требуется оценить посредством внутрикабинной ТК, работающей в видимом диапазоне спектра, вероятность обнаружения и классификации оператором, имеющим среднюю квалификацию, вертолета с критическим размером $h_{06} = 3$ м, покрытого зеленой эмалью, находящегося на лугу (коэффициенты яркости $r_{06} = 0,1$ и $r = 0,07$) и наблюдаемого в безоблачную погоду 30 мая в 15 ч в районе Москвы с дистанции $D = 3$ км при боковой подсветке Солнцем и метеорологической дальности видимости $S_M = 20$ км. ТК установлена на высоте $H = 10$ м = 0,01 км, использует фотоприемник формата 768×576 элементов с коэффициентом заполнения $\kappa = 0,9$, имеет элементарное поле зрения $\delta_0 = 0,1$ мрад и разрешающую способность $R = 400$ лин. Расчет производим в следующем порядке:

— по формуле (17) для номера дня года $d = 150$ находим склонение Солнца $\delta_s = 22^\circ$ и для широты Москвы $\varphi = 56^\circ$ его высоту $h_s = 42^\circ$;

— по формулам (16) и (18) рассчитываем облученность фона прямой и рассеянной солнечной радиацией $E_{\text{п}} = 558$ Вт/м², $E_{\text{р}} = 125$ Вт/м² и по формуле (21) его суммарную облученность $E_\Sigma = 683$ Вт/м²;

— по формуле (19) для угла места объекта $\psi \approx 0$ и солнечного азимута $\theta_s = 90^\circ$ рассчитываем угол между линией визирования и направлением на Солнце $\alpha_s = 90^\circ = 1,57$ рад;

— по формулам (19) и (20) рассчитываем для альбедо фона $\rho_s = 0,2$ облученность объекта прямой и рассеянной солнечной радиацией $E_{\text{п.об}} = 177$ Вт/м², $E_{\text{р.об}} = 131$ Вт/м² и по формуле (21) его суммарную облученность $E_{\Sigma\text{об}} = 308$ Вт/м²;

- по формуле (22) рассчитываем эффективную разность коэффициентов яркости объекта и фона $\Delta r_{\text{эф}} = -0,025$ и по формуле (10) эффективное элементарное поле зрения $\delta = 0,16$ мрад;
- установив по табл. 4 среднее значение структурной характеристики атмосферы $C_n = 5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$, рассчитываем по формуле (14) для средней длины волны $\lambda_0 = 0,55$ мкм эквивалентное элементарное поле зрения турбулентности $\delta_t = 0,056$ мрад и по формуле (13) результирующее элементарное поле зрения $\delta_{\Sigma} = 0,17$ мрад;
- по формуле (8) рассчитываем коэффициент пропускания атмосферы на трассе $\tau_a = 0,56$;
- приняв среднюю яркость изображения $L' = 30 \text{ кд/м}^2$, устанавливаем по табл. 7 параметры $\mu = 0,026$, $\xi = 0,00096$ при обнаружении объекта и $\mu = 0,01$, $\xi = 0,0018$ при его классификации;
- приняв для участка местности (луга) диапазон регистрируемой разности коэффициентов яркости $\Delta r_m = 0,2$, рассчитываем по формулам (24) и (25) разрешение на местности при обнаружении объекта $A = 0,58 \text{ м}$ и его классификации $A = 0,37 \text{ м}$;
- приняв показатель квалификации оператора $\gamma = 1$, рассчитываем по формуле (11) для критерия Джонсона $C = 1$ вероятность обнаружения объекта $P = 1$ и для $C = 3$ вероятность его классификации $P = 0,72$.

Закключение. Предложенная операциональная модель ТК воздушного и наземного базирования обеспечивает получение расчетных оценок вероятности обнаружения и распознавания объектов местности при работе ТК в зависимости от уровня естественной освещенности местности как в шумоограниченном, так и контрастно-ограниченном режиме. Эта модель учитывает все существенные факторы, от которых зависит эффективность ТК, и концептуально схожа с операциональной моделью современных цифровых тепловизионных приборов, что обуславливает возможность сопоставления соответствующих оценок вероятности вскрытия наземных объектов телевизионным и тепловизионным каналами оптико-электронной системы, которое необходимо для корректного прогнозирования эффективности всего комплекса аппаратуры наблюдения в широком диапазоне условий его применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сметков В. М. Экспресс-расчет дальности наблюдения телевизионной системы // Специальная техника. 2004. № 5. С. 13–16.
2. Шипунов А. Г., Семашкин Е. Н., Володикова Е. В. Дальность действия телевизионного канала с матричным фотоприемником // Оборонная техника. 2006. № 5–6. С. 78–81.
3. Дунаев А. С., Шлычков В. И. Расчет дальности наблюдения для активно-импульсной телевизионной системы // Оптич. журн. 2005. Т. 72, № 4. С. 48–51.
4. Гринкевич А. В. Особенности расчета дальности действия телевизионной системы в ночном режиме // Оптич. журн. 2004. Т. 71, № 10. С. 63–65.
5. Волков В. Г., Кошавцев Н. Ф. Модель расчета дальности действия низкоуровневого телевизионного оптико-электронного прибора наблюдения // Оптич. журн. 1996. Т. 63, № 6. С. 53–55.
6. Holst G. Electro-optical imaging system performance. SPIE press, 2003. 442 p.
7. Балоев В. А., Ильин Г. И., Овсянников В. А., Филиппов В. Л. Эффективность, помехозащищенность и помехоустойчивость видовых оптико-электронных систем. Казань: Изд-во КГТУ, 2015. 424 с.
8. Пустынский И. Н., Кирпиченко Ю. Р. К оценке чувствительности и разрешающей способности телевизионных датчиков // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 11. С. 5–9.
9. Вахромеева О. С., Манцетов А. А., Шиманская К. А. Характеристики чувствительности телевизионных камер на матричных приборах с зарядовой связью // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2004. № 4. С. 25–35.
10. Гейхман И. Л., Волков В. Г. Видение и безопасность. М.: Изд-во РАЕН, 2009. 840 с.
11. Грузевич Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения. М.: Физматлит, 2014. 276 с.
12. Грязин Г. Н. Оптико-электронные системы для обзора пространства: системы телевидения. Л.: Машиностроение, 1988. 224 с.
13. Соколов Б. З. Расчет спектральной яркости дневной атмосферы Земли // Измерительная техника. 2001. № 9. С. 40–43.
14. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 272 с.

15. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1980. 224 с.
16. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере. М.: Сов. радио, 1977. 368 с.
17. <http://speclib.jpl.nasa.gov>.
18. Бычков А. Н. О влиянии частотно-контрастной характеристики объектива и спектрального состава источника излучения на разрешающую способность телевизионного датчика // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 52–55.
19. Куликов А. Н. Реальная разрешающая способность телевизионной камеры // Специальная техника. 2002. № 2. С. 20–26.
20. Richardson P., Driggers R. Atmospheric turbulence effects on 3-rd generation FLIR performance // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6207. P. 620706-1–620706-11.
21. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 751 с.
22. Овсянников В. А., Овсянников Я. В. Оценка контрастной силы излучения воздушных объектов для наземной телевизионной аппаратуры // Авиакосмическое приборостроение. 2022. № 2. С. 3–12. DOI: 10.25791/aviakosmos.2.2022.1263.
23. Holst G. Optimum viewing distance for target acquisition // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9452. P. 94520K-1–94520K-7.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Владимир Александрович Овсянников** — д-р техн. наук; Государственный институт прикладной оптики; гл. научный сотрудник; E-mail: gipo@shvabe.com; jar_ovs@mail.ru
- Ярослав Владимирович Овсянников** — Государственный институт прикладной оптики; инженер-программист; E-mail: gipo@shvabe.com

Поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 21.05.2024; принята к публикации 23.07.2024.

REFERENCES

1. Smelkov V.M. *Spetsial'naya tekhnika*, 2004, no. 5, pp. 13–16. (in Russ.)
2. Shipunov A.G., Semashkin E.N., Volodikova E.V. *Oboronnaya tekhnika*, 2006, no. 5–6, pp. 78–81. (in Russ.)
3. Dynaev A.S. and Shlichkov V.I. *Journal of Optical Technology*, 2005, no. 4(72), pp. 330–333.
4. Grinkevich A.V. *Journal of Optical Technology*, 2004, no. 10(71), pp. 699–701.
5. Volkov V.G., Koshchavtsev N.F. *Opticheskii Zhurnal*, 1996, no. 6(63), pp. 53–55. (in Russ.)
6. Holst G. *Electro-optical imaging system performance*, US, SPIE press, 2003, 442 p.
7. Baloev V.A., Ilyin G.I., Ovsyannikov V.A., Filippov V.L. *Effektivnost', pomexhozashchishchennost' i pomekhoustoychivost' vidovykh optiko-elektronnykh system* (Efficiency, Noise Immunity and Noise Stability of Species-Specific Optical-Electronic Systems), Kazan, 2015, 424 p. (in Russ.)
8. Pustynsky I.N., Kirpichenko Yu.R. *Journal of Instrument Engineering*, 2005, no. 11(48), pp. 5–9. (in Russ.)
9. Vakhromeeva O.S., Mantsvetov A.A., Shimanskaya K.A. *Izv. vuzov. Radioelektronika*, 2004, no. 4, pp. 25–35. (in Russ.)
10. Geykhnman I.L., Volkov V.G. *Videniye i bezopasnost'* (Vision and Safety), Moscow, 2009, 840 p. (in Russ.)
11. Gruzevich Yu.K. *Optiko-elektronnyye pribory nochnogo videniya* (Optoelectronic Night Vision Devices), Moscow, 2014, 276 p. (in Russ.)
12. Gryazin G.N. *Optiko-elektronnyye sistemy dlya obzora prostranstva: sistemy televideniya* (Optical-electronic Systems for Space Surveillance: Television System), Leningrad, 1988, 224 p. (in Russ.)
13. Sokolov B.Z. *Izmeritel'naya tekhnika*, 2001, no. 9, pp. 40–43. (in Russ.)
14. Krinov E.L. *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnnykh obrazovaniy* (Spectral Reflectivity of Natural Formations), Moscow, 1947, 272 p. (in Russ.)
15. Novitsky L.A., Stepanov B.M. *Opticheskiye svoystva materialov pri nizkikh temperaturakh. Spravochnik* (Optical Properties of Materials at Low Temperatures. Handbook), Moscow, 1980, 224 p. (in Russ.)
16. Zuev V.E., Kabanov M.V. *Perenos opticheskikh signalov v zemnoy atmosfere* (Transfer of Optical Signals in the Earth's Atmosphere), Moscow, 1977, 368 p. (in Russ.)
17. <http://speclib.jpl.nasa.gov>.
18. Bychkov A.N. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 5(51), pp. 52–55. (in Russ.)
19. Kulikov A.N. *Spetsial'naya tekhnika*, 2002, no. 2, pp. 20–26. (in Russ.)
20. Richardson P., Driggers R. *Proc. SPIE*, 2006, vol. 6207, pp. 620706-1–620706-11.
21. Matveev L.T. *Kurs obshchey meteorologii* (General Meteorology Course), Leningrad, 1984, 751 p. (in Russ.)
22. Ovsyannikov V.A., Ovsyannikov Ya.V. *Aerospace Instrument-Making*, 2022, no. 2, pp. 3–12, DOI: 10.25791/aviakosmos.2.2022.1263. (in Russ.)
23. Holst G. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9452, pp. 94520K-1–94520K-7.

DATA ON AUTHORS

Vladimir A. Ovsyannikov— Dr. Sci.; State Institute of Applied Optics; Chief Researcher;
E-mail: gipo@shvabe.com; jar_ovs@mail.ru**Yaroslav V. Ovsyannikov**— State Institute of Applied Optics; Engineer-Programmer;
E-mail: gipo@shvabe.com

Received 28.03.2024; approved after reviewing 21.05.2024; accepted for publication 23.07.2024.

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОКОГЕРЕНТНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДА ПРИ РАБОТЕ В СКАНИРУЮЩЕМ РЕЖИМЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Е. Е. Майоров^{1*}, А. В. Арефьев¹, Р. Б. Гулиев¹, В. П. Пушкина¹, А. В. Дагаев²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

* majorov_ee@mail.ru

² Ивановгородский гуманитарно-технический институт (филиал)
Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения,
Ивангород, Россия

Аннотация. Представлен низкокогерентный интерферометрический зонд, работающий в сканирующем режиме измерений. Получены данные о рельефе поверхности при движении разработанного зонда и изменении разности хода опорного зеркала в плече интерферометра. Представлены функциональная схема оптического измерительного блока, сканирующий режим измерений, проанализирована обработка сигналов с фотоприемных устройств. Получены картина нерегулярных волновых фронтов при падении низкокогерентного излучения на негладкую поверхность, кривая интенсивности интерференционной картины при изменении рельефа поверхности вдоль оси OZ, а также результаты измерений амплитуды и огибающая интерференционного сигнала при расфокусировке.

Ключевые слова: интерференционный зонд, профиль, источник белого света, длина когерентности, шероховатость, ветвь интерферометра, амплитуда, огибающая

Ссылка для цитирования: Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Пушкина В. П., Дагаев А. В. Исследование низкокогерентного интерферометрического зонда при работе в сканирующем режиме измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 790–797. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-790-797.

STUDY OF A LOW-COHERENCE INTERFEROMETRIC PROBE OPERATING IN THE SCANNING MEASUREMENT MODE

E. E. Maiorov^{1*}, A. V. Arefiev¹, R. B. Guliyev¹, V. P. Pushkina¹, A.V. Dagaev²

¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

* majorov_ee@mail.ru

² Ivangorod Humanitarian and Technical Institute,
Branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Ivangorod, Russia

Abstract. A low-coherence interferometric probe operating in the scanning measurement mode is presented. Data on the surface relief during the movement of the developed probe and the change in the path difference of the reference mirror in the interferometer arm are obtained. The functional diagram of the optical measuring unit and the scanning measurement mode are described, and the processing of signals from photodetectors is analyzed. A pattern of irregular wave fronts when low-coherence radiation falls on a rough surface, an intensity curve of the interference pattern when the surface relief changes along the OZ axis, and the results of measuring the amplitude and the envelope of the interference signal during defocusing are obtained.

Keywords: interferometric probe, profile, white light source, coherence length, roughness, interferometer branch, amplitude, envelop

For citation: Maiorov E. E., Arefiev A. V., Guliyev R. B., Pushkina V. P., Dagaev A. V. Study of a low-coherence interferometric probe operating in the scanning measurement mode. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 9. P. 790–797 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-790-797.

Введение. Для определения высокоточных параметров — абсолютных значений отклонения профиля R_a и наибольшей высоты профиля R_z в пределах базовой длины шероховатой поверхности — используются разные средства и методы: визуальные, контактные, бескон-

тактные (см. [1–3]; ГОСТ 25142-82). В настоящее время визуальные методы реализованы в компараторах Rugotest, Clemtex и Keane-Tator, точность которых не хуже 50 мкм, а контактные методы — в профилометрах Mahr GmbH, Renishaw, Carl Zeiss, точность которых достигает 0,01 мкм [4–7].

Бесконтактные методы измерений, к которым относятся оптические и оптико-электронные, используются в научно-технических областях и промышленности [8, 9]. В частности, низкокогерентные интерферометры основаны на детальном анализе света, отраженного от исследуемой поверхности [10, 11]. В работах [8–16] исследуются суперлюминесцентные источники излучения, длина временной когерентности которой составляет 30 мкм, а также рассматривается триггерный режим измерений.

Разработка низкокогерентных интерферометров — новое направление в оптическом приборостроении и активно развивается последние 8–10 лет [14, 15]. Эти измерительные приборы просты в эксплуатации, имеют большой диапазон измерений, высокую точность и быстродействие, что позволяет отнести их к перспективным и актуальным средствам измерений. В [8–16] решены многие вопросы построения и эксплуатационных характеристик данных приборов, а также частично изучена зависимость метрологических параметров от геометрии освещения. В этой связи представляет интерес формирование искомым данным о шероховатости поверхности при электронной обработке сигналов в сканирующем режиме измерений.

Цель настоящей статьи — получение данных о рельефе поверхности при движении разработанного низкокогерентного интерференционного зонда и изменении разности хода опорного зеркала в плече интерферометра. Задачи исследования — проанализировать сканирующий режим измерений зонда и найти величину изменения рельефа для i -й точки относительно базовой поверхности; получить данные о шероховатости поверхности, обработав сигналы фотоприемников; экспериментально выявить изменение амплитуды сигнала при движении зондирующего луча по поверхности объекта.

Метод и объект исследования. Поскольку исследованию подлежал разработанный низкокогерентный интерференционный зонд (далее — зонд), то определение зависимостей шероховатости поверхности от технических характеристик зонда не изучалось. Поэтому в качестве объекта использовался корпус высокочастотного разъема, изготовленный из литейной латуни и покрытый хромом (30 мкм), поверхность которого относилась к пятому классу шероховатости ($R_a = 3,2$ мкм). Контролировалась аттестованная поверхность одного объекта.

Основа исследуемого зонда — двухлучевой интерферометр. В отличие от традиционного варианта интерферометра Майкельсона, в одной из ветвей (объектная ветвь) был установлен корпус высокочастотного разъема. В качестве источника излучения использовался источник белого света, чувствительность которого 0,03 мкм, а длина когерентности $l_c = 1$ мкм. В конструкции зонда предусмотрена возможность замены в опорной ветви опорного зеркала на голографическую дифракционную решетку.

Как известно из научной литературы, когерентноограниченные или низкокогерентные приборы, устройства, радары измерения рельефа поверхности основаны на анализе отраженной от рельефа составляющей светового излучения. Суть этих технических средств в том, чтобы получить контрастную картину в пределах длины когерентности при равенстве оптических длин в ветвях интерферометра.

Рассмотрим оптический измерительный блок зонда, который содержит интерферометр Майкельсона. Функциональная схема блока показана на рис. 1, где S — источник белого света, D — приемник излучения, I — светоделитель, 2 — исследуемая поверхность, 3 — зеркало в опорной ветви.

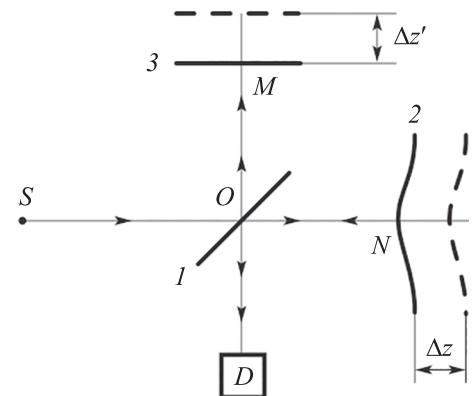


Рис. 1

При достижении равенства оптических длин в ветвях OM и ON фоторегистрирующее устройство фиксирует этот факт и передает сигнал на аналогово-цифровое устройство. Далее цифровой сигнал поступает в компьютер, и на мониторе появляется возможность наблюдать контрастную интерференционную картину. Как только рельеф поверхности начинает меняться на величину Δz , то контраст интерференционной картины начинает снижаться, так как $2\Delta z > l_c$. Если компенсировать опорное зеркало 3 на величину $\Delta z' = \Delta z$, то контраст восстановится. Поэтому любое изменение рельефа поверхности при перемещении относительно зонда можно компенсировать движением опорного зеркала. На рис. 2 показана функциональная схема разработанного зонда, где 1, 15 — суперлюминесцентные диоды; 2 — микрообъектив; 3, 8 — светоделители; 4 — объект; 5, 7, 9, 10, 11 — зеркала; 6, 14, 16 — фотоприемники (ФП); 12 — модулятор; 13 — дифракционные решетки; 17 — датчик скорости; 18 — блок электронной обработки сигналов.

В представленной разработке начало отсчета определяется с помощью второго интерферометра Майкельсона, образованного светоделителем 8, зеркалом 10 и общим для двух интер-

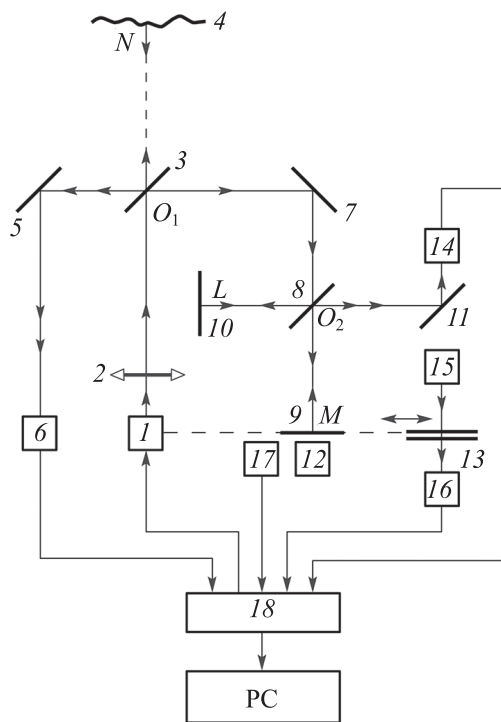


Рис. 2

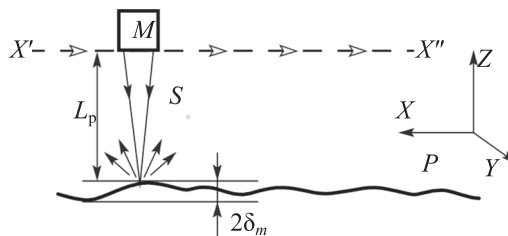


Рис. 3

ферометров сканирующим зеркалом 9. Начало отсчета соответствует максимуму сигнала ФП 14, наблюдаемого в момент равенства длин плеч O_2L и O_2M . Этот сигнал является опорным: относительно него отсчитывается временное положение максимума информационного сигнала ФП 6. Зонд позволяет измерять относительное расстояние до объекта. Искомая информация содержится во временном интервале между максимумами сигналов ФП 6 и 14. Этот интервал определяется путем подсчета импульсов ФП 16 при сканировании дифракционных решеток 13.

Компенсационное изменение разности хода в ветвях интерферометра лежит в основе сканирующего режима измерений.

Результаты эксперимента. Суть сканирующего режима измерений, предназначенного для контроля поверхности объекта, отображена на рис. 3, где M — оптико-измерительный блок, P — исследуемая поверхность, S — световой луч, $X'X''$ — направление перемещения.

В процессе измерений оптико-измерительный блок M находился на расстоянии L_p от выходного зрачка блока до поверхности; L_p — среднее расстояние и определяется параметрами оптической системы, а также вариацией высоты рельефа δ_m . При измерениях исследуемый объект приводится в движение относительно измерительного блока. При перемещении объекта в блоке модулировалась разность хода посредством движения опорного зеркала и выявлялись моменты нулевой разности хода. В результате

$$\Delta z = f(x_i, y_i),$$

где $\Delta z = \Delta z'$; $\Delta z'$ — изменение рельефа в i -й точке; x_i, y_i — координаты проекции светового луча для i -й точки.

Данные о шероховатости поверхности были получены после обработки сигналов, поступающих с фотоприемных устройств 6, 14, 16. Алгоритм электронной обработки сигналов представлен на рис. 4. Сигналы с ФП 6, 14 проходят через идентичные каналы, в которых про-

изводится их предварительное и резонансное усиление на доплеровской частоте. Далее сигналы детектируются и после фильтрации нижних частот формируют огибающие объектной U и опорной U_0 волн. После математической обработки сигналы U_d и U_{0d} поступают на компараторы и с компараторов снимаются импульсы U_k и U_{0k} , где задний фронт соответствует максимальному значению U и U_0 . По сигналам U_k и U_{0k} триггерный блок создает меандр U_Δ , определяющий временной интервал между объектным и опорным сигналами. Далее U_Δ и U_N (с ФП 6) подаются на схему совпадения и снимаются импульсы U_{NZ} , соответствующие искомой величине.

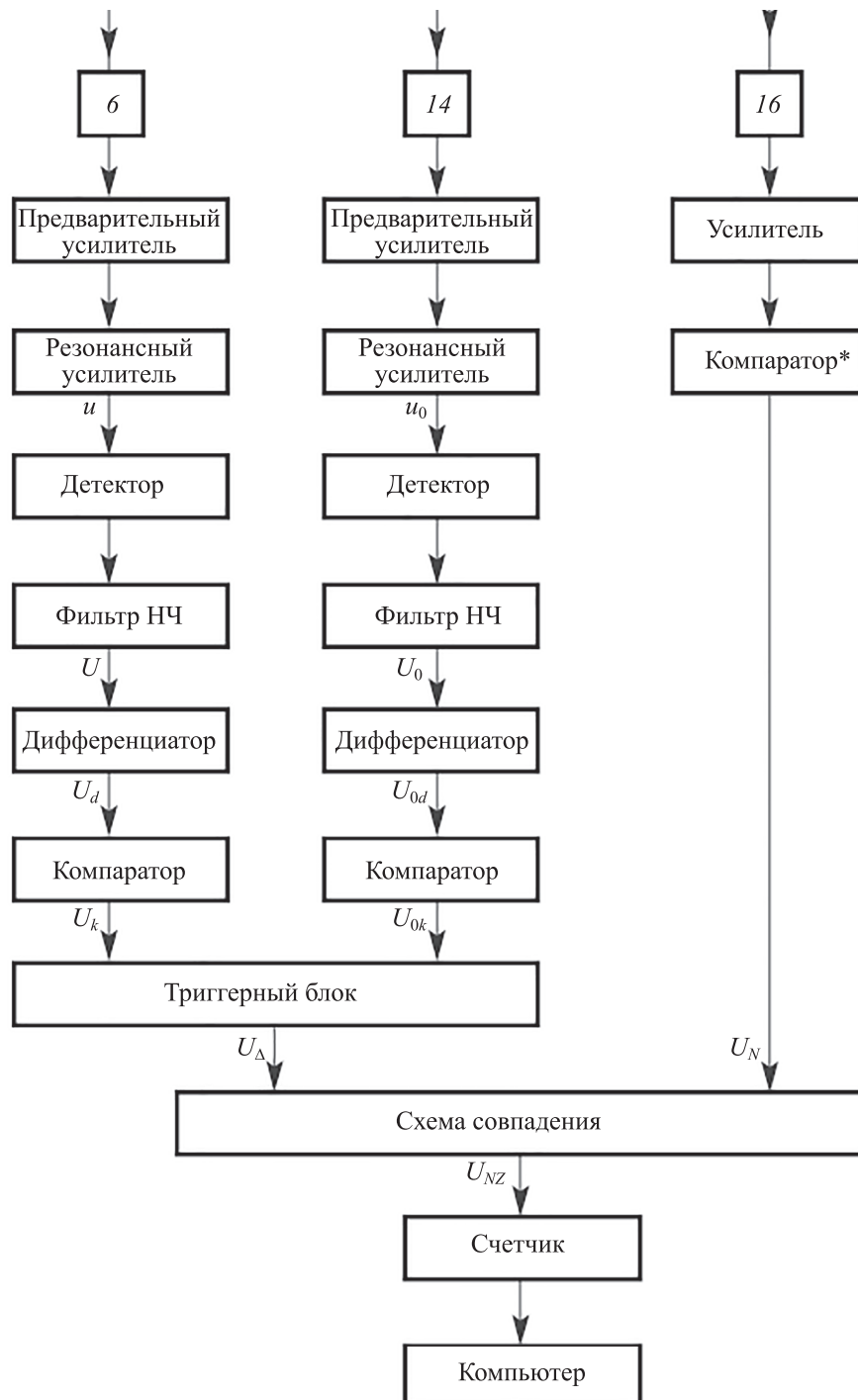


Рис. 4

При контроле рельефа поверхности объекта было зафиксировано наблюдаемое изображение (рис. 5, а). Интерференционная картина представлена спекл-структурой (картиной нерегулярных волновых фронтов при падении когерентного излучения на негладкую поверхность).

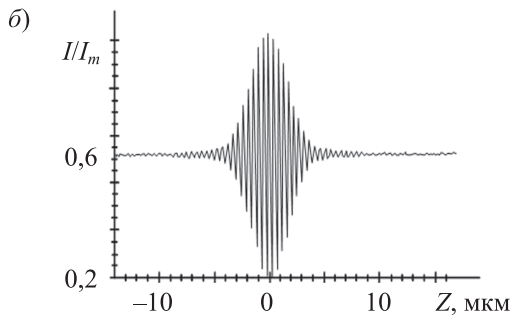
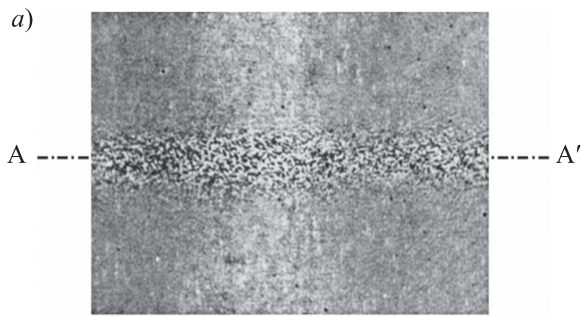


Рис. 5

Появление спеклов ведет к случайным изменениям фазы, а значит, расчет фазовых характеристик проводить было нецелесообразно. Спекл-структура локализована вдоль направления $A-A'$. Именно эта область шероховатой поверхности появилась на мониторе за счет равенства длин в объектной и опорной ветвях интерферометра в пределах длины когерентности.

Также была получена кривая интенсивности интерференционной картины при изменении рельефа поверхности вдоль оси OZ (рис. 5, б): как видно, интенсивность достигает максимума при $\Delta z' = \Delta z$.

В ходе исследования рассмотрены амплитуда и огибающая интерференционного сигнала, так как они являются значимыми параметрами зонда. Эти параметры отвечают за помехозащищенность измерений, величину полезного сигнала, изменение амплитуды и огибающей сигнала. Контроль проводился при следующих технических параметрах разработанного зонда:

— погрешность измерений:

$\sigma_z = (0,03 \dots 0,1) l_c$ — для $\sigma = 0 \dots 15^\circ$;

$\sigma_z = (0,3 \dots 0,8) l_c$ — для $\sigma = 30 \dots 45^\circ$ (σ — СКО);

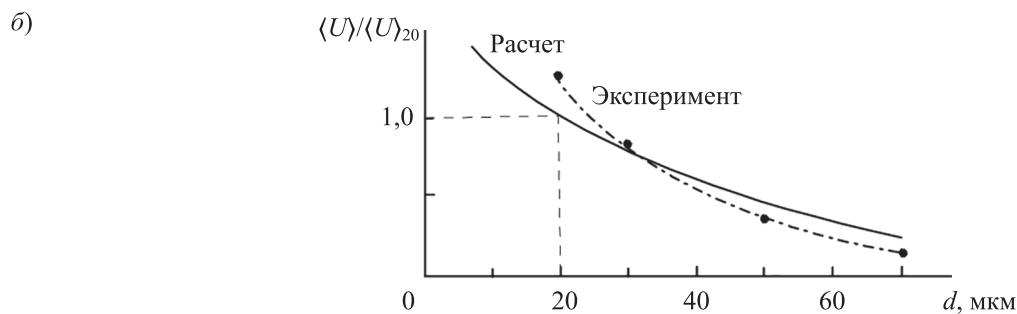
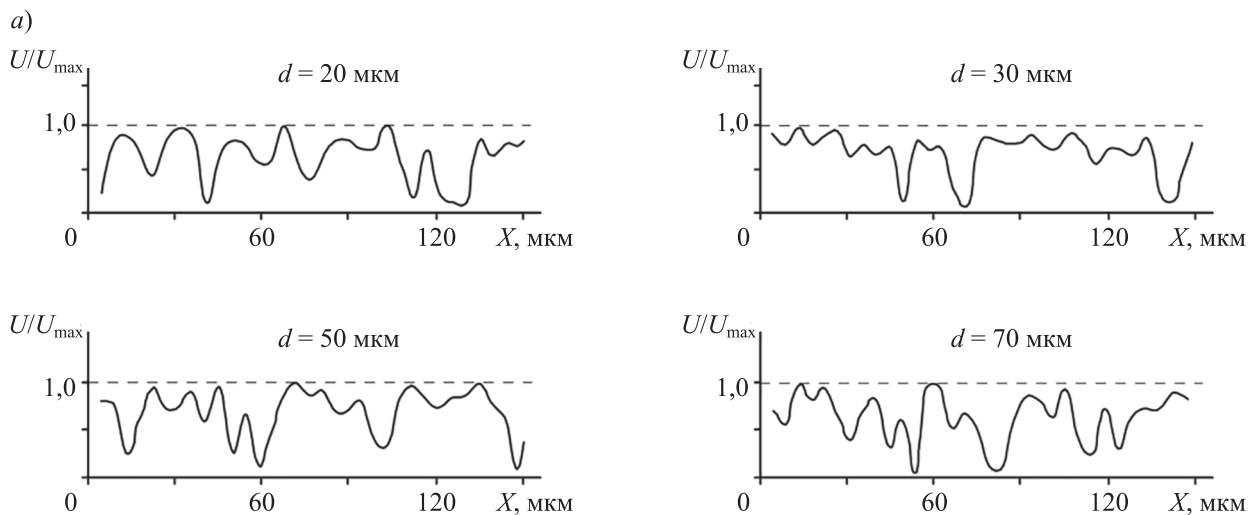


Рис. 6

- диапазон измерений рельефа поверхности — 0...2 мм;
- частота измерений — 46 т/с;
- диаметр пятна на поверхности — 20 мкм;
- среднее расстояние от оптической головки до объекта — 100 мм.

Поверхность корпуса высокочастотного разъема фиксировалась на рабочей плоскости микрометрического столика ST-111. В ходе эксперимента диаметр светового пятна (d) изменялся посредством стеклянных пластинок толщиной 2, 3, 4 мм, что соответствовало d , равному 30, 50, 70 мкм. Результаты эксперимента по исследованию амплитуды интерференционного сигнала при движении светового луча по поверхности (рис. 6, а) демонстрируют наличие деформации огибающих. Это связано со сложением некоррелированных составляющих спекл-структур, амплитуды которых различаются, что ведет к дополнительным изменениям амплитуды выходного сигнала. Среднее значение амплитуды от расфокусировки (увеличение диаметра светового пятна на поверхности) представлено графиком на рис. 6, б.

Заключение. Исследована поверхность корпуса высокочастотного разъема и зарегистрировано изображение контраста интерференционной картины, которое представлено спекл-структурой поля. Получена форма кривой интенсивности интерференционного сигнала при изменении рельефа поверхности и определен максимум интенсивности при $\Delta z' = \Delta z$. Измерены амплитуда и огибающая интерференционного сигнала. Показано, что при увеличении диаметра светового пятна растет амплитуда и деформируется огибающая и, как следствие, снижается точность измерений. Приведенные результаты значимы для производителей данного типа интерферометрических устройств контроля объектов сложной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Франсон М., Сланский С. Когерентность в оптике / Пер. с франц.; под ред. К. С. Шифрина. М.: Наука, 1967. 80 с.
3. Котов И. Р., Ситник Д. Н., Хопов В. В. Гетеродинамная голографическая и спекл-интерферометрия // Прикладная физическая оптика: Сб. науч. трудов. М.: МЭИ, 1987. № 134. С. 113–115.
4. Островский Ю. И., Танин Л. В. Перестраиваемый лазер на органическом красителе для резонансной интерферометрии и голографии // Журнал технической физики. 1975. Т. 45, № 8. С. 1756–1766.
5. Франсон М. Оптика спеклов / Пер. с франц.; под ред. Ю. И. Островского. М.: Мир, 1980. 171 с.
6. Коломийцев Ю. В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
7. Клименко Н. С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 224 с.
8. Хохлова М. В., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Громов О. В. Интерференционная система измерения геометрических параметров отражающих поверхностей // Международный науч.-исслед. журнал. 2021. № 6 (108). С. 184–189.
9. Хохлова М. В., Арефьев А. В., Майоров Е. Е., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Громов О. В. Экспериментальное исследование метрологических характеристик разработанного оптического шупа триггерного типа // Приборы. 2021. № 5. С. 8–16.
10. Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Таюрская И. С. Экспериментальное исследование разработанной интерференционной системы для измерений поверхности объектов сложной формы // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. № 8. С. 179–189.
11. Бородинский Ю. М., Майоров Е. Е., Петрова Е. А., Попова Е. В., Курлов В. В., Удахина С. В. Измерение геометрических параметров поверхностей сложной формы низкокогерентной оптической системой // Приборы. 2022. № 5 (263). С. 3–7.
12. Майоров Е. Е., Колесниченко С. В., Константинова А. А., Машек А. Ч., Писарева Е. А., Цыганкова Г. А. Исследование флуктуаций фазы выходного сигнала системы фазовых измерений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 9. С. 1–6.
13. Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Костин Г. А. Применение высокочувствительных фотоматериалов на основе галогенидов серебра для исследования влияния отклонений подложек спеклограмм на результаты измерений // Приборы. 2023. № 5. (275). С. 51–54.

14. Костин Г. А., Черняк Т. А., Майоров Е. Е. Экспериментальное исследование фазоизмерительной установки обработки спеклограмм // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 4. С. 109–112. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-109-112.
15. Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А. Реализация метода спекл-фотографии для контроля диффузно отражающих поверхностей объектов // Научное приборостроение. 2023. Т. 33, № 2. С. 75–83.
16. Майоров Е. Е. Исследование сложных форм поверхностей когерентно ограниченной во времени системой // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сб. докл. Четвертая Всерос. науч. конф. Санкт-Петербург, 18–22 апр. 2023 г. СПб: ГУАП, 2023. С. 65–68.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- | | |
|---------------------------------------|--|
| Евгений Евгеньевич Майоров | — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru |
| Александр Владимирович Арефьев | — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики, E-mail: aaref@yandex.ru |
| Рамиз Балахан оглы Гулиев | — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра прикладной математики; E-mail: ramiz63@yandex.ru |
| Вера Павловна Пушкина | канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра высшей математики и механики; E-mail: vera150465@yandex.ru |
| Александр Владимирович Дагаев | канд. техн. наук, доцент; Ивангородский гуманитарно-технический институт (филиал) Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, кафедра математики, информатики и информационных таможенных технологий, E-mail: adagaev@list.ru |

Поступила в редакцию 14.12.2023; одобрена после рецензирования 12.01.2024; принята к публикации 23.07.2024.

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1959.
2. Francon M., Slansky S. *Coherence en optique*, 1965.
3. Kotov I.R., Sitnik D.N., Khopov V.V. *Prikladnaya fizicheskaya optika* (Applied Physical Optics: Collection of Scientific Papers), Moscow, 1987, no. 134, pp. 113–115. (in Russ.)
4. Ostrovsky Yu.I., Tanin L.V. *Technical Physics*, 1975, no. 8(45), pp. 1756–1766. (in Russ.)
5. Francon M. *La granularite laser* (spekle) et ses applications en optique, Paris etc., 1978.
6. Kolomiitsev Yu.V. *Interferometry* (Interferometers), Leningrad, 1976, 296 p. (in Russ.)
7. Klimenko N.S. *Golografiya sfokusirovannykh izobrazheniy i spekl-interferometriya* (Holography of Focused Images and Speckle Interferometry), Moscow, 1985, 224 p. (in Russ.)
8. Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Arefyev A.V., Guliev R.B., Mayorov E.E., Gromov O.V. *Mezhdunarodnyj naučnoissledovatel'skij zhurnal* (International Research Journal), 2021, no. 6(108), pp. 184–189, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.029>. (in Russ.)
9. Khokhlova M.V., Arefyev A.V., Mayorov E.E., Guliev R.B., Dagaev A.V., Gromov O.V. *Pribory*, 2021, no. 5, pp. 8–16 (in Russ.)
10. Kurlov V.V., Kotskovich V.B., Mayorov E.E., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2020, no. 8, pp. 179–189. (in Russ.)
11. Borodyansky Yu.M., Mayorov E.E., Petrova E.A., Popova E.V., Kurlov V.V., Udakhina S.V. *Pribory*, 2022, no. 5(263), pp. 3–7 (in Russ.)
12. Mayorov E.E., Kolesnichenko S.V., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Pisareva E.A., Tsygankova G.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2021, no. 9, pp. 1–6. (in Russ.)
13. Mayorov E.E., Chernyak T.A., Kostin G.A. *Pribory*, 2023, no. 5(275), pp. 51–54. (in Russ.)
14. Kostin G.A., Chernyak T.A., Mayorov E.E. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2023, no. 4, pp. 109–112, DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-109-112. (in Russ.)
15. Mayorov E.E., Kostin G.A., Chernyak T.A. *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation) 2023, no. 2(33), pp. 75–83. (in Russ.)
16. Mayorov E.E. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem* (Modeling and Situational Quality Management of Complex Systems), Fourth All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18–22, 2023, pp. 65–68. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Evgeny E. Maiorov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics;
E-mail: maiorov_ee@mail.ru
- Alexander V. Arefiev** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics;
E-mail: aaref@yandex.ru
- Ramiz B. Guliyev** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics;
E-mail: ramiz63@yandex.ru
- Vera P. Pushkina** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Higher Mathematics and Mechanics;
E-mail: vera150465@yandex.ru
- Alexander V. Dagaev** — PhD, Associate Professor; Ivangorod Humanitarian and Technical Institute — Branch of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Mathematics, Informatics and information Customs Technologies; E-mail: adagaev@list.ru

Received 14.12.2023; approved after reviewing 12.01.2024; accepted for publication 23.07.2024.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕНТГЕНОКОНТРАСТНОГО ВЕЩЕСТВА В ПРОСВЕТЕ И СТЕНКЕ БРЮШНОЙ АОРТЫ ПО ДАННЫМ КТ-АНГИОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

М. Р. Коденко^{1,2*}, Ю. А. Васильев¹, Н. С. Кульберг², А. В. Самородов², Р. В. Решетников¹

¹ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий
Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия,

* m.r.kodenko@yandex.ru

Аннотация. Представлен подход к аппроксимации и анализу компонента сигнала КТ-плотности, ассоциированного с внутрисосудистым рентгеноконтрастным веществом (РКВ) по данным компьютерно-томографических ангиографических (КТА) изображений брюшного отдела аорты. Цель работы — исследование возможности извлечения и анализа РКВ-индуцированного компонента в просвете и стенке брюшного отдела аорты на КТА-изображении. Предложен функционал для описания одномерного и двумерного распределения РКВ в виде набора сумм сигмоидов специального вида. Для аппроксимации использован метод нелинейных наименьших квадратов с оптимизацией Левенберга — Марквардта. Тестирование алгоритма проведено на открытом наборе данных, состоящем из 594 КТА-изображений. Подготовка данных проведена с помощью специализированного программного обеспечения Slicer 3D. Результаты демонстрируют отсутствие статистически значимых различий значений КТ-плотности между исходными изображениями и результатами аппроксимации ($p > 0,05$, парный тест Вилкоксона). Продемонстрирована чувствительность модели к различному распределению РКВ в области аневризмы, тромбоза и отхождения магистральных артерий. Чувствительность определена как наличие статистически значимых различий расчетных параметров модели для области однородного и неоднородного распределения РКВ в рамках каждого из КТ-исследований. Значения среднеквадратической ошибки аппроксимации для указанных областей статистически значимо не отличаются и унимодально распределены ($p > 0,7$) в рамках отдельно взятого КТ-исследования. Предложенный подход может быть полезен для персонализации КТА, развития алгоритмов обработки КТА-данных, синтеза бесконтрастных КТ-данных, обучения алгоритмов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: компьютерная томография, ангиография, обработка изображений, контрастное вещество, моделирование, КТ-плотность, искусственный интеллект

Благодарности: работа выполнена в рамках НИОКР (№ ЕГИСУ: 123031500002-1) в соответствии с Приказом от 21.12.2022 г. № 1196 „Об утверждении государственных заданий, финансовое обеспечение которых осуществляется за счет средств бюджета города Москвы, государственным бюджетным (автономным) учреждениям, подведомственным Департаменту здравоохранения города Москвы, на 2023 год и плановый период 2024 и 2025 годов“; авторы выражают благодарность сотрудникам НПКЦ ДиТ ДЗМ, врачам-рентгенологам И. А. Блохину и А. В. Соловьеву.

Ссылка для цитирования: Коденко М. Р., Васильев Ю. А., Кульберг Н. С., Самородов А. В., Решетников Р. В. Распределение рентгеноконтрастного вещества в просвете и стенке брюшной аорты по данным КТ-ангиографического исследования // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 9. С. 798–812. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-798-812.

**CONTRAST AGENT DISTRIBUTION IN THE LUMEN AND WALL OF THE ABDOMINAL AORTA
ACCORDING TO CT-ANGIOGRAPHIC STUDY DATA****M. R. Kodenko^{1,2*}, Yu. A. Vasiliev¹, N. S. Kulberg², A. V. Samorodov¹, R. V. Reshetnikov¹**¹ *Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies,
Department of Health Care of Moscow, Moscow, Russia*² *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia** *m.r.kodenko@yandex.ru*

Abstract. An approach to the approximation and analysis of the CT density signal component associated with intravascular radiocontrast agent (RCA) based on computed tomography angiography (CTA) images of the abdominal aorta is presented. The aim of the work is to study the possibility of extracting and analyzing the RCA-induced component in the lumen and wall of the abdominal aorta on the CTA image. A functionality for describing one-dimensional and two-dimensional distribution of the CTA as a set of sums of sigmoid of a special type is proposed. The nonlinear least squares method with Levenberg – Marquardt optimization is used for approximation. The algorithm is tested on an open data set consisting of 594 CTA images. Data preparation is performed using specialized software Slicer 3D. The results demonstrate the absence of statistically significant differences in the CTA density values between the original images and the approximation results ($p > 0.05$, paired Wilcoxon test). The sensitivity of the model to different distributions of the RCA in the area of aneurysm, thrombosis and origin of the main arteries is demonstrated. Sensitivity is defined as the presence of statistically significant differences in the calculated parameters of the model for the area of homogeneous and non-homogeneous distribution of the RCA within each of the CT studies. The values of the root-mean-square approximation error for the specified areas do not differ statistically significantly and are unimodally distributed ($p > 0.7$) within a single CT study. The proposed approach can be useful for personalizing CTA, developing algorithms for processing CTA data, synthesizing non-contrast CT data, and training artificial intelligence algorithms.

Acknowledgments: this paper was prepared by a group of authors as a part of the research and development effort titled “Development of software for automated generation of data sets containing synthetic native-phase CT studies to train and validate AI algorithms” (USIS No. 123031500002-1); the authors express gratitude to the employees of the Scientific and Practical Center for Diagnostics and Tractology of the Moscow Department of Healthcare, radiologists I. A. Blokhin, A. V. Soloviev.

Keywords: computed tomography, angiography, image processing, contrast agent, modeling, X-ray density, artificial intelligence

For citation: Kodenko M. R., Vasiliev Yu. A., Kulberg N. S., Samorodov A. V., Reshetnikov R. V. Contrast agent distribution in the lumen and wall of the abdominal aorta according to CT-angiographic study data. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 9. P. 798–812 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-9-798-812.

Введение. Компьютерная томографическая ангиография (КТА) является золотым стандартом предоперационной диагностики патологий брюшной аорты [1, 2]. При этом данные рутинных КТА-исследований обычно используют для определения геометрических характеристик сосуда в ходе стандартного анализа томограмм либо трехмерной реконструкции томограмм [3]. Впрочем, параметры КТ-изображения [4] позволяют проводить более детальный анализ распределения рентгеноконтрастного вещества (РКВ) в просвете и стенке сосудов, востребованный для диагностики различных сосудистых патологий [5]. При рутинном анализе КТА-изображений имеет место как субъективный визуальный анализ однородности распределения РКВ, так и использование объективных количественных метрик, в частности соотношений сигнал/шум и контраст/шум [6]. Анализ распределения РКВ как самостоятельных изолированных данных, в свою очередь, востребован для задач нейросетевой генерации изображений [7], повышения диагностической информативности [8] и оптимизации протокола [9] диагностического исследования. Каждое из этих направлений имеет собственную практическую значимость, однако их объединяет потребность в поиске инструментов для извлечения и анализа пространственного распределения РКВ.

Для решения данной задачи используют главным образом модели глубокого обучения на основе сетей генеративно-состязательного типа (GAN), такие как метод синтеза КТА-подобных изображений на основе неконтрастных КТ-изображений [7]. Так называемый „виртуальный контраст“ позволяет искусственно получить контрастное усиление, за счет чего можно не только снизить лучевую нагрузку, но и избежать аллергических реакций,

ассоциированных с применением РКВ [10]. Несмотря на потенциал данного подхода, его применение в клинической практике требует решения проблем размытости изображения и несоответствия синтетических и реальных изображений [11]. Кроме того, к основным недостаткам следует отнести зависимость результатов от обучающих данных [12] при недостаточной стандартизации предметной области [13]. Указанные недостатки ограничивают область использования таких данных при визуальном анализе.

В настоящей статье представлен подход к извлечению и анализу распределения РКВ в просвете и стенке артериального сосуда на примере брюшного отдела аорты. Предложенный подход заключается в аппроксимации КТА-данных с помощью оригинальной математической модели, что позволяет использовать объективные численные метрики для оценки качества получаемых данных, а также дополнить визуальный анализ расчетными параметрами.

Материалы и методы. Представленное исследование является частью проекта, посвященного анализу КТА-данных сердечно-сосудистой системы [14–18]. Работа с данными организована в соответствии с методологией MI-CLAIM [19] и рекомендациями по формированию наборов данных для обучения и тестирования алгоритмов на основе искусственного интеллекта (ИИ) [20]. *Гипотеза исследования:* разработанный подход позволяет извлекать и анализировать РКВ-индуцированный компонент сигнала КТ-плотности брюшного отдела аорты. *Дизайн исследования* — ретроспективный анализ данных КТА. *Критерии включения:* наличие артериальной фазы сканирования в исследовании; толщина срезов не более 1,5 мм; наличие исследований с диагностированной аневризмой брюшного отдела аорты (код МКБ10 I71 [21]). *Критерии исключения:* наличие областей диссекции (расслоения) сосуда, внутрисосудистых стентов или протезов. *Источник данных:* „Набор данных КТ-ангиографии с наличием признаков аневризмы брюшного отдела аорты“, представленный в открытом доступе [22].

Подготовка данных. На подготовительном этапе была проведена разметка данных КТА органов брюшной полости [23, 24]. Целевой областью „интереса“ (Region of Interest — ROI) является аорта, состоящая из просвета и стенки (рис. 1, а). Обработка данных была выполнена с использованием программного обеспечения 3D Slicer версии 3.0.2 [25]. Для получения области просвета (рис. 1, б) была выполнена полуавтоматическая сегментация врачом-рентгенологом с трехлетним опытом работы. Область аорты в аксиальном направлении была определена в ходе разметки как участок между диафрагмой и бифуркацией на подвздошные артерии. Расширенная область (рис. 1, в) сформирована путем радиального расширения (радиус 2 мм) первичной области. Исходные данные были получены в формате DICOM, для обработки, хранения и экспорта данных был использован формат NIfTI [26].

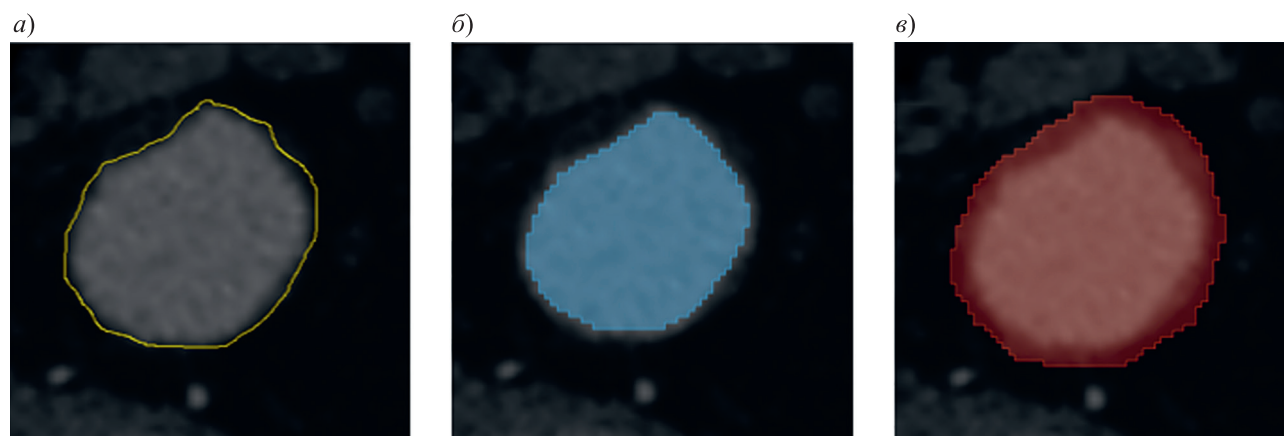


Рис. 1

Математическая модель. Основа разработанной модели — ранее опубликованные результаты предварительных исследований, согласно которым сигнал КТ-плотности в просвете и стенке аорты на КТА-изображении содержит статистически значимый ($p < 0,001$, WAVK-тест)

немонотонный РКВ-индуцированный тренд [18]. В данной работе основное внимание уделено самой функции и ее использованию для анализа распределения РКВ в просвете и стенке сосуда. КТ-сигнал ROI во фронтальном и сагиттальном направлениях аксиальной проекции КТА-изображения имеет прямоугольную форму со сглаженными краями и зашумленным плато (рис. 2, а, заштрихованная область). Амплитуда сигнала $F(x)$ зависит от значения КТ-плотности РКВ, которое колеблется в пределах 100–500 HU [27].

Для аппроксимации РКВ-сигнала предложена функция (рис. 2, б), аналитически заданная суммой двух встречных симметричных сигмоидов выпукло-вогнутой формы [18]:

$$F(x) = F_0 - a \left(\frac{1}{(1 + \exp(bx - c))} - \frac{1}{(1 + \exp(dx - e))} \right), \quad (1)$$

где F_0 – уровень сигнала вне области сосуда; a – амплитуда сигнала; b , c , d и e определяют положение и наклон фронтов.

К числу расчетных параметров модели относятся: углы наклона фронтов, ширина переходной зоны фронта, ширина плато.

Координаты точки перегиба (ip — inflection point) для нарастающего (ip_{rising}) и спадающего (ip_{falling}) фронтов определяются как

$$\left. \begin{aligned} ip_{\text{rising}} & \left(\frac{c}{b}; F_0 + \frac{a}{2} \right), \\ ip_{\text{falling}} & \left(\frac{e}{d}; F_0 + \frac{a}{2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Производная каждого из сигмоидов достигает максимума в точке перегиба, поэтому тангенс угла наклона линейной части фронта в этой точке может быть рассчитан как

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \left. \frac{df_{\text{rising}}}{dx} \right|_{x=ip_{\text{rising}}} = \frac{ab}{4}, \\ \operatorname{tg} \beta &= \left. \frac{df_{\text{falling}}}{dx} \right|_{x=ip_{\text{falling}}} = -\frac{ad}{4}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

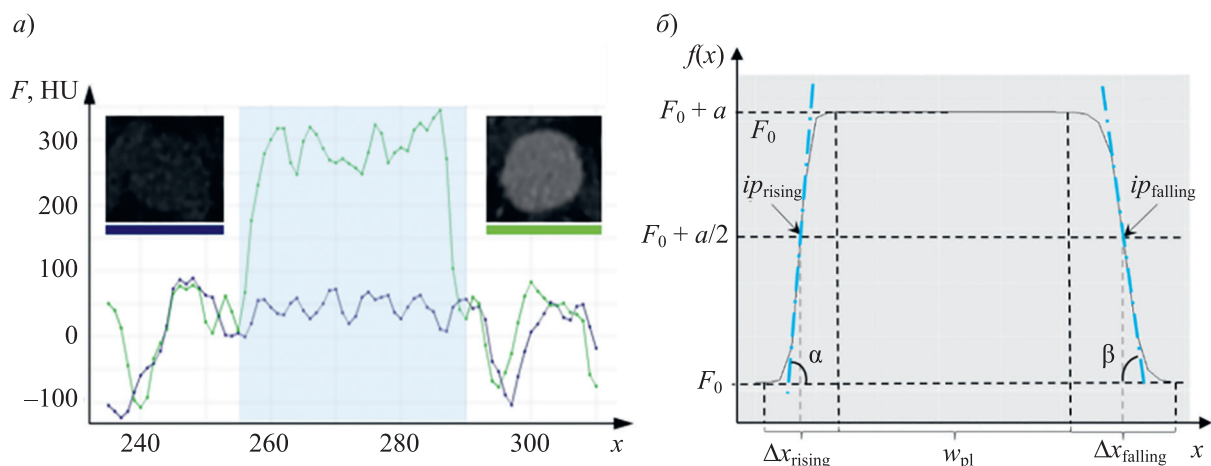


Рис. 2

Ширина переходной зоны для нарастающего и спадающего фронтов функции определяется как

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{\text{rising}} &= 2 \frac{\theta}{b} \approx \frac{12,42}{b}, \\ \Delta x_{\text{falling}} &= 2 \frac{\theta}{d} \approx \frac{12,42}{d}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\theta = 6,21$ — некоторая константа [18].

Ширина плато соответствует полной длине сигнала за вычетом переходных зон и определяется по значениям коэффициентов экспоненциальной функции:

$$w_{\text{pl}} = \frac{e}{d} - \frac{c}{b} - \theta \left(\frac{1}{b} + \frac{1}{d} \right) \approx \frac{be - cd - 6,21(b + d)}{bd}. \quad (5)$$

Биофизический смысл представленных коэффициентов и расчетных параметров модели:

- коэффициент a соответствует значению плотности РКВ в просвете сосуда;
- коэффициент F_0 характеризует плотность КТ-сигнала в области, окружающей сосуд;
- тангенс угла наклона фронта, отдельно либо в совокупности с шириной переходной зоны, отражает интегрально поведение РКВ в париетальной области и стенке сосуда;
- ширина плато позволяет оценить распределение РКВ без учета при/внутристеночных эффектов.

Разработанная функция предназначена для аппроксимации одномерного сигнала КТ-плотности во фронтальном либо сагиттальном направлении, однако ROI на аксиальной проекции представляет собой двумерный сигнал. Двумерное распределение РКВ моделируется как набор одномерных распределений. При этом данные обрабатываются как во фронтальном (по строкам), так и в сагиттальном (по столбцам) направлении. Для разрешения неопределенности при выборе итогового значения сигнала в каждой точке использован критерий близости к исходным данным: выбирается значение, аппроксимированное по строке $F_i(\text{pix})$ либо столбцу $F_j(\text{pix})$, для которого разность между ним и исходным значением $F(\text{pix})$ сигнала минимальна:

$$F_{\text{РКВ}}(\text{pix}) = \begin{cases} F_i(\text{pix}), & \text{если } |F_i(\text{pix}) - F(\text{pix})| \leq |F_j(\text{pix}) - F(\text{pix})|, \\ F_j(\text{pix}), & \text{если } |F_i(\text{pix}) - F(\text{pix})| > |F_j(\text{pix}) - F(\text{pix})|. \end{cases} \quad (6)$$

Предлагаемый метод позволяет аппроксимировать сигнал сложной формы, что, в свою очередь, позволяет избежать ввода множества коэффициентов.

Аппроксимация данных. Коэффициенты аппроксимирующей функции вычисляются итеративно, методом нелинейных наименьших квадратов с оптимизацией Левенберга — Марквардта [28]. Этот метод сочетает в себе аспекты методов градиентного спуска и Гаусса — Ньютона, что делает его универсальным для различных сценариев: используется градиентный спуск, когда значения параметров существенно отличаются от оптимальных, и осуществляется переход к методу Гаусса — Ньютона, когда параметры близки к оптимальным. Начальные условия определяются по исходным данным: F_0 — минимальное значение сигнала; a — абсолютная разность между максимальным и минимальным значениями сигнала; c/b — абсцисса начала сигнала; e/d — абсцисса конца сигнала; $b = d = 1$ (симметричные сигмоиды).

Анализ результатов. Классический подход с использованием коэффициентов информативности неприменим в рамках задачи в силу отсутствия референтной модели. Статистический анализ результатов аппроксимации проводился с использованием параметрических (парный и непарный t-тесты Стьюдента для связанных и независимых выборок, дисперсионный ANOVA-анализ и пост-апостериорный тест Тьюки для множественных сравнений) или непараметрических (парный W-тест Вилкоксона для связанных выборок, U-тест Манна — Уитни

для независимых выборок, К-W-тест Крускала — Уоллеса и пост-апостериорный тест Данна для множественных сравнений) критериев. Нормальность распределения данных была определена с помощью теста Колмогорова — Смирнова либо теста Шапиро — Уилка в зависимости от размера выборки. Для абсолютной оценки ошибки аппроксимации использована мера среднеквадратической ошибки (RMSE). Полученное значение было сопоставлено с уровнем шума (среднеквадратическое отклонение — СКО) в исходных данных с помощью W-теста (t-теста) при следующей формулировке альтернативной гипотезы: „ $RMSE \leq CKO$ “. Исходные и аппроксимированные данные, а также значения RMSE и СКО считаются связанными выборками. Уровень значимости отвержения статистических гипотез был принят равным 0,05: двусторонний критерий использован для оценки точности аппроксимации, односторонний — при сопоставлении RMSE и СКО.

Анализ биореlevance модели. Состоятельность модели в описании гемодинамических процессов была исследована с точки зрения ее чувствительности к изменениям распределения РКВ в областях, содержащих и не содержащих объекты, изменяющие просвет сосуда: аневризма, тромбоз и отхождение магистральных артерий, так как ожидается, что эти области демонстрируют локальную неоднородность [29, 30].

В качестве областей однородного распределения РКВ были выбраны неизвитые и свободные от магистральных сосудов сегменты брюшной аорты. Для получения воспроизводимых результатов сравнивались расчеты не менее чем по 10 срезам. Срезы с нормальным потоком извлекались из сосуда диаметром менее 25 мм. В качестве аневризматических были отобраны срезы, для которых диаметр сосуда составлял ≥ 30 мм [1]. Для оценки чувствительности модели к изменению распределения РКВ, вызванному аневризматическим расширением просвета сосуда, использовалось сопоставление с помощью U-теста (t-теста) параметров, значения которых были нормированы на диаметр просвета. Было проведено сравнение данных внутри одного среза между областями контакта „кровь—стенка“ и „тромб—стенка“. Для оценки чувствительности модели в выявлении изменений распределения РКВ, связанных с разветвлением сосудов, были сопоставлены данные срезов с магистральным сосудом и без него. Для сопоставления были использованы тесты Крускала — Уоллеса и Данна.

Точность аппроксимации для вышеуказанных областей однородного и неоднородного распределения РКВ определялась как наличие статистически значимых различий ошибки RMSE в рамках отдельно взятого КТ-исследования с помощью U-теста (t-теста). Выделение выборок, содержащих однородный просвет и указанные области, проводилось на основании визуального экспертного анализа данных; требования к экспертам — сертификат по специальности „рентгенология“, опыт от трех лет и более.

Статистический анализ проводился с использованием R tool [31] версии 4.2.1 с пакетами dplyr [32], RNIftI [33], minpack.lm [34] и reshape [35].

Размер выборки. Под выборкой понимается число точек (пикселей) ROI, по которым сопоставляются два КТ-изображения при оценке точности аппроксимации. Понятие „выборка“ включает в себя также число КТ-изображений в рамках отдельно взятого КТ-исследования. Наконец, выборкой можно назвать число КТ-исследований, использованных для апробации модели.

Для оценки размера выборки, при котором результаты расчета RMSE и его сопоставления с СКО будут статистически обоснованы, необходимо определить допустимый уровень шума КТА-изображений. Согласно результатам исследования [36] допустимый диапазон отношения сигнал/шум составляет 25 ± 10 HU при амплитуде сигнала $476,5 \pm 44$ HU. Оценка СКО определяется отношением этих величин и составляет 22 ± 12 HU. Для определения размера выборки, при котором разница между аппроксимированными и исходными данными, выраженная как RMSE, находилась в интервале СКО 22 ± 12 HU с вероятностью 95 %, была использована функция „prec_meandiff“ из пакета presize [37]. Результаты показали, что для достижения этого диапазона потребуется 63 среза, так как RMSE (и СКО) вычисляются для изображения в целом.

Формула для расчета размера выборки в случае применения статистического теста учитывает значения *z*-статистик, размер эффекта $\mu - \mu_0$ и СКО исходных данных σ [38]:

$$n = \frac{2(z_{\alpha} + z_{\beta})^2}{[(\mu - \mu_0)/\sigma]^2}.$$

(7)

Мощность теста обычно принимается равной 0,8–0,9 [39]. Значение *z*-статистики для уровня значимости 0,05 и мощности 0,8 составляет $z_{\alpha} = 1,96$ и $z_{\beta} = 0,84$ соответственно [40]. Минимальный размер эффекта $\mu - \mu_0$ равен нижней границе СКО в исходных данных: $22 - 12 = 10$ HU, при максимальном σ исходных данных: $22 + 12 = 34$ HU. Результат вычислений показывает, что минимально необходимый объем данных для получения значимых результатов статистического теста составляет 181 измерение, т. е. ROI должна содержать не менее 181 точки для уровня доверия 0,95. Итак, необходимый размер выборки составляет 63 среза, ROI на каждом из которых содержит не менее 181 точки.

Результаты. Набор данных для валидации модели (см. таблицу) содержал 4 КТА-исследования, общее число изображений брюшного отдела аорты — 594, медианное число срезов в исследовании — 144, размах числа изображений в КТ-исследовании (128; 178), среднее число точек ROI — 1000, что превышает минимально необходимый размер выборки. Использованы данные артериальной фазы КТА-исследования. Исходные данные в ROI для всех случаев имели распределение, отличное от нормального ($p < 0,001$, тест Шапиро — Уилка), по этой причине были выбраны непараметрические критерии.

Параметр	Значение			
Период сбора данных сканирования (даты начала/окончания)	8 января 2022/31 января 2022			
Распределение по полу, % (М/Ж)	50/50			
Распределение по возрасту (минимум/медиана/максимум) лет	40/47/55			
Номер исследования	1	2	3	4
Число изображений в КТ-исследовании	178	152	128	136
Модель томографа	Canon Aquilion			
Толщина среза, мм	1			
Напряжение трубки, кВ	120			
Ток трубки (среднее значение), мА	120	95	261	292
Фильтр реконструкции	FC08 („standart“)		FC18 („soft“)	
Наличие аневризмы /дилатации (максимальный диаметр, мм)	Да (34)	Да (27)	Нет (20)	Нет (16)
Наличие тромба в просвете аорты	да	да	нет	нет
Наличие кальцинатов в стенке аорты (нет/одиночные/множественные)	Одиночные	Множественные	Одиночные	Нет

Точность аппроксимации данных. Диаграмма значений *p*-парного *W*-теста сопоставления исходных и аппроксимированных данных для каждого среза представлена на рис. 3, *а*. Во всех четырех случаях *W*-тест не показал статистически значимой разницы ($p > 0,05$ — красная линия) между результатами аппроксимации и исходными данными. Значения RMSE при сравнении аппроксимированных и реальных данных для каждого среза (рис. 3, *б*) не распределены нормально ($p < 0,001$) со средним значением 11,5 HU при узком доверительном интервале (ДИ): 95% ДИ (11,3; 11,7). Результаты парного *W*-теста для каждого среза RMSE и СКО показали статистически значимую разницу между ними ($p < 0,001$) при соблюдении неравенства $RMSE \leq CKO$ со средней разностью +9,5 HU 95 % ДИ (9,8; 10,2). Пример результатов построчно аппроксимиро-

ванной ROI (рис. 3, в) демонстрирует адаптивность модели (зеленая линия) даже для сложной формы исходного сигнала (черные линии).

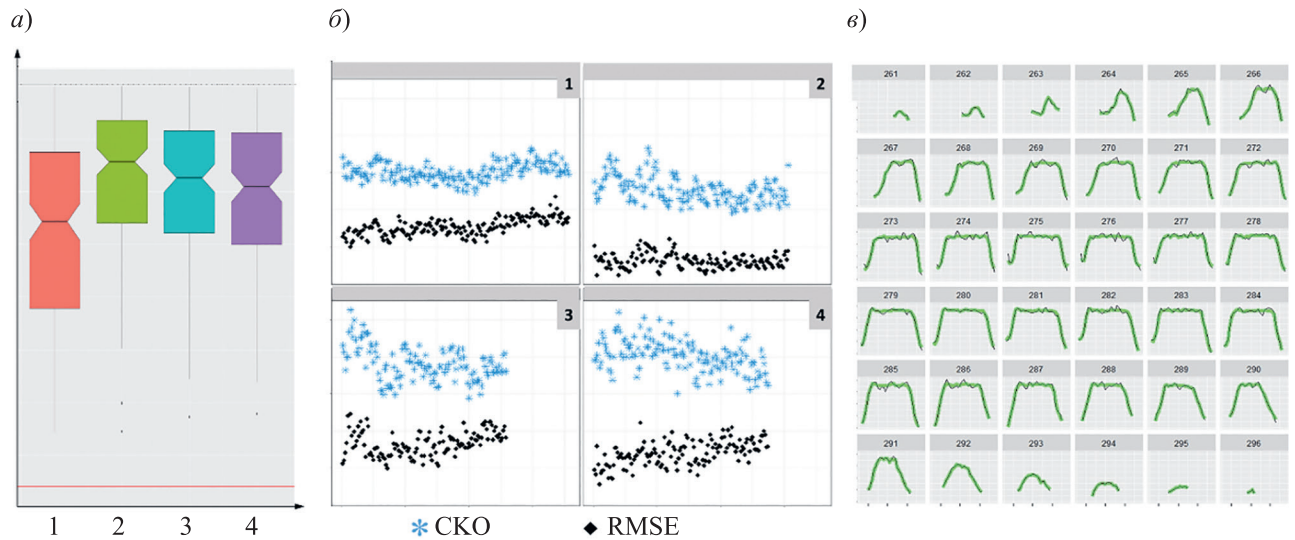


Рис. 3

Анализ чувствительности модели к гетерогенности распределения PKB.

Аневризма. КТ-исследования № 1 и 3 (см. таблицу) были выбраны для получения протяженных (21 срез) однородных, неизвитых и свободных от магистральных сосудов сегментов аорты (рис. 4, а). Для каждого среза выделены строка и столбец изображения, проходящие через геометрический центр (рис. 4, б). Были рассчитаны тангенс угла наклона, и отношение ширины переходной зоны к ширине плато для нарастающего и спадающего фронтов. Хотя визуальное сравнение фронтов (рис. 4, в) не демонстрирует существенных различий, результаты U-теста между нормой и аневризмой для отношения $\Delta x/w_{pl}$ (боксплоты 1а и 1б) и абсолютных углов наклона (боксплоты 2а и 2б) показали статистически значимую разницу для обоих расчетных параметров ($p < 0,05$). Впрочем, угол наклона не является надежным параметром: его значения для аневризмы и нормы противоречивы при нарастающем и спадающем фронтах (2а и 2б) и демонстрируют малое абсолютное значение расхождения (в пределах 2°). Для смешанной выборки, объединяющей попарно тангенсы углов наклона для обоих фронтов, U-тест между выборками нормального и аневризматически расширенного просвета не показал статистически значимых различий ($p = 0,9$).

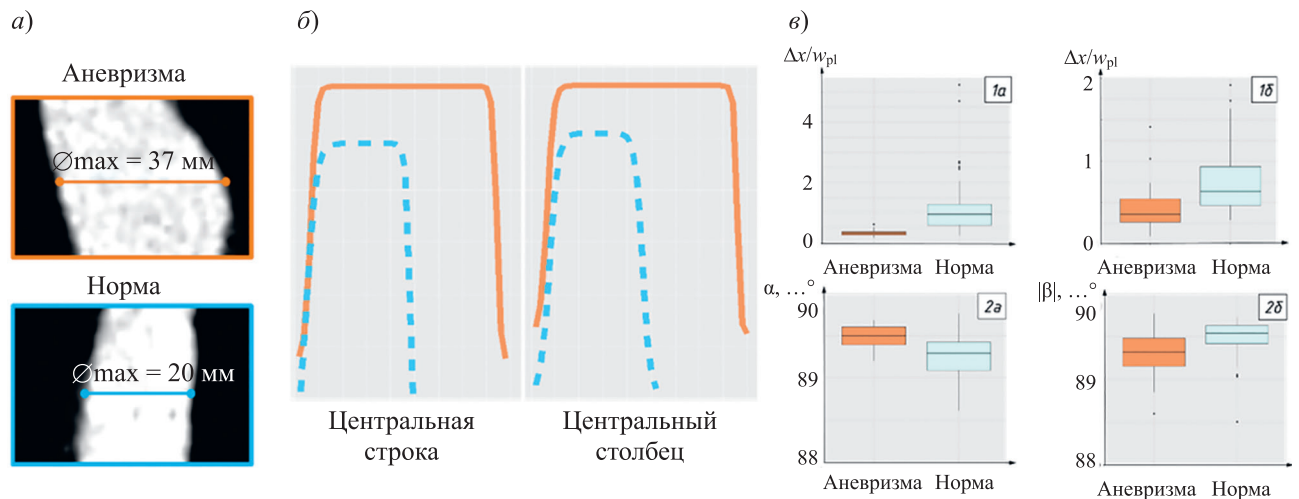


Рис. 4

Отношение $\Delta x/w_{pl}$ является более надежным параметром: результаты U-теста для этого параметра отдельно для каждого из фронтов показали наличие статистически значимых различий ($p < 0,001$), которое сохранилось при объединении выборок. Отличие ширины плато, интерпретируемое как диаметр просвета сосуда, само по себе является очевидным, однако предложенный параметр позволяет оценить именно уплощенность профиля как соотношение плато и пристеночной области.

Тромбоз. Для исследования пристеночной гемодинамики были использованы данные из КТ-исследования № 2 (см. таблицу), а именно срез с односторонне ориентированным тромботическим сгустком (рис. 5, а). Поверхность тромба включала 10 рядов. Проведено попарное сравнение нарастающего (контакт крови с тромбом) и спадающего (контакт крови со стенкой) фронтов. Результаты парного W-теста для ширины переходной зоны и угла наклона (рис. 5, б, в) показали статистически значимые различия ($p < 0,05$). Предложенная модель демонстрирует более гладкий (более широкая переходная зона с меньшим углом наклона) контакт, чем при нормальном контакте крови со стенкой.

Магистральные сосуды. Для оценки чувствительности модели была исследована область из 10 срезов, содержащая ответвление магистральных сосудов (рис. 6, а). Поток был сопоставлен только в просвете (область, размеченная экспертами вручную) на наборе, содержащем срезы области до, после и на уровне отхождения магистральных артерий. Результаты теста Крускала — Уоллеса (рис. 6, б) показали статистически значимые ($p < 0,001$) различия между однородным участком (рис. 6, а, срезы 96 и 105) и участком с магистральными артериями (рис. 6, а, срез 99). При исключении срезов 96 и 105 данные не содержали статистически значимых различий.

При этом анализ точности аппроксимации при сравнении участков однородного и неоднородного распределения РКВ в просвете сосуда показал, что в рамках одного КТ-исследования точность модели инвариантна к наличию этих областей (рис. 7). Данные в пределах каждой области распределены нормально ($p > 0,05$), результат t-теста демонстрирует отсутствие статистически значимых различий для областей однородного и неоднородного распределения РКВ, вызванного дилатацией ($p = 0,32$), тромбозом ($p = 0,33$) либо отхождением магистральных артерий ($p = 0,13$). Следует также отметить, что величина RMSE имеет унимодальные распределение для всех данных p : $p = 0,86$ 95% ДИ (0,90; 0,98), $p = 0,99$ 95% ДИ (0,99; 0,99), $p = 0,77$ 95% ДИ (0,78; 0,90) и $p = 0,98$ 95% ДИ (0,99; 0,99).

Дополнительная опция в виде наложения результата аппроксимации на исходные данные КТ-исследования с применением цветового картирования (рис. 8) позволяет визуальнo различать области разной КТ-плотности РКВ, что может иметь потенциальную пользу для повышения информативности рутинных исследований.

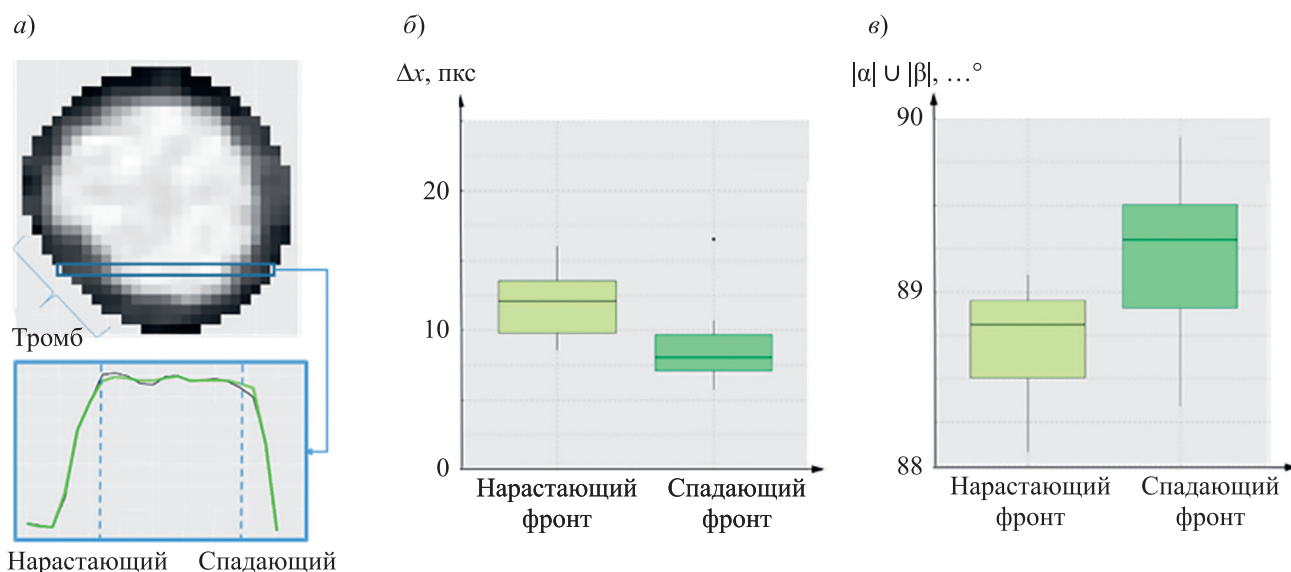


Рис. 5

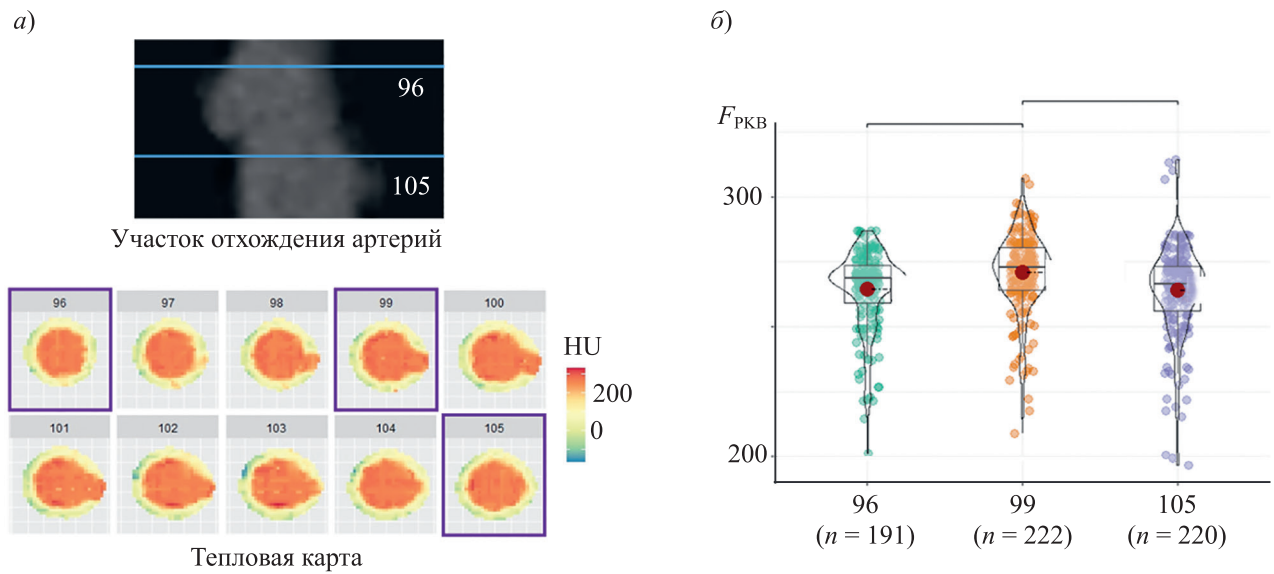


Рис. 6

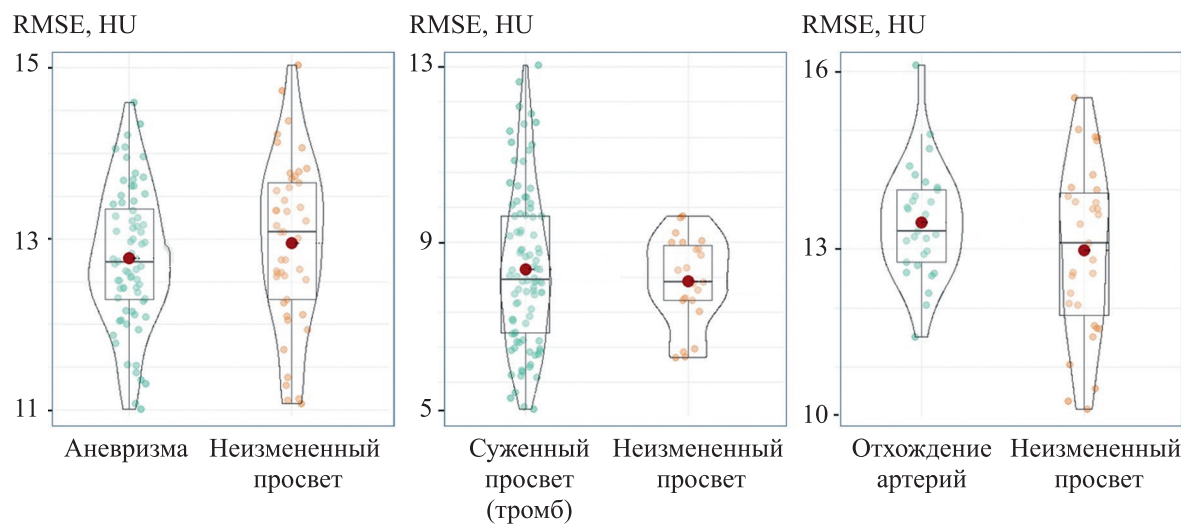


Рис. 7

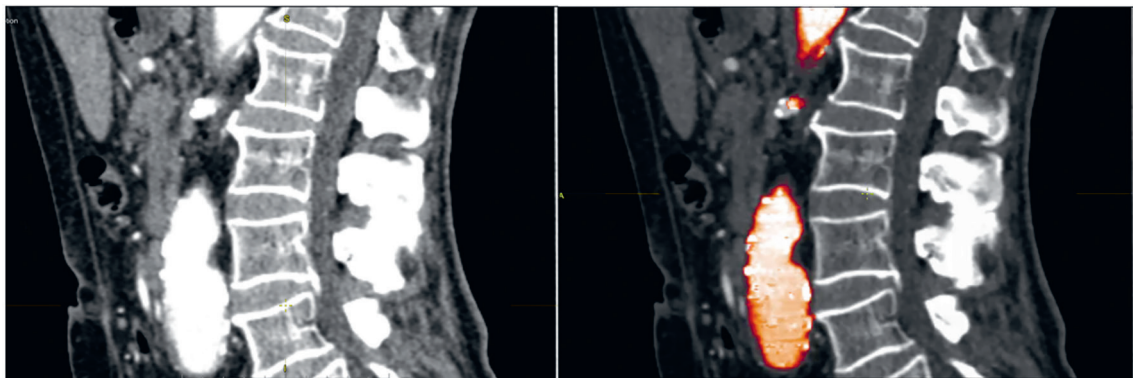


Рис. 8

Обсуждение результатов. Апробация разработанного алгоритма проведена на КТА-данных, содержащих случаи тромбоза, аневризмы и нормального просвета брюшной аорты. Ввиду ограниченного числа пациентов (4 КТ-исследования) результаты носят предварительный характер. Тем не менее размер выборки: 594 изображения, среднее число точек в ROI — 1000, превышает рассчитанные пороговые значения: 181 точка и 63 изображения, что позволяет говорить о ценности полученных результатов.

Состоятельность предложенной модели для аппроксимации данных подтверждается отсутствием статистически значимых различий ($p > 0,05$) при сопоставлении исходных данных и результатов аппроксимации для всей выборки. Полученное значение ошибки аппроксимации RMSE статистически значимо меньше, чем СКО шума исходного сигнала. Следовательно, расстояние между выделенным трендом и исходным сигналом статистически значимо меньше, чем шум исходных данных. По причине отсутствия опорного значения медианное значение рассчитанной RMSE, равное 11,5 HU, можно принимать в аналогичных исследованиях за верхнюю эмпирическую границу расхождений между реальными и аппроксимированными данными, в рамках которой допустимо утверждение об отсутствии различий между ними.

Чувствительность модели в отношении обнаружения областей различного распределения РКВ была подтверждена на примере сопоставления неизмененного и измененного, вызванного дилатацией, тромбозом либо отхождением магистральных артерий, просвета брюшной аорты.

Модель была разработана в первую очередь для анализа пространственного распределения РКВ по данным КТА конкретного пациента. В отличие от упомянутых во введении методов искусственной генерации РКВ в просвете сосуда для визуального анализа исследования, в предложенном алгоритме используется принципиально иной подход. Вместо искусственной генерации, достоверность которой пока остается недоказуемой, предлагается обработка исходных данных без их искажения. Кроме этого, анализ позволяет извлекать численные метрики описания распределения РКВ в просвете и стенке артериального сосуда. Эти данные позволяют повысить информативность рутинного исследования. С другой стороны, обобщение результатов исследований, полученных для разных пациентов, может быть полезно для поиска общих закономерностей или паттернов при различном наборе условий. Отклонения от паттерна могут свидетельствовать о технических или методологических ошибках, а также о наличии патологии. Получение парных наборов данных „КТА — распределение РКВ“ целесообразно для развития алгоритмов автоматического анализа распределения РКВ, в частности, с использованием алгоритмов ИИ.

Перспективным направлением исследований является диагностика патологий аорты по оценке питания сосудистой стенки. Мышечный слой аорты в физиологических условиях получает питательные вещества из двух источников: посредством прямой диффузии из кровотока [41] и через сосудистую систему *vasa vasorum* [42]. Следовательно, предполагается, что РКВ попадает в сосудистую стенку через кровоток. Плотность *vasa vasorum* индивидуальна, однако есть данные о том, что она дистально уменьшается от дуги аорты к инфраренальному отделу [43]. Прямая диффузия соответственно превалирует в инфраренальном сегменте брюшной аорты [44]. Таким образом, существуют перспективы оценки индивидуального вклада этих эффектов путем сравнения соотношения ширины плато и переходной зоны на срезах супраренальной и инфраренальной аорты. Это может быть перспективным для выявления, например, специфических для ишемии паттернов распределения РКВ.

Ограничения. Представленный подход имеет ряд ограничений. Во-первых, для реализации модели требуется предварительная сегментация ROI на КТА-изображении. Однако данная задача является автоматизируемой, о чем свидетельствует большое число работ, посвященных автоматической сегментации аорты на КТА-данных [45]. Во-вторых, размер выборки, хотя и удовлетворяет минимальному и достаточному для получения достоверных результатов о состоятельности подхода к аппроксимации данных, недостаточен для постулирования надежности алгоритма при различных условиях сканирования. Данные, представленные в таблице, демонстрируют наличие в выборке различных протоколов сканирования, полученных на томографе

одной марки. Для преодоления этого ограничения в дальнейшем предполагается расширенная апробация модели на данных, полученных с использованием различных стандартных протоколов сканирования от основных производителей томографического оборудования.

Наконец, представленные результаты относительно биорелевантности предложенной модели носят, как сказано выше, предварительный характер. Несмотря на доказательства достоверности модели в описании гемодинамических эффектов, решение задачи выявления патологических изменений сосуда по результатам моделирования требует углубленного изучения с использованием референтных методов (например, фазоконтрастной магнитно-резонансной томографии).

Заключение. Представлен подход к выделению и анализу детерминированного РКВ-индуцированного компонента сигнала КТ-плотности в области брюшной аорты при КТА. Предложен алгоритм аппроксимации данных пространственного распределения РКВ в просвете и стенке аорты с помощью набора сумм сигмоидов специального вида. Эффективность алгоритма подтверждена с помощью КТА-данных реальных пациентов. Предложенный алгоритм предназначен для повышения информативности рутинных КТА-исследований, развития методов обработки изображений и алгоритмов ИИ.

Вклад авторов. М. Р. Коденко — концепция и дизайн исследования, получение и анализ данных, подготовка и редактирование рукописи; А. В. Самородов, Н. С. Кульберг и Р. В. Решетников — экспертная оценка методологии исследования; Ю. А. Васильев, Р. В. Решетников — администрирование проекта и редактирование рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Erbel R., Aboyans V., Boileau C., Bossone E. et al. ESC Guidelines on the diagnosis and treatment of aortic diseases: Document covering acute and chronic aortic diseases of the thoracic and abdominal aorta of the adult. The Task Force for the Diagnosis and Treatment of Aortic Diseases of the European Society of Cardiology (ESC) // *European Heart Journal*. 2014. N 35. P. 2873–926. DOI:10.1093/eurheartj/ehu281.
2. Baliyan V., Shaqdan K., Hedgire S., Ghoshhajra B. Vascular computed tomography angiography technique and indications // *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*. 2019. N 9. DOI:10.21037/CDT.2019.07.04.
3. Yu T., Zhu X., Tang L., Wang D., Saad N. Review of CT angiography of aorta // *Radiol. Clin. North Amer.* 2007. N 45. P. 461–83. DOI:10.1016/J.RCL.2007.04.010.
4. Zhang Z., Sejdić E. Radiological images and machine learning: trends, perspectives, and prospects // *Computers in Biology and Medicine*. 2019. Vol. 108. P. 354–370.
5. Baliyan V., Verdini D., Meyersohn N. M. Noninvasive aortic imaging // *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*. 2018. Vol. 8, Suppl 1. P. S3. DOI:10.21037/cdt.2018.02.01.
6. Bae K. T. Intravenous contrast medium administration and scan timing at CT: considerations and approaches // *Radiology*. 2010. Vol. 256, N 1. P. 32–61. DOI:10.1148/radiol.10090908.
7. Lyu J., Fu Y., Yang M., Xiong Y., Duan Q. et al. Generative Adversarial Network-based Noncontrast CT Angiography for Aorta and Carotid Arteries // *Radiology*. 2023. N 309(2). P. e230681. DOI: 10.1148/radiol.230681. PMID: 37962500.
8. Hamersvelt R.W. van, Eijssvoegel N. G., Muhl C. et al. Contrast agent concentration optimization in CTA using low tube voltage and dual-energy CT in multiple vendors: a phantom study // *Intern. Journal Cardiovasc. Imaging*. 2018. N 34(8). P. 1265–1275. DOI:10.1007/s10554-018-1329-x.
9. Weininger M., Barraza J. M., Kemper C. A., Kalafut J. F. et al. Cardiothoracic CT angiography: current contrast medium delivery strategies // *Amer. Journal of Roentgenology*. 2011. N 196(3). P. W260–W272. DOI:10.2214/AJR.10.5814.
10. Andreucci M., Solomon R., Tasanarong A. Side effects of radiographic contrast media: Pathogenesis, risk factors, and prevention // *BioMed Research Intern.* 2014. Vol. 2014. DOI: 10.1155/2014/741018.
11. Pasquini L., Napolitano A., Pignatelli M., Tagliente E. et al. Synthetic Post-Contrast Imaging through Artificial Intelligence: Clinical Applications of Virtual and Augmented Contrast Media // *Pharmaceutics*. 2022. Vol. 14, N 11. P. 2378. DOI:10.3390/pharmaceutics14112378.
12. Chen H. et al. Application of cascaded GAN based on CT scan in the diagnosis of aortic dissection // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2022. Vol. 226. P. 107130. DOI:10.1016/j.cmpb.2022.107130.

13. *Wu C. et al.* Vessel-GAN: Angiographic reconstructions from myocardial CT perfusion with explainable generative adversarial networks // *Future Generation Computer Systems*. 2022. Vol. 130. P. 128–139.
14. *Коденко М. Р., Кульберг Н. С., Самородов А. В.* Анализ высокоплотностного компонента содержимого брюшной аорты при КТ-ангиографии [Электронный ресурс]: <http://www.mce.su/rus/archive/abstracts/mce30/sect288919/doc417793/>, 30.03.2023 г.
15. *Коденко М. Р., Самородов А. В., Кульберг Н. С., Решетников Р. В.* Создание наборов данных компьютерной томографии брюшной аорты с подавлением контрастирования для обучения и тестирования алгоритмов искусственного интеллекта // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2023. Т. 66, № 11. С. 968–981. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-11-968-981.
16. Свид. о гос. рег. программы № 2023661089 РФ. Программа для извлечения и анализа детерминированного компонента сигнала рентгеновской плотности КТ-ангиографического исследования аорты / *М. Р. Коденко, Ю. А. Васильев*. Опубл. 29.05.2023. Бюл. № 6.
17. Свид. о гос. рег. программы № 2023661090 РФ. Программа для подавления контрастирования аорты на КТ-ангиографических изображениях / *М. Р. Коденко, Ю. А. Васильев*. Опубл. 29.05.2023. Бюл. № 6.
18. *Kodenko M. R. et al.* Contrast-agent-induced deterministic component of CT-density in the abdominal aorta during routine angiography: proof of concept study // *arXiv preprint arXiv:2310.20243*. 2023. DOI:10.48550/arXiv.2310.20243.
19. *Norgeot B. et al.* Minimum information about clinical artificial intelligence modeling: the MI-CLAIM checklist // *Nature Medicine*. 2020. Vol. 26, N 9. P. 1320–1324. DOI: 10.1038/s41591-020-1041-y.
20. Подготовка набора данных для обучения и тестирования программного обеспечения на основе технологии искусственного интеллекта: Учеб.-метод. пособие / *Ю. А. Васильев, К. М. Арзамасов, А. В. Владзимирский и др.* М.: НПКЦ ДиТ ДЗМ, 2023. 108 с.
21. МКБ 10 — Аневризма и расслоение аорты (I71) // МКБ 10 — Международная классификация болезней 10-го пересмотра [Электронный ресурс]: <https://mkb-10.com/index.php?pid=8344>, 05.04.2023.
22. MosMedData КТ с признаками аневризмы аорты тип III - наборы данных в лучевой диагностике n.d. [Электронный ресурс]: <https://mosmed.ai/datasets/mosmeddata-kt-s-priznakami-anevrizmi-aorti-tip-iii/>, 16.05.2023.
23. Свид. о гос. рег. базы данных № 2023621046 РФ. MosMedData: КТ с признаками аневризмы брюшного отдела аорты / *Ю. А. Васильев, Е. В. Туравилова, И. М. Шулькин и др.* Опубл. 30.03.2023.
24. *Kodenko M. R., Makarova T. A.* Preparation of abdominal computed tomography data set for patients with abdominal aortic aneurysm // *Digital Diagnostics*. 2023. Vol. 4, N 1S. P. 90–92.
25. 3D Slicer image computing platform // 3D Slicer USA [Электронный ресурс]: <https://www.slicer.org/>, 05.03.2022.
26. *Knipe H., Moore C.* NIfTI (file format) // *Radiopaedia.org*. 2019 [Электронный ресурс]: <https://radiopaedia.org/articles/72562>, 05.03.2022.
27. *Bell D., Greenway K.* Hounsfield unit // *Radiopaedia. Org*. 2015. DOI:10.53347/RID-38181.
28. *Ranganathan A.* The Levenberg-Marquardt Algorithm // *Tutorial on LM algorithm*. 2004. Vol. 11, N 1. P. 101–110.
29. *Williams A. R. et al.* Local hemodynamic changes caused by main branch stent implantation and subsequent virtual side branch balloon angioplasty in a representative coronary bifurcation // *Journal of Applied Physiology*. 2010. Vol. 109, N 2. P. 532–540.
30. *Chiu J. J., Chien S.* Effects of disturbed flow on vascular endothelium: pathophysiological basis and clinical perspectives // *Physiological Reviews*. 2011. Vol. 91, N 1. P. 327–387.
31. RStudio Desktop — Posit // RStudio [Электронный ресурс]: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>, 05.03.2022.
32. Dplyr — R Documentation [Электронный ресурс]: <https://cran.rstudio.com/web/packages/dplyr/vignettes/dplyr.html>, 07.05.2022.
33. Rnifti — R Documentation [Электронный ресурс]: <https://cran.r-project.org/web/packages/RNifti/index.html>, 07.05.2022.
34. Minpack.lm — R Documentation [Электронный ресурс]: <https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.lm/index.html>, 07.05.2022.
35. Reshape2 — R Documentation [Электронный ресурс]: <https://cran.r-project.org/web/packages/reshape2/>, 07.05.2022.
36. *Kanematsu M. et al.* Whole-body CT angiography with low tube voltage and low-concentration contrast material to reduce radiation dose and iodine load // *Amer. Journal of Roentgenology*. 2014. Vol. 202, N 1. P. W106–W116.
37. *Haynes A. et al.* Presize: An R-package for precision-based sample size calculation in clinical research // *Journal of Open Source Software*. 2021. N 60 (6). P. 3118.
38. *Das S., Mitra K., Mandal M.* Sample size calculation: Basic principles // *Indian Journal of Anaesthesia*. 2016. Vol. 60, N 9. P. 652.
39. *Kim H. Y.* Statistical notes for clinical researchers: Type I and type II errors in statistical decision // *Restorative Dentistry & Endodontics*. 2015. Vol. 40, N 3. P. 249–252.

40. Noordzij M. et al. Sample size calculations: basic principles and common pitfalls // *Nephrology dialysis transplantation*. 2010. Vol. 25. N 5. P. 1388–1393.
41. Tanaka H., Unno N., Suzuki Y., Sano H. et al. Hypoperfusion of the Aortic Wall Secondary to Degeneration of Adventitial Vasa Vasorum Causes Abdominal Aortic Aneurysms // *Current Drug Targets*. 2018. N 19. P. 1327–1332. DOI:10.2174/1389450119666180122154409.
42. Heistad D. D., Marcus M. L. Role of vasa vasorum in nourishment of the aorta // *Blood Vessels*. 1979. N 16. P. 225–238. DOI:10.1159/000158209.
43. Sano M., Unno N., Sasaki T., Baba S. et al. Topologic distributions of vasa vasorum and lymphatic vasa vasorum in the aortic adventitia — Implications for the prevalence of aortic diseases // *Atherosclerosis*. 2016. N 247. P. 127–134. DOI:10.1016/J.ATHEROSCLEROSIS.2016.02.007.
44. Grossmannova K., Barathova M., Belyoncikova P., Lauko V. et al. Hypoxia Marker Carbonic Anhydrase IX Is Present in Abdominal Aortic Aneurysm Tissue and Plasma // *Intern. Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23. P. 879. DOI:10.3390/IJMS23020879.
45. Raffort J. et al. Artificial intelligence in abdominal aortic aneurysm // *Journal of Vascular Surgery*. 2020. Vol. 72, N 1. P. 321–333.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Мария Романовна Коденко** — аспирант; МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра биомедицинских технических систем; Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, отдел научных медицинских исследований; мл. научный сотрудник; E-mail: m.r.kodenko@yandex.ru
- Юрий Александрович Васильев** — канд. мед. наук; Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы; директор Центра; E-mail: npcmr@zdrav.mos.ru
- Андрей Владимирович Самородов** — канд. техн. наук, доцент; МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра биомедицинских технических систем; заведующий кафедрой; E-mail: avs@bmstu.ru
- Николай Сергеевич Кульберг** — канд. физ.-мат. наук; МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра медико-технических информационных технологий; ст. научный сотрудник; E-mail: kulberg@yandex.ru
- Роман Владимирович Решетников** — канд. физ.-мат. наук; Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, отдел научных медицинских исследований; руководитель отдела; E-mail: reshetnikov@fbb.msu.ru

Поступила в редакцию 11.04.2021; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 23.07.2024.

REFERENCES

1. Erbel R., Aboyans V., Boileau C., Bossone E. et al. *Eur. Heart. J.*, 2014, no. 35, pp. 2873–2926, DOI:10.1093/EURHEARTJ/EHU281.
2. Baliyan V., Shaqdan K., Hedgire S., Ghoshhajra B. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, 2019, no. 9, DOI:10.21037/CDT.2019.07.04.
3. Yu T., Zhu X., Tang L., Wang D., Saad N. *Radiol. Clin. North. Am.*, 2007, vol. 45, pp. 461–483, DOI:10.1016/J.RCL.2007.04.010.
4. Zhang Z., Sejdić E. *Computers in biology and medicine*, 2019, vol. 108, pp. 354–370.
5. Baliyan V., Verdini D., Meyersohn N.M. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, 2018, no. Suppl 1(8), pp. S3, DOI:10.21037/cdt.2018.02.01.
6. Bae K.T. *Radiology*, 2010, no. 1(256), pp. 32–61, DOI:10.1148/radiol.10090908.
7. Lyu J., Fu Y., Yang M., Xiong Y., Duan Q. et al. *Radiology*, 2023, no. 2(309), pp. e230681, DOI: 10.1148/radiol.230681.
8. van Hamersvelt R.W., Eijssvoogel N.G., Muhl C. et al. *Int. J. Cardiovasc. Imaging.*, 2018, no. 8(34), pp. 1265–1275, DOI:10.1007/s10554-018-1329-x.
9. Weininger M., Barraza J.M., Kemper C.A., Kalafut J.F. et al. *AJR Am. J. Roentgenol.*, 2011, no. 3(196), pp. W260–W272, DOI:10.2214/AJR.10.5814.
10. Andreucci M., Solomon R., Tasanarong A. *BioMed Research International*, 2014, vol. 2014, DOI: 10.1155/2014/741018.
11. Pasquini L., Napolitano A., Pignatelli M., Tagliente E. et al. *Pharmaceutics*, 2022, no. 11(14), pp. 2378, DOI:10.3390/pharmaceutics14112378.
12. Chen H. et al. *Computer methods and programs in biomedicine*, 2022, vol. 226, pp. 107130, DOI:10.1016/j.cmpb.2022.107130.
13. Wu C. et al. *Future Generation Computer Systems*, 2022, vol. 130, pp. 128–139.

14. <http://www.mce.su/rus/archive/abstracts/mce30/sect288919/doc417793/>. (in Russ.)
15. Kodenko M.R., Samorodov A.V., Kulberg N.S., Reshetnikov R.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 11(66), pp. 968–981, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-11-968-981. (in Russ.)
16. Certificate on the state registration of the computer programs 2023661089 RU, *Programma dlya izvlecheniya i analiza determinirovannogo komponenta signala KT-plotnosti KT-angiograficheskogo issledovaniya aorty* (Program for Extraction and Analysis of the Deterministic Component of the CT Density Signal of CT Angiographic Study of the Aorta), M.R. Kodenko, Yu.A. Vasiliev, Application no. 2023660164, Priority 19.05.2023, Published 29.05.2023. (in Russ.)
17. Certificate on the state registration of the computer programs 2023661090 RU, *Programma dlya podavleniya kontrastirovaniya aorty na KT-angiograficheskikh izobrazheniyakh* (Software for Suppressing Aortic Contrast Enhancement in CT Angiographic Images), M.R. Kodenko, Yu.A. Vasiliev, Application no. 2023660165, Priority 19.05.2023, Published 29.05.2023. (in Russ.)
18. Kodenko M.R. et al. *arXiv preprint arXiv:2310.20243*, 2023, DOI:10.48550/arXiv.2310.20243.
19. Norgeot B. et al. *Nature medicine*, 2020, no. 9(26), pp. 1320–1324, DOI: 10.1038/s41591-020-1041-y.
20. Vasiliev Yu.A., Arzamasov K.M., Vladimirovsky A.V. et al. *Podgotovka nabora dannykh dlya obucheniya i testirovaniya programmnoy obespecheniya na osnove tekhnologii iskusstvennogo intellekta* (Preparing a Dataset for Training and Testing Software Based on Artificial Intelligence Technology), Moscow, 2023, 108 p. (in Russ.)
21. <https://mkb-10.com/index.php?pid=8344>. (in Russ.)
22. <https://mosmed.ai/datasets/mosmeddata-kt-s-priznakami-anevrizmi-aorti-tip-iii/>. (in Russ.)
23. Certificate on the state registration of the computer programs 2023621046 RU, *MosMedData: KT s priznakami anevrizmy bryushnogo otdela aorty* (MosMedData: CT with Signs of Abdominal Aortic Aneurysm), Yu.A. Vasiliev, E.V. Turavilova, I.M. Shulkin et al., Application no. 2023620795, Priority 24.03.2023, Published 30.03.2023. (in Russ.)
24. Kodenko M.R., Makarova T.A. *Digital Diagnostics*, 2023, no. 1S(4), pp. 90–92.
25. 3D Slicer image computing platform, <https://www.slicer.org/>.
26. Knipe H., Moore C. *Radiopaedia.org*, 2019, <https://radiopaedia.org/articles/72562>.
27. Bell D., Greenway K. *Hounsfield unit. RadiopaediaOrg*, 2015, DOI:10.53347/RID-38181.
28. Ranganathan A. *Tutorial on LM algorithm*, 2004, no. 1(11), pp. 101–110.
29. Williams A.R. *Journal of applied physiology*, 2010, no. 2(109), pp. 532–540.
30. Chiu J.J., Chien S. *Physiological reviews*, 2011, no. 1(91), pp. 327–387.
31. *RStudio Desktop – Posit*, RStudio, <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>.
32. *Dplyr – R Documentation*, <https://cran.rstudio.com/web/packages/dplyr/vignettes/dplyr.html>.
33. *Rnifti – R Documentation*, <https://cran.r-project.org/web/packages/Rnifti/index.html>.
34. *Minpack.lm – R Documentation*, <https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.lm/index.html>.
35. *Reshape2 – R Documentation*, <https://cran.r-project.org/web/packages/reshape2/>.
36. Kanematsu M. et al. *American Journal of Roentgenology*, 2014, no. 1(202), pp. W106–W116.
37. Haynes A. et al. *Journal of Open Source Software*, 2021, no. 6(60), pp. 3118.
38. Das S., Mitra K., Mandal M. *Indian Journal of Anaesthesia*, 2016, no. 9(60), pp. 652.
39. Kim H.Y. *Restorative dentistry & endodontics*, 2015, no. 3(40), pp. 249–252.
40. Noordzij M. et al. *Nephrology dialysis transplantation*, 2010, no. 5(25), pp. 1388–1393.
41. Tanaka H., Unno N., Suzuki Y., Sano H et al. *Curr Drug Targets*, 2018, no. 19, pp. 1327–1332, DOI:10.2174/1389450119666180122154409.
42. Heistad D.D., Marcus M.L. *Blood Vessels*, 1979, no. 16, pp. 225–238, DOI:10.1159/000158209.
43. Sano M., Unno N., Sasaki T., Baba S. et al. *Atherosclerosis*, 2016, no. 34(127), pp. 247, DOI:10.1016/J.ATHEROSCLEROSIS.2016.02.007.
44. Grossmannova K., Barathova M., Belvoncikova P., Lauko V. et al. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, vol. 23, p. 879.
45. Raffort J. et al. *Journal of vascular surgery*, 2020, no. 1(72), pp. 321–333.

DATA ON AUTHORS

Maria R. Kodenko	—	Post-Graduate Student; Bauman Moscow State Technical University; Department for Biomedical Technical Systems; Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Department of Medical Research, Junior Researcher; E-mail: m.r.kodenko@yandex.ru
Yuriy A. Vasiliev	—	PhD; Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department; CEO of the Center; E-mail: nbcmr@zdrav.mos.ru
Andrey V. Samorodov	—	PhD, Associate Professor; Bauman Moscow State Technical University, Department of Biomedical Technical Svstems: Head of the Department: Email: avs@bmstu.ru
Nicholay S. Kulberg	—	PhD; Bauman Moscow State Technical University, Department of Medical and Technical Information Technologies; Senior Researcher; E-mail: kulberg@yandex.ru
Roman V. Reshetnikov	—	PhD; Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Department of Medical Research; Head of the Department; E-mail: reshetnikov@fbb.msu.ru

Received 11.04.2021; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 23.07.2024.