

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)

ИНФОРМАТИКА

INFORMATICS

TOM **18**
VOL.

1 | **2021**

ОТ РЕДАКЦИИ

В журнале «Информатика» публикуются оригинальные и обзорные статьи, описывающие результаты фундаментальных и прикладных исследований специалистов академического и вузовского профиля в области информатики и информационных технологий.

Основной целью журнала является публикация наиболее значимых новых результатов в указанной области. Приветствуются статьи, описывающие заключительные результаты научных проектов и диссертационных исследований, открывающие новые направления исследований, которые находятся на стыке информатики и других наук.

Журнал рассчитан на широкий круг специалистов в области информатики и информационных технологий.

Основные разделы журнала:

- биоинформатика;
- математическое моделирование;
- защита информации и надежность систем;
- информационные технологии;
- логическое проектирование;
- обработка сигналов, изображений, речи, текста и распознавание образов;
- автоматизация проектирования;
- интеллектуальные системы.

Префикс DOI: 10.37661

Условия распространения материалов:

контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Индексирование:

Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь журнал «Информатика» был включен в список научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований.

В декабре 2017 г. включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). С помощью инструментов и сервисов, доступных на платформе eLIBRARY (раздел «Личный кабинет»), можно самостоятельно корректировать список своих публикаций и цитирований в РИНЦ.

В июле 2017 г. включен в базу журналов открытого доступа Directory of Open Access Journals (DOAJ).

С помощью поисковых систем Google Scholar, WorldCat, Соционет можно получить свободный доступ к полному тексту научных публикаций журнала.

Адрес редакции:

ул. Сурганова, 6, к. 305, г. Минск, 220012, Беларусь
Тел. +375 (017) 351 26 22

Editorial address:

Surganova str., 6, of. 305, Minsk, 220012, Belarus
Phone +375 (017) 351 26 22

E-mail: rio@newman.bas-net.by

<https://inf.grid.by/jour>

THE EDITOR'S NOTE

The journal «Informatics» is a scientific publication in computer sciences and information technologies which reviews the results in basic and applied research of scientists from the universities and scientific centers.

The journal focuses on the most significant and modern papers of research projects results and PhD/DSc thesis in computer sciences.

The journal is edited for the specialists in IT and computer sciences research and application.

The main sections of the journal:

- bioinformatics;
- mathematical modeling;
- information protection and system reliability;
- information technology;
- logical design;
- signal, image, speech, text processing and pattern recognition;
- computer-aided design;
- artificial intelligence methods.

DOI Prefix: 10.37661

Distribution:

content is distributed under Creative Commons Attribution 4.0 License

Indexation:

the journal «Informatics» is in the list of scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus for scientists to publish the results of PhD/DSc research.

In December 2017 the journal was included in the database of the Russian Science Citation Index (RISC) and provides free access to reviewed electronic scientific paper, improving scientific information traffic and also raising quotation of works of the authors (please use <https://elibrary.ru> or section https://elibrary.ru_author_tools).

In July 2017 included in the database of open access journals Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Using the Google Scholar, WorldCat, Соционет search engine, you can get free access to full text of scientific publications of magazine.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

ИНФОРМАТИКА

Том 18, № 1, январь-март 2021

Ежеквартальный научный журнал

Издается с января 2004 г.

Учредитель и издатель – Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси

Г л а в н ы й р е д а к т о р

Тузиков Александр Васильевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент
Национальной академии наук Беларуси, генеральный директор Объединенного института
проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

З а м е с т и т е л ь г л а в н о г о р е д а к т о р а

Ковалев Михаил Яковлевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент
Национальной академии наук Беларуси, Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я

Абламейко Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, академик Национальной академии наук
Беларуси, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Анищенко Владимир Викторович, канд. техн. наук, доцент, ООО «СофтКлуб», Минск, Беларусь

Бибило Петр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Бобов Михаил Никитич, д-р техн. наук, профессор, ОАО «АГАТ – системы управления» – управляющая
компания холдинга «Геоинформационные системы управления», Минск, Беларусь

Долгий Александр Борисович, д-р техн. наук, профессор, Высшая инженерная школа Бретани, Нант,
Франция

Дудин Александр Николаевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Белорусский государственный университет,
Минск, Беларусь

Карпов Алексей Анатольевич, д-р техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Килин Сергей Яковлевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, академик Национальной академии наук
Беларуси, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Краснопрошин Виктор Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Белорусский государственный
университет, Минск, Беларусь

Крот Александр Михайлович, д-р техн. наук, профессор, Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Кругликов Сергей Владимирович, д-р воен. наук, канд. техн. наук, доцент, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Кундас Семен Петрович, д-р техн. наук, профессор, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Лиходед Николай Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Матус Петр Павлович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Скляр Валерий Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, Университет Авейру, Португалия

Сотсков Юрий Назарович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Стемпковский Александр Леонидович, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии наук, Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, Москва, Россия

Харин Юрий Семенович, д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, Научно-исследовательский институт прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Чернявский Александр Федорович, д-р техн. наук, профессор, академик Национальной академии наук Беларуси, Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Ярмолик Вячеслав Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

ИНФОРМАТИКА

Том 18, № 1, январь-март 2021

Ответственный за выпуск *Мойсейчик Светлана Сергеевна*

Редактор *Гончаренко Галина Борисовна*

Корректор *Михайлова Анна Антоновна*

Компьютерная верстка *Бутевич Ольга Борисовна*

Сдано в набор 22.02.2021. Подписано в печать 22.03.2021. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Ризография. Усл. печ. л. 14,2. Уч.-изд. л. 13,9. Тираж 50 экз. Заказ 1.

Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/274 от 04.04.2014. ЛП № 02330/444 от 18.12.13. Ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Беларусь.

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)

THE UNITED INSTITUTE OF INFORMATICS PROBLEMS
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

INFORMATICS

Vol. 18, no. 1, January-March 2021

Published quarterly

Issued since January 2004

Founder and publisher – the United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus

Editor-in-Chief

Alexander V. Tuzikov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, General Director of the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Deputy Editor-in-Chief

Mikhail Y. Kovalyov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Editorial Board

Sergey V. Ablameyko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian State University, Minsk, Belarus

Uladimir V. Anishchanka, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, SoftClub Ltd., Minsk, Belarus

Petr N. Bibilo, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Mikhail N. Bobov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Open Joint-Stock Company "AGAT – Control Systems – Managing Company of Geoinformation Control Systems Holding", Minsk, Belarus

Alexandre B. Dolgui, Dr. Sci. (Eng.), Professor, IMT Atlantique, Nantes, France

Alexander N. Dudin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Belarus

Alexey A. Karpov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Sergey Ya. Kilin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Viktor V. Krasnoproshin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Belarus

Alexander M. Krot, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Sergey V. Kruglikov, Dr. Sci. (Milit.), Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Semen P. Kundas, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Nikolai A. Likhoded, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Belarus

Petr P. Matus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Valery A. Sklyarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, University of Aveiro, Portugal

Yuri N. Sotskov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Alexander L. Stempkovsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian Federation Academy of Sciences, the Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Federation Academy of Sciences, Moscow, Russia

Yuriy S. Kharin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Research Institute for Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus

Alexander F. Cherniavsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus

Vyacheslav N. Yarmolik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

INFORMATICS

Vol. 18, no. 1, January-March 2021

Issue Head *Sviatlana S. Maiseichyk*

Editor *Halina B. Hancharenka*

Corrector *Hanna A. Mikhailava*

Computer Imposition *Volha B. Butsevich*

Sent for press 22.02.2021. Output 22.03.2021. Format 60×84 1/8. Offset paper. Headset Times. Riesography. Printed sheets 14,2. Publisher's signatures 13,9. Circulation 50 copies. Order 1.

State Scientific Institution "The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus".

Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions

no. 1/274 dated 04.04.2014. License for the press no. 02330/444 dated 18.12.13.

6, Surganov Str., 220012, Minsk, Belarus.

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)

СОДЕРЖАНИЕ

ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

- Бибило П. Н., Ланкевич Ю. Ю., Романов В. И.** Логическая минимизация при синтезе комбинационных структур в FPGA..... 7
- Ярмолик В. Н., Леванцевич В. А., Деменковец Д. В., Мрозек И.** Построение и применение маршевых тестов для обнаружения кодочувствительных неисправностей запоминающих устройств 25

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ, РЕЧИ, ТЕКСТА И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

- Богуш Р. П., Абламейко С. В.** Обнаружение и сопровождение объектов на видеопоследовательностях: формализация, критерии и результаты..... 43
- Старовойтов В. В., Голуб Ю. И.** Об оценке результатов классификации несбалансированных данных по матрице ошибок..... 61
- Литвинович Г. С., Бручковский И. И.** Алгоритм предварительной обработки данных линейки приборов с зарядовой связью на основе адаптивного фильтра Винера.....72

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Боровиков С. М., Казючиц В. О., Хорошко В. В., Дик С. С., Клинов К. И.** Оценка ожидаемой надежности прикладных программных средств для компьютерных информационных систем 84
- Савенко А. Г., Скудняков Ю. А.** Один из подходов к организации современного образовательного процесса 96

БИОИНФОРМАТИКА

- Яцков Н. Н., Апанасович В. В.** Комплексный анализ данных при исследовании сложных биомолекулярных систем..... 105

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)

CONTENTS

LOGICAL DESIGN

- Bibilo P. N., Lankevich Yu. Yu., Romanov V. I.** Logical minimization for combinatorial structure in FPGA..... 7
- Yarmolik V. N., Levantsevich V. A., Demenkovets D. V., Mrozek I.** Construction and application of march tests for pattern sensitive memory faults detection 25

SIGNAL, IMAGE, SPEECH, TEXT PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION

- Bohush R. P., Ablameyko S. V.** Object detection and tracking in video sequences: formalization, metrics and results 43
- Starovoitov V. V., Golub Yu. I.** About the confusion-matrix-based assessment of the results of imbalanced data classification..... 61
- Litvinovich H. S., Bruchkouski I. I.** Algorithm for preliminary processing of charge coupled devices array data based on the adaptive Wiener filter 72

INFORMATION TECHNOLOGIES

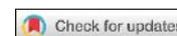
- Borovikov S. M., Kaziuchyts V. O., Khoroshko V. V., Dick S. S., Klinov K. I.** Assessment of expected reliability of applied software for computer-based information systems 84
- Savenko A. G., Skudnyakov Yu. A.** One of the approaches to the organization of the modern educational process 96

BIOINFORMATICS

- Yatskou M. M., Apanasovich V. V.** Data analysis in complex biomolecular systems 105

ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

LOGICAL DESIGN



УДК 519.714.5
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-7-24>

Оригинальная статья
Original Paper

Логическая минимизация при синтезе комбинационных структур в FPGA

П. Н. Бибило[✉], Ю. Ю. Ланкевич, В. И. Романов

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь
✉E-mail: bibilo@newman.bas-net.by*

Аннотация. Описываются результаты исследования эффективности применения программ минимизации функциональных описаний блоков комбинационной логики, входящих в проекты цифровых устройств, которые реализуются в FPGA (от англ. Field-Programmable Gate Array – программируемая пользователем вентильная матрица). Программы предназначены для отдельной и совместной минимизации функций в классе ДНФ (дизъюнктивных нормальных форм) и минимизации многоуровневых представлений систем полностью определенных булевых функций на основе разложения Шеннона с нахождением как равных, так и инверсных коэффициентов (кофакторов) разложения. Графические формы таких представлений широко известны в литературе как BDD (от англ. Binary Decision Diagram – бинарная диаграмма решений). Для технологического отображения применялась программа «укрупнения» полученных формул разложения Шеннона (логических уравнений) с условием, чтобы каждое уравнение зависело от ограниченного числа k входных переменных и могло быть реализовано на одном LUT- k – программируемом элементе FPGA, имеющем k входных переменных (LUT – Look-Up Table – таблица, реализующая логическую функцию). Показано, что предварительная логическая минимизация, выполняемая с помощью отечественных программ, позволяет улучшать результаты проектирования в зарубежных системах автоматизированного проектирования, таких как Leonardo Spectrum (корпорация Mentor Graphics), ISE (от англ. Integrated System Environment) Design Suite и Vivado (компания Xilinx). Эксперименты проводились для семейств FPGA Virtex-II PRO, Virtex-5, Artix-7 (компания Xilinx) на наборах стандартных промышленных примеров, задающих как системы дизъюнктивных нормальных форм булевых функций, так и системы булевых функций в виде взаимосвязанных логических уравнений.

Ключевые слова: булева функция, логическая минимизация, разложение Шеннона, BDD-представление, дизъюнктивная нормальная форма, синтез логических схем, VHDL, FPGA

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке БРФФИ в рамках проекта № Ф19-023.

Для цитирования. Бибило, П. Н. Логическая минимизация при синтезе комбинационных структур в FPGA / П. Н. Бибило, Ю. Ю. Ланкевич, В. И. Романов // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 7–24. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-7-24>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 27.08.2020
Подписана в печать | Accepted 08.10.2020
Опубликована | Published 26.03.2021

Logical minimization for combinatorial structure in FPGA

Petr N. Bibilo[✉], Yury Yu. Lankevich, Vladimir I. Romanov

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*

[✉]E-mail: bibilo@newman.bas-net.by

Abstract. The paper describes the research results of application efficiency of minimization programs of functional descriptions of combinatorial logic blocks, which are included in digital devices projects that are implemented in FPGA. Programs are designed for shared and separated function minimization in a disjunctive normal form (DNF) class and minimization of multilevel representations of fully defined Boolean functions based on Shannon expansion with finding equal and inverse cofactors. The graphical form of such representations is widely known as binary decision diagrams (BDD). For technological mapping the program of "enlargement" of obtained Shannon expansion formulas was applied in a way that each of them depends on a limited number of k input variables and can be implemented on one LUT- k – a programmable unit of FPGA with k input variables. It is shown that a preliminary logic minimization, which is performed on the domestic programs, allows improving design results of foreign CAD systems such as Leonardo Spectrum (Mentor Graphics), ISE (Integrated System Environment) Design Suite and Vivado (Xilinx). The experiments were performed for FPGA families' Virtex-II PRO, Virtex-5 and Artix-7 (Xilinx) on standard threads of industrial examples, which define both DNF systems of Boolean functions and systems represented as interconnected logical equations.

Keywords: Boolean function, logical minimization, Shannon expansion, BDD representation, disjunctive normal form, logic synthesis, VHDL, FPGA

Acknowledgements. The study was carried out with the financial support of the BRFFR within the framework of the project no. F19-023.

For citation. Bibilo P. N., Lankevich Yu. Yu., Romanov V. I. Logical minimization for combinatorial structure in FPGA. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 7–24 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-7-24>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Среди программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) центральное место занимают FPGA, которые имеют значительные преимущества перед другими ПЛИС как по техническим характеристикам, так и по удобству их проектирования с помощью свободно распространяемых САПР, обеспечивающих полный цикл проектирования: от моделирования исходных алгоритмических описаний на языках Verilog и VHDL (Very high speed integrated circuits Hardware Description Language – язык описания аппаратуры сверхскоростных интегральных схем) до получения файлов конфигураций FPGA [1]. В новых системах проектирования микросхем FPGA, таких как система Vivado [2], в качестве языков для описания проектов цифровых систем используются также языки программирования C, C++ и SystemC. Функциональные возможности FPGA постоянно совершенствуются. Они используются при создании специальных вычислителей, конкурирующих с суперкомпьютерами [3], позволяют решать задачи аппаратной реализации подсистем искусственного интеллекта [4], применяются в системах цифровой обработки сигналов, системах мультимедиа [5] и многих других областях. Расширение функциональных возможностей FPGA обусловлено тем, что они усложняются: увеличивается число CLB (Configurable Logic Block – конфигурируемый логический блок), в состав FPGA включаются макроблоки DSP (Digital Signal Processor – цифровой сигнальный процессор), умножители и блоки памяти [6].

Схемная реализация исходных описаний на языках C, C++ и SystemC осуществляется сначала путем получения синтезируемых VHDL-описаний, после этого каждая синтезируемая VHDL-конструкция заменяется соответствующим RTL-описанием (Register Transfer Level – уровень регистровых передач), которое состоит из элементов памяти и взаимосвязанных логических операторов, задающих блоки комбинационной логики. Число элементов памяти зависит от стиля исходного описания проекта и кодирования состояний проекта цифрового устройства, а минимизация сложности блоков комбинационной логики сводится к задаче нахождения логической сети, состоящей из наименьшего числа LUT- k , которые имеют k входных переменных

и могут при соответствующей настройке реализовать любую булеву функцию, зависящую от k переменных (обычно $k = 4, 6$). Следует заметить, что несколько LUT- k входят в состав конфигурационного блока CLB, который кроме LUT включает настраиваемые триггеры, мультиплексоры и другие элементы. Системы проектирования, как правило, оценивают сложность реализованных проектов в числе LUT либо CLB.

В настоящей статье рассматривается задача реализации блоков комбинационной логики LUT-структурами FPGA. Показывается, что уменьшение сложности комбинационных структур FPGA может быть во многих случаях достигнуто за счет предварительной логической минимизации исходных функциональных описаний.

Задача реализации комбинационной логики в FPGA. Исходное VHDL-описание комбинационного блока можно представить в виде алгоритмического описания с использованием различных типов данных и операторов, потока данных (dataflow), т. е. взаимосвязанных логических выражений, и т. д. Однако после этапа высокоуровневого синтеза реализации в FPGA подлжит система полностью определенных булевых функций, заданная либо «крупными» логическими уравнениями, либо в виде RTL-описания, представленного «мелкими» логическими уравнениями, когда каждое уравнение включает только один логический оператор, и т. п.

Задачу реализации комбинационной логики в FPGA сформулируем следующим образом: *задана система полностью определенных булевых функций. Требуется реализовать ее в виде суперпозиции (функционального разложения, логической сети) по возможности наименьшего числа булевых функций, зависящих не более чем от k переменных.*

Предполагается, что каждая из функций, входящих в суперпозицию, может быть реализована на одном LUT- k , поэтому минимизация числа булевых функций, входящих в полученную суперпозицию, приводит к минимизации числа программируемых LUT- k в схеме FPGA. Сформулированная в таком виде задача, возникающая на этапе логического проектирования FPGA, была известна в теории булевых функций и ранее (до появления FPGA) [7]. Вместо программируемых логических элементов LUT рассматривались универсальные логические модули либо мультиплексоры с числом k управляющих входов. Поэтому направление работ, связанное с развитием методов декомпозиции булевых функций, было привлечено в качестве теоретической базы синтеза структур FPGA [8]. Такой подход был близок и к синтезу схем на базе постоянных запоминающих устройств (ПЗУ) [9], так как LUT может рассматриваться как программируемое ПЗУ с k адресными двоичными входами и одним выходом. Таким ПЗУ может быть реализована любая булева функция, зависящая от k переменных.

Вместе с тем методы декомпозиции систем булевых функций были развиты для матричных форм исходного задания – таблиц истинности, либо матричных форм систем ДНФ. Чтобы воспользоваться такими методами декомпозиции, нужен был переход от логических уравнений (скобочных форм) к матричным формам задания систем функций. Так как размерности задач были достаточно большими, то данный переход был не всегда возможен; поэтому выполнялась кластеризация (выделение блоков, подсхем) функционального описания. Например, в синтезаторе LeonardoSpectrum [10] был введен специальный параметр, задающий размеры кластеров (подсхем), для которых применяется независимая логическая оптимизация.

Заметим, что существующие методы технологически независимой оптимизации [11], основанные на факторизации алгебраических представлений булевых функций и применяемые при синтезе схем из библиотечных элементов, оказались недостаточно эффективными, поскольку последующий этап технологического отображения, связанный с укрупнением либо разбиением алгебраических уравнений (таким, чтобы каждое из них зависело не более чем от k переменных), был затруднен из-за нерегулярной структуры оптимизированных логических выражений. В это время технологически независимую оптимизацию при синтезе FPGA предложили вести на базе BDD (см., например, [12]), которые явились эффективным аппаратом для верификации цифровых систем. Логические уравнения, соответствующие BDD, описывают каскадную схему в базисе мультиплексоров с одним управляющим входом и могут эффективно покрываться базовыми LUT- k . Кроме того, много научных статей и монографий (см., например, [13, 14]) было посвящено нахождению порядка переменных, по которым ведется построение BDD, что позволило сокращать размер BDD, т. е. число формул разложения Шеннона, описывающих BDD. Применение BDD при синтезе FPGA рассмотрено в большом числе научных работ (см., в частности, [15]).

В 2006 г. был опубликован обзор [16], посвященный различным аспектам проектирования FPGA (трассировке соединений, сокращению энергопотребления, верификации и др.); в нем процитировано 219 работ, в том числе монографии и статьи по логическому синтезу структур FPGA.

Современные САПР (системы автоматизированного проектирования) FPGA содержат программы, реализующие эффективные методы решения задачи синтеза комбинационных структур FPGA. Синтезатор LeonardoSpectrum для каждого из семейств FPGA при синтезе опирается на свою технологическую библиотеку, состав которой доступен для пользователей. Подробности (методы, алгоритмы) логического синтеза в САПР ISE для пользователей скрыты, проектировщик может управлять синтезом с помощью задания определенных опций синтеза.

Разработка методов, алгоритмов и программ для решения задачи реализации комбинационной логики в FPGA не прекращается и в настоящее время. Например, в работах [17, 18] развивается подход, связанный с декомпозицией BDD векторной булевой функции. Корневой вершине такой BDD соответствует система функций, а листовые вершины задают значения системы функций на интервалах булева пространства – путях из корневой вершины к листовым. В работе [19] для случая FPGA описывается система BDS-pga, которая развивает известную систему BDS [20]. Эта система имеет средства дополнительной оптимизации BDD, использующие поиск в BDD подфункций, выражаемых через дизъюнкцию, конъюнкцию, сумму по модулю 2 и через простую (мультиплексорную) декомпозицию. В работе [21] развиваются идеи декомпозиции булевых функций на основе фундаментальной работы Ашенхерста [22] с применением подхода, связанного с решением проблемы выполнимости конъюнктивной нормальной формы булевой функции [23], и, в частности, утверждается, что такой подход позволяет обрабатывать функции, зависящие от нескольких сотен переменных.

В работе [24] исследован подход, связанный с повторным синтезом. Эксперименты показали, что смена технологических библиотек и сохранение RTL-описаний получаемых схем позволяют добиться некоторого улучшения результатов реализации комбинационных блоков в FPGA. Такой подход позволяет улучшить результаты, если размерность задачи проектирования логической схемы достаточно велика. Для небольших размерностей систем булевых функций изменение формы исходного описания мало влияет на результат синтеза, так как синтезаторы имеют собственные встроенные программы технологически независимой оптимизации, приводящие различные исходные формы к одной и той же внутренней форме, по которой и будет построена результирующая логическая схема. Более того, изменение формы исходного описания может привести и к ухудшению результатов синтеза. Вместе с тем лучших результатов можно добиться не повторным синтезом, а предварительной глобальной логической оптимизацией исходного описания комбинационной схемы. Оптимизированное описание и следует подавать на вход промышленного синтезатора [24]. Это было проверено экспериментально на большом потоке промышленных примеров и показало эффективность для синтеза схем из библиотечных элементов [25] в промышленном синтезаторе LeonardoSpectrum. Такой подход предлагается применять при синтезе комбинационных сетей из LUT- k при синтезе FPGA.

Программы технологически независимой логической оптимизации. Для уменьшения сложности комбинационных блоков FPGA перед выполнением синтеза в промышленных синтезаторах предлагается осуществлять логическую минимизацию реализуемых функциональных описаний комбинационных блоков в новом классе BDD-представлений (с нахождением не только равных, но и взаимно инверсных коэффициентов разложения Шеннона) и проводить укрупнение уравнений, выполняя этап технологического отображения в базис LUT- k . Реализация такого подхода опирается на перечисленные ниже программные модули модифицированной платформенно-независимой системы логической оптимизации FLC-2, первая версия которой (FLC) была описана в работе [24].

Минимизация булевых функций в классе ДНФ выполняется программным модулем MINIM, который реализует различные методы и алгоритмы минимизации (совместной или отдельной) [26] систем булевых функций в классе ДНФ по разным критериям (числу элементарных конъюнкций; суммарному числу литералов в конъюнкциях, входящих в минимизированную систему ДНФ).

Минимизация булевых функций в классе многоуровневых представлений (BDDI-минимизация на основе разложения Шеннона) выполняется модулем BDD_Builder.

Разложением Шеннона булевой функции $f(\mathbf{x}) = f(x_1, \dots, x_n)$ по переменной x_i называется представление $f(\mathbf{x})$ в виде выражения

$$f(\mathbf{x}) = \bar{x}_i f_0 \vee x_i f_1.$$

Каждый из коэффициентов (cofactors) $f_0 = f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$, $f_1 = f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$ может быть разложен по одной из переменных множества $\{x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n\}$. Процесс разложения коэффициентов заканчивается, когда все n переменных будут использованы. В процессе разложения либо на последнем шаге некоторые коэффициенты могут вырождаться до констант 0, 1. На каждом шаге разложения выполняется поиск одинаковых и взаимно инверсных коэффициентов, из такого их множества оставляется один. Алгоритм, реализованный в программе BDD_Builder, подробно описан в статье [27]. При выборе очередной переменной разложения Шеннона алгоритм использует следующее правило: очередной переменной выбирается та, по которой вычисляется минимальное число различных взаимно инверсных подфункций (кофакторов) разложения Шеннона. Критерием оптимизации является минимум числа формул разложения Шеннона для задания системы исходных функций (минимальное число вершин в графе BDD, представляющем взаимосвязанные формулы разложения Шеннона).

Укрупнение уравнений выполняется программным модулем Presin, описанным в работе [28] и модифицированным для решения задач большей размерности. Программа, элиминируя некоторые промежуточные переменные в формулах разложения Шеннона, получает логические уравнения, каждое из которых содержит не более k различных булевых переменных. Критерием оптимизации является минимум числа таких уравнений.

Преобразование многоуровневых представлений булевых функций в двухуровневые матричные формы (системы ДНФ) осуществляется программным модулем Eliminate [24], который устраняет (элиминирует) все промежуточные внутренние переменные в исходных многоуровневых описаниях.

Конвертирование функциональных описаний систем булевых функций с языка SF в описания на VHDL и обратно выполняется программным модулем Kiscvt [29]. Этот модуль используется для преобразования входных данных с последующей логической оптимизацией в системе FLC-2 и для преобразования оптимизированных SF-описаний в VHDL-описания с целью их схемной реализации в зарубежных САПР.

Проиллюстрируем предлагаемый подход на примере системы ДНФ булевых функций

$$\begin{aligned} f^1 &= \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_4 \bar{x}_5 \bar{x}_6 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_4 \bar{x}_5 \bar{x}_6 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_5, \\ f^2 &= \bar{x}_1 \bar{x}_4 \bar{x}_5 \bar{x}_6 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_5 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_5 \bar{x}_6 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_4 \bar{x}_5 \bar{x}_6, \\ f^3 &= \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_6 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_4 \bar{x}_6 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_3 \bar{x}_4 \bar{x}_6 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_4 \bar{x}_5 \bar{x}_6 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_5 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_5, \end{aligned}$$

заданных в матричной форме (табл. 1). Пусть требуется реализовать эту систему функций логической сетью в базисе LUT-4 ($k = 4$). Будем использовать для логической оптимизации системы ДНФ булевых функций (табл. 1) сначала программу BDD_Builder, а затем программу Presin.

Таблица 1
Пример системы ДНФ трех булевых функций

T^x	B^f
$x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6$	$f^1 \ f^2 \ f^3$
1 1 - 0 1 0	1 0 0
0 - - 1 0 1	1 0 0
0 - - 0 1 0	0 1 0
0 - 0 - 1 -	0 1 0
1 1 1 - 1 0	0 1 0
1 0 - 1 0 1	0 1 0

Окончание табл. 1

T^x						B^f		
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	f^1	f^2	f^3
1	0	0	-	-	1	0	0	1
1	0	-	1	-	1	0	0	1
1	-	0	1	-	1	0	0	1
0	1	-	0	1	0	0	0	1
1	0	-	-	1	-	0	0	1
-	1	0	-	1	-	1	0	1

В результате BDD-оптимизации были получены логические формулы многоуровневого представления

$$\begin{aligned}
 f^1 &= \bar{x}_1 \psi^1 \vee x_1 \psi^2; & f^2 &= \bar{x}_1 \varphi^3 \vee x_1 \psi^4; & f^3 &= \bar{x}_1 \psi^2 \vee x_1 \psi^6; \\
 \psi^1 &= \bar{x}_2 s^1 \vee x_2 \varphi^2; & \psi^2 &= x_2 \varphi^3; & \psi^4 &= \bar{x}_2 s^1 \vee x_2 \varphi^4; & \psi^6 &= \bar{x}_2 \varphi^5 \vee x_2 \varphi^6; \\
 \varphi^2 &= \bar{x}_3 s^2 \vee x_3 s^1; & \varphi^3 &= \bar{x}_3 \lambda^3 \vee x_3 s^4; & \varphi^4 &= x_3 \lambda^4; & \varphi^5 &= \bar{x}_3 \lambda^2 \vee x_3 s^2; & \varphi^6 &= \bar{x}_3 s^2; \\
 s^1 &= x_4 \lambda^1; & s^2 &= \bar{x}_4 \lambda^3 \vee x_4 \lambda^2; & s^4 &= \bar{x}_4 \lambda^4; \\
 \lambda^1 &= \bar{x}_5 \omega^1; & \lambda^2 &= \bar{x}_5 \omega^1 \vee x_5; & \lambda^3 &= x_5; & \lambda^4 &= x_5 \omega^2; & \omega^1 &= x_6; & \omega^2 &= \bar{x}_6,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

которому соответствует граф BDD на рис. 1.

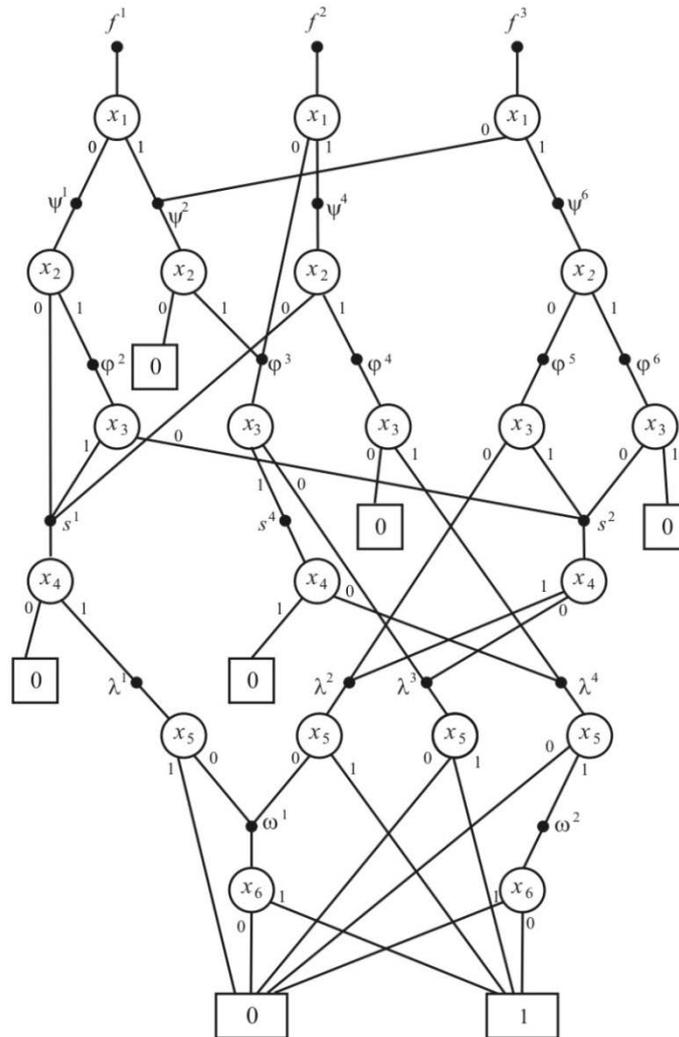


Рис. 1. Многоуровневые графические представления системы функций (1)

В результате укрупнения уравнений (промежуточные переменные $\varphi^2, \varphi^4, \varphi^5, \varphi^6, s^4, \lambda^1, \lambda^3, w^1, w^2$ были элиминированы) программа Presin для $k = 4$ получает 11 логических уравнений:

$$\begin{aligned} f^1 &= \bar{x}_1 \psi^1 \vee x_1 x_2 \varphi^3; & f^2 &= \bar{x}_1 \varphi^3 \vee x_1 \psi^4; & f^3 &= \bar{x}_1 \psi^6 \vee \bar{x}_1 x_2 \varphi^3; \\ \psi^1 &= \bar{s}_1 x_3 \vee x_2 \bar{x}_3 \bar{s}^2 \vee \bar{x}_2 \bar{s}^1; & \varphi^3 &= \bar{x}_3 x_5 \vee x_3 (\bar{x}_4 (x_5 \bar{x}_6)); & \psi^4 &= \bar{x}_2 s^1 \vee x_2 x_3 \lambda^4; \\ \psi^6 &= x_2 \bar{x}_3 \bar{s}^2 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3 \lambda^2 \vee x_2 x_3 s^2; & s^1 &= x_4 (\bar{x}_5 x_6); & \lambda^4 &= x_5 \bar{x}_6; & s^2 &= \bar{x}_4 x_5 \vee x_4 (\bar{x}_5 x_6 \vee x_5); & \lambda^2 &= \bar{x}_5 x_6 \vee x_5, \end{aligned} \quad (2)$$

каждое из которых может быть реализовано на одном LUT-4 (рис. 2).

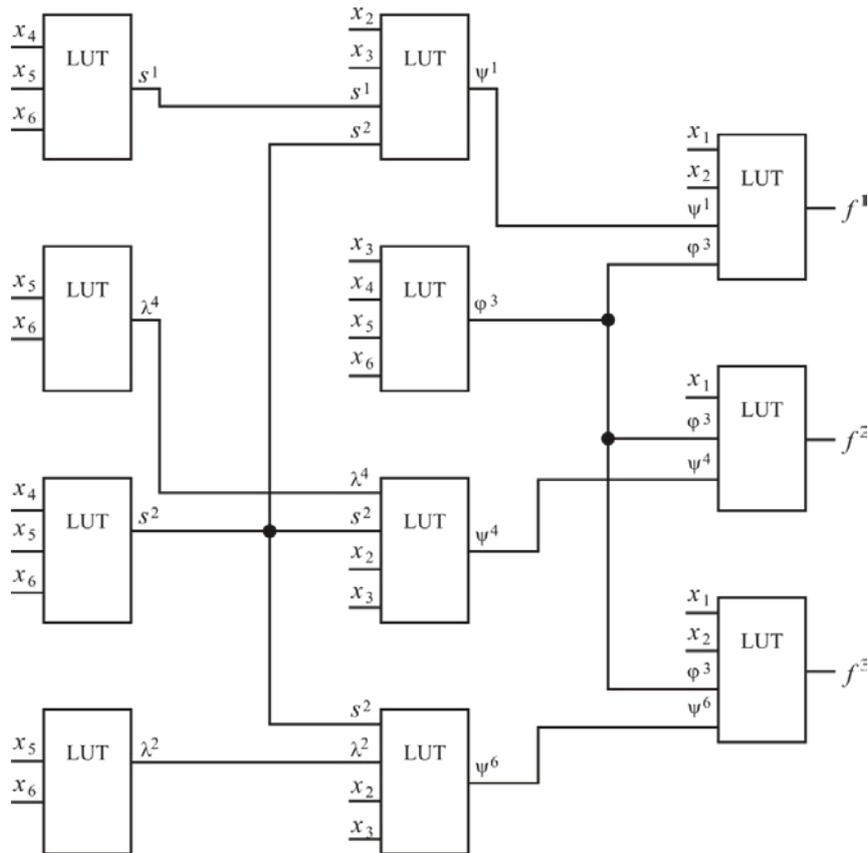


Рис. 2. Схемная реализация логических уравнений (2) базовыми LUT-4

Наборы примеров для экспериментов. Все исходные описания примеров блоков комбинационной логики для экспериментальных исследований задавали различные формы систем полностью определенных булевых функций. Для представления примеров были использованы языки VHDL [10] и SF [24]. VHDL является входным языком зарубежных систем проектирования, SF – языком представления входных и выходных данных в системе FLC-2.

Приняты следующие обозначения: n – число входных переменных, m – число выходных переменных, LUT- k – число элементов (сложность) FPGA, Delay – задержка схемы в наносекундах (нс).

Набор примеров 1 – матричные описания систем ДНФ булевых функций, взятые из библиотеки примеров [31].

Набор примеров 2 – многоуровневые описания блоков комбинационной логики в виде взаимосвязанных уравнений из библиотеки примеров LGSynth'89 (URL: <https://ddd.fit.cvut.cz/prj/Benchmarks>). Каждое из уравнений задавалось в виде ДНФ.

Набор примеров 3 – псевдослучайные системы ДНФ, матричные описания которых генерировались в системе FLC-2. Псевдослучайные примеры систем ДНФ характеризуются различ-

ными средними значениями числа конъюнкций, числа литералов в конъюнкциях и средними значениями числа вхождений конъюнкций в ДНФ функций системы (n_1 – среднее число литералов в элементарной конъюнкции; m_1 – среднее число вхождений конъюнкции в ДНФ функций системы). Для первого псевдослучайного примера GenP_1 число n столбцов троичной матрицы T^x , задающей конъюнкции, равно 15; число k строк матриц T^x , B^f – 664; среднее число n_1 определенных (0, 1) элементов в строке матрицы T^x – 10; среднее число m_1 единичных значений в строке матрицы B^f – 3 (табл. 2).

Таблица 2

Параметры примеров псевдослучайных ДНФ систем булевых функций

Пример	n	n_1	m	m_1	k
GenP_1	15	10	7	3	664
GenP_2	20	15	10	3	400
GenP_3	30	20	10	3	100
GenP_4	40	30	10	3	100
GenP_5	20	15	10	3	100
GenP_6	20	10	10	3	100
GenP_7	20	5	10	3	100
GenP_8	20	20	10	3	100

Экспериментальные исследования. Для проверки эффективности влияния алгоритмов логической минимизации на сложность (площадь) логических схем FPGA были проведены вычислительные эксперименты. Для каждого из трех наборов примеров был проведен эксперимент по схемной реализации в двух системах проектирования схем FPGA для двух семейств FPGA с архитектурами на основе программируемых элементов LUT-6. Синтез схем FPGA по VHDL-описаниям выполнялся в синтезаторе LeonardoSpectrum [10] версии 2010a.7 при одних и тех же режимах (опциях) синтеза и в синтезаторе ISE Xilinx (версии 13.1) при установках по умолчанию. Сложность реализации схемы подсчитывалась в числе LUT-6 для двух семейств FPGA: Virtex-II PRO и Virtex-5 [30]. Каждая из этих FPGA имеет LUT-6 в качестве базовых программируемых элементов. Число таких элементов, содержащихся в схеме, выдают синтезаторы LeonardoSpectrum и ISE Xilinx после выполнения этапа логического проектирования.

Эксперимент 1. Схемная реализация на FPGA матричных описаний систем ДНФ булевых функций. Этапы выполнения эксперимента 1 показаны на рис. 3, результаты представлены в табл. 3–5, где жирным шрифтом выделены лучшие по числу базовых LUT-6 решения.

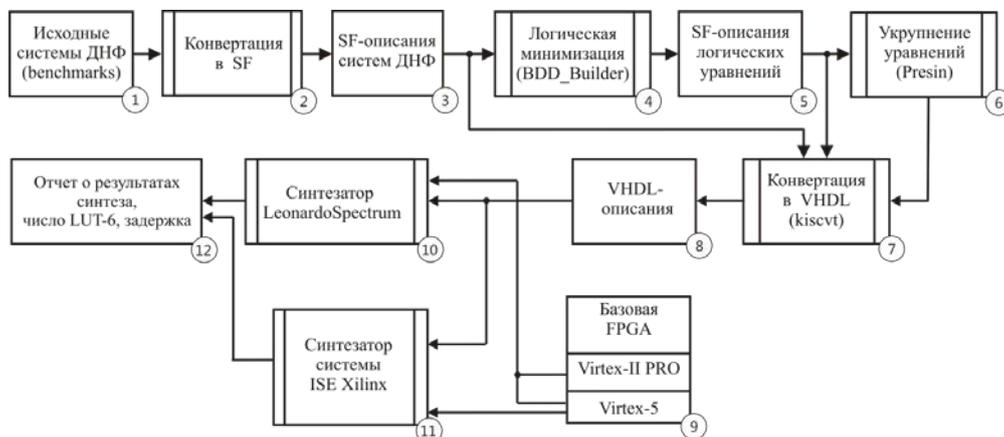


Рис. 3. Этапы эксперимента 1

Таблица 3

Схемная реализация систем ДНФ на FPGA Virtex-II PRO в синтезаторе LeonardoSpectrum

Пример	n	m	Исходное VHDL-описание		BDDI		BDDI и Presin, $k = 6$		Число уравнений, $k = 6$
			LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	
SQR6	6	12	137	15	24	8	38	11	30
SQN	7	3	96	16	20	9	49	13	20
rd73	7	3	88	13	21	10	30	14	15
Radd	8	5	99	14	13	8	18	9	14
Root	8	5	178	20	37	12	62	12	33
m2	8	16	199	17	56	11	97	14	57
m3	8	16	225	17	69	12	130	15	66
dc2	8	7	61	14	29	9	42	14	24
Dist	8	5	352	19	67	13	126	15	66
ADR4	8	5	367	17	9	8	19	11	12
z9sym	9	1	245	17	18	13	26	13	9
ADDM4	9	8	689	20	88	13	198	21	92
LIFE	9	1	77	18	19	11	48	17	24
MAX512	9	6	545	17	106	14	207	20	104
MAX1024	10	6	1006	24	193	14	345	17	190
SYM10	10	1	670	20	20	13	33	14	16
ADD6	12	7	1194	22	20	10	57	14	26
ALU1	12	8	8	5	8	5	8	5	8
BR1	12	8	63	13	57	15	70	15	47
BR2	12	8	66	16	37	12	55	14	35
T3	12	8	76	15	31	12	39	13	32
tial	14	8	678	23	527	27	657	21	352
B12	15	9	94	13	27	10	29	10	24
gary	15	11	224	16	190	15	225	19	118
M181	15	9	98	13	27	10	31	9	24
intb	15	7	921	23	550	24	775	28	431
b2	16	17	472	19	439	21	612	20	369
RYY6	16	1	7	9	6	9	6	8	4
IN2	19	10	287	17	168	21	278	23	146
Sist4	25	20	453	24	213	21	349	23	166
vtx1	27	6	52	12	49	14	93	19	48
x9dn	27	7	78	15	50	15	103	18	59
X1	51	35	254	21	217	18	418	25	216
soar	83	94	349	14	250	15	312	15	216

Таблица 4

Схемная реализация систем ДНФ на FPGA Virtex-5 в синтезаторе LeonardoSpectrum

Пример	n	m	Исходное VHDL-описание		BDDI		BDDI и Presin, $k = 6$		Число уравнений, $k = 6$
			LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	
SQR6	6	12	118	6	22	5	22	5	30
SQN	7	3	126	6	22	5	56	6	20
rd73	7	3	212	6	21	5	28	5	15
radd	8	5	116	6	16	5	25	5	14
root	8	5	212	6	50	5	93	6	33
m2	8	16	243	6	61	5	130	5	57
m3	8	16	315	6	74	5	163	6	66
dc2	8	7	85	6	28	5	41	5	24
dist	8	5	452	7	80	5	162	6	66
ADR4	8	5	559	6	16	5	28	5	12
z9sym	9	1	304	6	19	5	23	5	9
ADDM4	9	8	1031	7	98	6	239	6	92
LIFE	9	1	75	6	25	5	56	6	24
MAX512	9	6	728	7	132	5	292	6	104
MAX1024	10	6	1388	7	247	5	529	6	190
SYM10	10	1	1045	7	21	5	37	6	16

Окончание табл. 4

Пример	n	m	Исходное VHDL-описание		BDDI		BDDI и Presin, $k = 6$		Число уравнений, $k = 6$
			LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	
ADD6	12	7	1705	7	23	5	76	6	26
ALU1	12	8	8	4	8	4	8	4	8
BR1	12	8	71	6	72	5	87	5	47
BR2	12	8	88	6	51	5	68	5	35
T3	12	8	91	6	47	5	61	6	32
tial	14	8	1072	7	800	7	981	6	352
B12	15	9	124	6	32	5	34	5	24
gary	15	11	285	6	214	6	336	6	118
M181	15	9	125	6	32	5	34	5	24
intb	15	7	1397	7	864	7	1181	7	431
b2	16	17	629	7	707	6	947	6	369
RYY6	16	1	13	5	7	6	7	5	4
IN2	19	10	401	6	225	6	370	7	146
Sist4	25	20	637	6	254	6	436	7	166
vtx1	27	6	74	5	62	6	124	6	48
x9dn	27	7	102	6	64	6	137	6	59
X1	51	35	340	6	340	6	590	7	216
soar	83	94	455	6	294	6	409	6	216

Таблица 5

Схемная реализация систем ДНФ на FPGA Virtex-5 в синтезаторе ISE Xilinx

Пример	n	m	Исходное VHDL-описание		BDDI		Минимизация (MINIM)		Число уравнений, $k = 6$
			LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	
m3	8	16	43	5,826	40	4,965	41	4,966	66
dist	8	5	29	6,008	43	6,006	36	6,154	66
ADR4	8	5	6	4,632	6	4,632	6	4,632	12
z9sym	9	1	9	5,790	9	5,790	9	5,790	9
ADDM4	9	8	47	6,126	43	5,658	31	5,491	92
MAX512	9	6	42	5,614	57	6,534	60	6,427	104
MAX1024	10	6	121	6,867	116	6,738	122	7,068	190
SYM10	10	1	15	5,962	15	5,962	15	6,044	16
ADD6	12	7	10	4,701	9	5,198	10	4,701	26
tial	14	8	290	8,077	276	9,046	299	8,270	352
gary	15	11	116	9,149	96	6,891	101	6,808	118
IN0	15	11	100	6,658	95	7,040	112	8,211	118
intb	15	7	292	8,167	348	8,817	297	8,112	431
b2	16	17	326	7,603	295	7,504	274	8,328	369
IN2	19	10	11	6,990	86	6,854	92	6,658	146
Sist4	25	20	95	7,595	85	7,379	77	7,495	166
X1	51	35	80	5,842	82	5,663	80	5,842	216
soar	83	94	150	6,600	159	7,023	152	6,482	216

Эксперимент 2. Схемная реализация на FPGA многоуровневых описаний систем булевых функций. Начальные этапы выполнения эксперимента 2 показаны на рис. 4, после них осуществляется переход на этап 3 либо 7 эксперимента 1 (рис. 3). Например, после выполнения элиминации промежуточных переменных получаются системы ДНФ булевых функций (см. блок 3 на рис. 3). Многоуровневая логика реализуется на FPGA без логической минимизации (см. переход на блок 7, рис. 3) либо сводится к представлению в виде системы ДНФ и реализуется далее по маршруту на рис. 3. Результаты приведены в табл. 6–8.

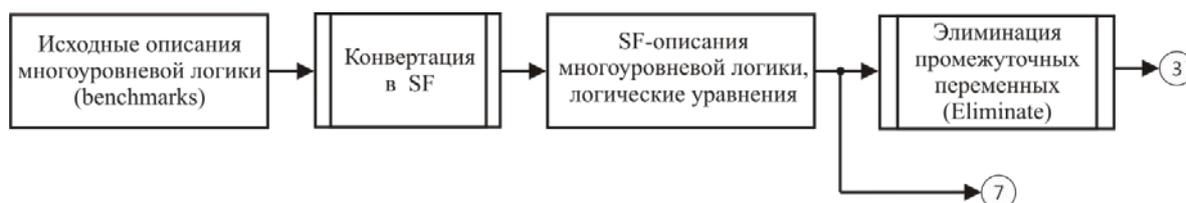


Рис. 4. Начальные этапы эксперимента 2

Таблица 6

Схемная реализация многоуровневых представлений систем булевых функций на FPGA Virtex-II PRO в синтезаторе LeonardoSpectrum

Пример	n	m	Исходное многоуровневое VHDL-описание		VHDL-описание системы ДНФ		BDDI		BDDI и Presin, $k = 6$		Число уравнений, $k = 6$
			LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	
B9	16	5	36	10	75	14	34	12	74	16	42
TTT2	24	21	105	15	178	14	81	14	126	15	65
UNREG	36	16	32	8	34	8	32	17	33	8	16
TOO_LARGE	38	3	1664	25	1361	24	983	32	1749	42	833
C880	60	26	47	15	38	11	53	22	92	21	78
X4	94	71	166	14	221	16	262	17	377	18	195
I8	133	81	426	23	251	18	385	21	531	20	340
X3	135	99	391	14	562	18	448	24	703	24	352
I7	199	67	32	8	32	8	32	8	32	8	67

Таблица 7

Схемная реализация многоуровневых представлений систем булевых функций на FPGA Virtex-5 в синтезаторе LeonardoSpectrum

Пример	n	m	Исходное многоуровневое VHDL-описание		VHDL-описание системы ДНФ		BDDI		BDDI и Presin, $k = 6$		Число уравнений, $k = 6$
			LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	
B9	16	5	48	5	114	6	38	5	97	6	42
TTT2r	24	21	137	6	261	6	113	5	174	6	65
UNREG	36	16	63	5	51	5	51	5	51	5	16
TOO_LARGE	38	3	2550	7	2056	7	1599	8	2808	9	833
C880	60	26	59	6	52	6	55	7	130	6	78
X4	94	71	288	5	321	5	333	6	507	6	195
I8r	133	81	709	6	362	6	376	6	709	6	340
X3	135	99	469	6	770	6	555	7	902	7	352
I7	199	67	31	4	31	4	31	4	31	4	67

Таблица 8

Схемная реализация многоуровневых представлений систем булевых функций на FPGA Virtex-5 в синтезаторе ISE Xilinx

Пример	n	m	Исходное многоуровневое VHDL-описание		VHDL-описание системы ДНФ		BDDI		Число уравнений, $k = 6$
			LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	
B9	16	5	25	5,517	20	5,948	15	5,775	42
TTT2	24	21	43	5,638	46	6,238	51	6,604	65
UNREG	36	16	16	4,180	16	4,180	16	4,180	16
TOO_LARGE	38	3	113	7,880	107	8,080	579	12,818	833
C880	60	26	34	6,590	33	6,680	34	7,110	78
X4	94	71	113	6,548	122	5,584	160	6,500	195
I8	133	81	166	7,690	167	8,045	227	7,366	340
X3	135	99	180	6,471	202	6,490	227	7,466	352
I7	199	67	31	4,136	31	4,136	31	4,136	67

Эксперимент 3. Схемная реализация на FPGA псевдослучайных систем ДНФ. Начальные этапы выполнения эксперимента показаны на рис. 5, после них осуществляется переход на этап 4 либо 7 эксперимента 1 (см. рис. 3). Результаты приведены в табл. 9–11.

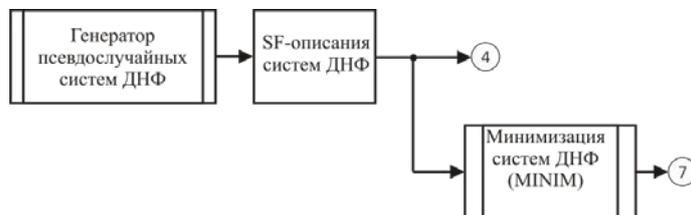


Рис. 5. Начальные этапы эксперимента 3

Таблица 9

Схемная реализация псевдослучайных систем ДНФ на FPGA Virtex-II PRO в синтезаторе LeonardoSpectrum

Пример	Синтез по исходным VHDL-описаниям		Синтез после отдельной минимизации функций в классе ДНФ, программа из работы [26]		Синтез после совместной минимизации функций в классе ДНФ, программа Espresso [32]	
	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay
GenP_1	1624	21	1865	22	1430	21
GenP_2	1382	19	1505	18	1388	19
GenP_3	582	17	583	16	588	17
GenP_4	833	17	830	16	829	16
GenP_5	439	15	442	14	438	16
GenP_6	395	16	392	16	391	16
GenP_7	249	14	246	15	232	14
GenP_8	456	17	458	16	464	16

Таблица 10

Схемная реализация псевдослучайных систем ДНФ на FPGA Virtex-5 в синтезаторе LeonardoSpectrum

Пример	Исходное VHDL-описание		BDDI		BDDI и Presin, $k = 6$		Число уравнений, $k = 6$
	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay	
GenP_1	2146	7	11730	6	15186	8	6153
GenP_2	1628	7	20225	7	24482	7	15286
GenP_3	675	6	4218	8	8183	8	2735
GenP_4	941	6	3023	8	6766	8	2118
GenP_5	499	6	3984	8	6393	8	3833
GenP_6	435	6	8186	8	12425	8	6248
GenP_7	282	6	14630	8	18957	8	521
GenP_8	543	7	649	7	968	7	3629

Таблица 11

Схемная реализация псевдослучайных систем ДНФ на FPGA Virtex-5 в синтезаторе ISE Xilinx

Пример	Исходное VHDL-описание		BDDI	
	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay
GenP_1	988	9,299	6702	10,637
GenP_2	876	9,385	14278	12,325
GenP_3	319	8,171	1699	11,117
GenP_4	437	8,798	1471	11,677
GenP_5	249	8,277	1685	10,352
GenP_6	218	7,756	3307	11,172
GenP_7	148	7,022	5308	12,112
GenP_8	295	8,938	360	8,638

Эксперимент 4. Схемная реализация примеров из трех наборов в системе проектирования Vivado (компания Xilinx). Целью эксперимента является сравнение результатов синтеза по исходным описаниям с результатами синтеза по минимизированным многоуровневым BDDI-представлениям, полученным программой BDD_Builder. Результаты исследований для микросхемы xa712tсpg238-2I семейства Artix-7 приведены в табл. 12.

Таблица 12
Результаты эксперимента 4 на FPGA Artix-7
в синтезаторе Vivado Xilinx

Пример	Исходное VHDL-описание		BDDI	
	LUT-6	Delay	LUT-6	Delay
<i>Набор примеров 1 (системы ДНФ)</i>				
m3	36	7,744	25	7,574
dist	20	7,023	20	6,876
ADR4	7	7,716	4	7,118
z9sym	6	7,425	6	7,015
ADDM4	45	8,064	27	7,408
MAX512	37	8,294	38	7,765
MAX1024	72	8,633	73	8,260
SYM10	9	7,360	9	7,483
ADD6	9	7,780	6	7,526
tial	288	12,356	199	11,114
gary	109	9,799	72	8,945
IN0	105	9,628	72	8,945
intb	270	11,561	274	11,170
b2	191	11,083	267	11,329
IN2	87	9,741	73	9,315
Sist4	121	9,752	71	9,276
X1	73	10,730	72	10,419
soar	137	–	134	–
<i>Набор примеров 2 (многоуровневые описания)</i>				
B9	23	10,196	16	8,081
TTT2	37	9,783	37	8,105
UNREG	16	8,563	16	8,545
TOO_LARGE	98	9,887	547	16,460
C880	25	9,783	24	9,745
X4	84	–	101	–
I8	165	–	165	–
X3	152	–	178	–
I7	30	–	30	–
<i>Набор примеров 3 (псевдослучайные системы ДНФ)</i>				
GenP_1	1155	18,241	1690	18,981
GenP_2	915	16,886	10584	–
GenP_3	341	12,654	436	13,008
GenP_4	515	13,904	599	14,229
GenP_5	288	11,661	322	11,046
GenP_6	255	11,767	274	11,431
GenP_7	142	10,637	147	10,317
GenP_8	294	12,080	296	12,499

Для набора примеров 2 (многоуровневых описаний систем булевых функций) в эксперименте 4 осуществлялся переход к матричным представлениям, которые обрабатывались программой BDD_Builder. Микросхемы xa712tсpg238-2I содержат 112 информационных входных и выходных полюсов, поэтому в табл. 12 для проектов soar, X1, I8, X3, I7, для которых суммарное число входных и выходных переменных превышает 112, топологическая реализация (имплементация) была невозможна. В связи с этим задержки схем (Delay) не были посчитаны. Для проекта GenP_2 топологическая реализация также не была проведена из-за большого числа (10 584) LUT-6.

Таблица 13

Сравнение предложенного подхода с исследовательскими программами

Пример	n	m	Исходное VHDL-описание	BDDI	Результаты из работы [18]	Пример	n	m	BDDI и Presin, $k = 5$	Результаты из работы [19]
			LUT-6	LUT-6	LUT-6				LUT-5	LUT-5
B12	15	9	18	18	20	ALU2	10	6	35	41
F51M	8	8	11	13	10	ALU4	14	8	42	190
Pcle	19	9	11	12	12	B9	16	5	51	40
RD73	7	3	6	6	6	C880	60	26	87	103
SQN	7	3	6	6	9	Count	35	16	24	26
SQR6	6	12	10	10	10	Z4ml	7	4	8	5
X2	10	7	7	7	11					
Z5xp1	7	10	13	16	13					

В табл. 13 представлены результаты сравнения предложенного подхода с данными, полученными в работах [18, 19]. Сравнение приведено для табл. 2 (см. столбец MultiDec и ISE) из работы [18], где опубликованы результаты для промышленных примеров небольшой размерности. Приведенные в правой части табл. 13 результаты взяты из табл. 7 (см. столбец BDS-pga и FlowMap) работы [19], они даны для LUT-5. Однако, как показывает анализ современных архитектур FPGA, при создании новых семейств был совершен переход от архитектур с LUT-4 к архитектурам FPGA с LUT-6, поэтому результаты работы [19] представляют только научный интерес.

Заключение. Анализ результатов исследований позволяет сделать следующие выводы. Синтезатор системы ISE Xilinx (версии 13.1) получает лучшие результаты синтеза как для микросхем семейства Virtex-II PRO, так и для микросхем семейства Virtex-5 по сравнению с синтезатором LeonardoSpectrum (версии 2010a.7).

Применение предварительной BDDI-минимизации и синтез по минимизированным BDDI-представлениям практически всегда дают возможность улучшить результаты синтеза в синтезаторе LeonardoSpectrum.

Синтезатор ISE Xilinx является эффективным инструментом синтеза. Как показывают результаты эксперимента 1 (см. табл. 5), только в половине случаев предварительная логическая минимизация позволяет улучшить результаты синтеза на первом наборе примеров.

Синтез по укрупненным логическим уравнениям, полученным программой Presin из BDDI-представлений, не позволяет улучшить результаты синтеза в обоих синтезаторах. Число укрупненных уравнений может служить оценкой сложности схемы в базе LUT- k на этапе логического проектирования. Такая оценка возможна в условиях, когда не принимаются во внимание ни топологические аспекты (разводка соединений) проектирования, ни энергопотребление (нагрузочные способности элементов) проектируемых схем FPGA.

Реализация в LeonardoSpectrum многоуровневых описаний (эксперимент 2) может быть эффективной при замене исходного многоуровневого описания двухуровневым описанием (системой ДНФ) и применении как BDDI-минимизации, так и минимизации в классе ДНФ (см. табл. 7).

Для испытанных псевдослучайных примеров систем функций применение минимизации в классе ДНФ практически не дает эффекта, а применение BDDI-минимизации значительно ухудшает результаты синтеза.

Сравнение результатов синтеза схем в системах ISE и Vivado (компания Xilinx) показывает, что алгоритмы синтеза в системе Vivado являются более эффективными по сравнению с алгоритмами, реализованными в системе ISE. Это касается результатов синтеза как по исходным описаниям, так и по оптимизированным BDDI-представлениям систем функций. В системе Vivado улучшены алгоритмы трассировки для FPGA новых семейств [33]. Она поддерживает только новые семейства FPGA, на одном из которых (Artix-7) было проведено сравнение слож-

ности схем. Разница в результатах синтеза в системах ISE и Vivado особенно проявляется на примерах псевдослучайных систем ДНФ булевых функций, преимущества той или иной системы проектирования могут быть значительными. Здесь прослеживается общая закономерность, когда появление новых версий САПР приводит к изменению результатов проектирования: для одних проектов результаты в новых версиях САПР улучшаются, а для других могут быть ухудшены. Например, в работе [34] были изучены девять версий синтезатора LeonardoSpectrum и подтверждена аналогичная ситуация при оценке эффективности получаемых решений (проектов логических схем) по параметрам площади и быстродействия.

Для промышленных примеров схем как для системы ISE, так и для Vivado переход от систем ДНФ к многоуровневым оптимизированным BDDI-представлениям чаще всего позволяет уменьшить сложность схем, оцениваемых в числе LUT-6.

Предложенный в настоящей работе подход является более конкурентоспособным по сравнению с зарубежными исследовательскими программами, результаты сравнения на примерах из работ [18, 19] приведены в табл. 13.

Разработанные программы технологически независимой оптимизации являются эффективными, прошли экспериментальную проверку на примерах схем практической размерности и включены в отечественную систему логической оптимизации функционально-структурных описаний цифровых устройств. Использование отечественных программ логической оптимизации позволяет во многих случаях улучшить результаты синтеза комбинационных структур в зарубежных САПР реализации проектов цифровых устройств на FPGA.

Список использованных источников

1. Зотов, Ю. В. Проектирование цифровых устройств на основе ПЛИС фирмы XILINX в САПР WebPack ISE / Ю. В. Зотов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2003. – 624 с.
2. Designing with Xilinx® FPGAs: Using Vivado / ed. S. Churiwala. – Springer, 2017. – 260 p.
3. Реконфигурируемые мультимониторные вычислительные структуры / И. А. Каляев [и др.] ; под общ. ред. И. А. Каляева. – Ростов н/Д : Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. – 320 с.
4. Nakahara, H. A deep convolutional neural network based on nested residue number system / H. Nakahara, T. Sasao // 25th Intern. Conf. on Field Programmable Logic and Applications (FPL), Lausanne, 2–4 September 2015. – Lausanne, 2015. – P. 1–6.
5. Петровский, Ал. А. Быстрое проектирование систем мультимедиа от прототипа / Ал. А. Петровский, А. В. Станкевич, А. А. Петровский. – Минск : Бестпринт, 2011. – 410 с.
6. Соловьев, В. В. Архитектуры ПЛИС фирмы Xilinx: FPGA и CPLD 7-й серии / В. В. Соловьев. – М. : Горячая линия – Телеком, 2016. – 392 с.
7. Бибило, П. Н. Синтез комбинационных схем методами функциональной декомпозиции / П. Н. Бибило, С. В. Енин. – Минск : Наука и техника, 1987. – 189 с.
8. Sasao, T. FPGA design by generalized functional decomposition / T. Sasao // Representations of Discrete Functions / eds.: T. Sasao, M. Fujita. – Kluwer Academic Publishers, 1996. – P. 233–258.
9. Sasao, T. Memory-Based Logic Synthesis / T. Sasao. – N. Y. : Springer, 2011. – 189 p.
10. Бибило, П. Н. Системы проектирования интегральных схем на основе языка VHDL. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum / П. Н. Бибило. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 384 с.
11. MIS: a multiple-level logic optimization systems / R. K. Brayton [et al.] // IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1987. – Vol. 6, iss. 6. – P. 1062–1081.
12. Chang, S.-C. Technology mapping for TLU FPGA's based on decomposition of binary decision diagrams / S.-C. Chang, M. Marek-Sadowska, T. Hwang // IEEE Transactions Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1996. – Vol. 15, no. 10. – P. 1226–1235.
13. Meinel, C. Algorithms and Data Structures in VLSI Design: OBDD – Foundations and Applications / C. Meinel, T. Theobald. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1998. – 267 p.
14. Ebdndt, R. Advanced BDD Optimization / R. Ebdndt, G. Fey, R. Drechsler. – Springer, 2005. – 222 p.
15. Scholl, C. Functional Decomposition with Applications to FPGA Synthesis / C. Scholl. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 2001. – 288 p.
16. Chen, D. FPGA design automation: a survey / D. Chen, J. Cong, P. Pan // Foundations and Trends in Electronic Design Automation. – 2006. – Vol. 1, no. 3. – P. 195–330.
17. Kubica, M. SMTBDD: New form of BDD for logic synthesis / M. Kubica, D. Kania // Intern. J. of Electronics and Telecommunications. – 2016. – Vol. 62, no. 1. – P. 33–41.

18. Kubica, M. Decomposition of multi-output functions oriented to configurability of logic blocks / M. Kubica, D. Kania // *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences.* – 2017. – Vol. 65, no. 3. – P. 317–331.
19. Vemuri, N. BDD-based logic synthesis for LUT-6-based FPGAs / N. Vemuri, P. Kalla, R. Tessier // *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems.* – 2002. – Vol. 7, no. 4. – P. 501–525.
20. Yang, S. BDS: a BDD-based logic optimization system / S. Yang, M. Ciesielski // *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems.* – 2002. – Vol. 21, no. 7. – P. 866–876.
21. Lin, H.-P. Ashenurst decomposition using SAT and interpolation / H.-P. Lin, J.-H. R. Jiang, R.-R. Lee ; eds.: S. P. Khatri, K. Gulati // *Advanced Techniques in Logic Synthesis, Optimizations and Applications.* – Springer, 2010. – P. 67–85.
22. Ashenurst, R. L. The decomposition of switching functions / R. L. Ashenurst // *Annals of Computation Laboratory of Harvard University.* – Cambridge, Mass., 1959. – Vol. 29. – P. 74–116.
23. *Handbook of Satisfiability* / ed. A. Biere [et al.]. – IOS Press, 2009. – 980 p.
24. Бибило, П. Н. Логическое проектирование дискретных устройств с использованием производственно-фреймовой модели представления знаний / П. Н. Бибило, В. И. Романов. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 279 с.
25. Авдеев, Н. А. Эффективность логической оптимизации при синтезе комбинационных схем из библиотечных элементов / Н. А. Авдеев, П. Н. Бибило // *Микроэлектроника.* – 2015. – Т. 44, № 5. – С. 383–399.
26. Торопов, Н. Р. Минимизация систем булевых функций в классе ДНФ / Н. Р. Торопов // *Логическое проектирование.* – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1999. – Вып. 4. – С. 4–19.
27. Бибило, П. Н. Использование полиномов Жегалкина при минимизации многоуровневых представлений систем булевых функций на основе разложения Шеннона / П. Н. Бибило, Ю. Ю. Ланкевич // *Программная инженерия.* – 2017. – № 8. – С. 369–384.
28. Бибило, П. Н. Оптимизация многоуровневых представлений систем булевых функций при перепроектировании логических схем / П. Н. Бибило, В. И. Романов // *Управляющие системы и машины.* – 2006. – № 5. – С. 20–29.
29. Черемисинов, Д. И. Анализ и преобразование структурных описаний СБИС / Д. И. Черемисинов. – Минск : Беларус. навука, 2006. – 275 с.
30. Кузелин, О. М. Современные семейства ПЛИС фирмы Xilinx : справ. пособие / О. М. Кузелин, Д. А. Кнышев, Ю. В. Зотов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 440 с.
31. Jeong, C. Computer-aided design of digital systems / C. Jeong // *Department of Computer Science [Electronic resource].* – Mode of access: <http://www1.cs.columbia.edu/~cs6861/sis/espresso-examples/ex>. – Date of access: 20.03.2018.
32. *Logic Minimization Algorithm for VLSI Synthesis* / K. R. Brayton [et al.]. – Boston : Kluwer Academic Publishers, 1984. – 193 p.
33. Тарасов, И. Е. ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования / И. Е. Тарасов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2020. – 538 с.
34. Авдеев, Н. А. Эффективность проектирования заказных схем в синтезаторе LeonardoSpectrum / Н. А. Авдеев, П. Н. Бибило // *Современная электроника.* – 2015. – № 1. – С. 58–61.

References

1. Zotov Yu. V. *Proektirovanie cifrovyyh ustrojstv na osnove PLIS firmy XILINX v SAPR WebPack ISE. The Design of Digital Devices Based on FPGA in XILINX ISE WebPack CAD.* Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2003, 624 p. (in Russian).
2. *Designing with Xilinx FPGAs. Using Vivado.* In Churiwala S. (ed.). Springer, 2017, 260 p.
3. Kalyaev I. A., Levin I. I., Semernikov E. A., Shmojlov V. I. Rekonfiguriruemye mul'tikonvejernye vychislitel'nye struktury. *Multiconference Reconfigurable Computing Structures.* In Kalyaev I. A. (ed.). Rostov-on-Don, Izdatel'stvo Juzhnogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, 2008, 320 p. (in Russian).
4. Nakahara H., Sasao T. A deep convolutional neural network based on nested residue number system. *25th International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL), Lausanne, 2–4 September 2015.* Lausanne, 2015, pp. 1–6.
5. Petrovskij Al. A., Stankevich A. V., Petrovskij A. A. Bystroe proektirovanie sistem mul'timedia ot prototipa. *Rapid Design of Multimedia Systems from a Prototype.* Minsk, Bestprint, 2011, 410 p. (in Russian).

6. Solov'ev V. V. Arhitektury PLIS firmy Xilinx: FPGA i CPLD 7-j serii. *XILINX FPGA Architectures: FPGA and CPLD 7-Series*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2016, 392 p. (in Russian).
7. Bibilo P. N., Enin S. V. Sintez kombinacionnyh skhem metodami funkcional'noj dekompozicii. *Synthesis of Combinational Circuits by Methods of Functional Decomposition*. Minsk, Nauka i tekhnika, 1987, 189 p. (in Russian).
8. Sasao T. FPGA design by generalized functional decomposition. *Representations of Discrete Functions*. In Sasao T., Fujita M. (eds.). Kluwer Academic Publishers, 1996, pp. 233–258.
9. Sasao T. *Memory-Based Logic Synthesis*. New York, Springer, 2011, 189 p.
10. Bibilo P. N. Cistemy proektirovaniya integral'nyh skhem na osnove yazyka VHDL. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum. *Integrated Circuit Design Systems Based on the VHDL Language*. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum. Moscow, SOLON-Press, 2005, 384 p. (in Russian).
11. Brayton R. K., Rudell R., Sangiovanni-Vincentelli A. L., Wang A. R. MIS: A multiple-level logic optimization systems. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 1987, vol. 6, iss. 6, pp. 1062–1081.
12. Chang S.-C., Marek-Sadowska M., Hwang T. Technology mapping for TLU FPGA's based on decomposition of binary decision diagrams. *IEEE Transactions Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1996, vol. 15, no. 10, pp. 1226–1235.
13. Meinel C., Theobald T. *Algorithms and Data Structures in VLSI Design: OBDD – Foundations and Applications*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1998, 267 p.
14. Ebdndt R., Fey G., Drechsler R. *Advanced BDD Optimization*. Springer, 2005, 222 p.
15. Scholl C. *Functional Decomposition with Application to FPGA Synthesis*. Boston, Kluwer Academic Publisher, 2001, 288 p.
16. Chen D., Cong J., Pan P. FPGA design automation: a survey. *Foundations and Trends in Electronic Design Automation*, 2006, vol. 1, no. 3, pp. 195–330.
17. Kubica M., Kania D. SMTBDD: New form of BDD for logic synthesis. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2016, vol. 62, no. 1, pp. 33–41.
18. Kubica M., Kania D. Decomposition of multi-output functions oriented to configurability of logic blocks. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 2017, vol. 65, no. 3, pp. 317–331.
19. Vemuri N., Kalla P., Tessier R. BDD-based logic synthesis for LUT-6-based FPGAs. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, 2002, vol. 7, no. 4, pp. 501–525.
20. Yang S., Ciesielski M. BDS: a BDD-based logic optimization system. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2002, vol. 21, no. 7, pp. 866–876.
21. Lin H.-P., Jiang J.-H. R., Lee R.-R. Ashenurst decomposition using SAT and interpolation. *Advanced Techniques in Logic Synthesis, Optimizations and Applications*. In Khatri S. P., Gulati K. (eds.). Springer, 2010, pp. 67–85.
22. Ashenurst R. L. The decomposition of switching functions. *Annals of Computation Laboratory of Harvard University*. Cambridge, Mass., 1959, vol. 29, pp. 74–116.
23. *Handbook of Satisfiability*. In Biere A., Heule M., Van Maaren H., Walsh T. (eds.). IOS Press, 2009, 980 p.
24. Bibilo P. N., Romanov V. I. Logicheskoe proektirovanie diskretnykh ustrojstv s ispol'zovaniem produkcionno-frejmovoj modeli predstavlenija znaniy. *Logical Design of Discrete Devices Using a Production-Frame Knowledge Representation Model*. Minsk, Belaruskaja navuka, 2011, 279 p. (in Russian).
25. Avdeev N. A., Bibilo P. N. Effektivnost' logicheskoy optimizacii pri sinteze kombinacionnyh skhem iz bibliotechnykh elementov [Logical optimization efficiency in the synthesis of combinational circuits]. *Mikroelektronika [Microelectronics]*, 2015, vol. 44, no. 5, pp. 383–399 (in Russian).
26. Toropov N. R. Minimizaciya sistem bulevykh funkcij v klasse DNF [Minimization of Boolean function systems in the DNF class]. *Logicheskoe proektirovanie [Logical Design]*, Minsk, Institut tehnichejskoj kibernetiki Nacional'noj akademii nauk Belarusi, 1999, iss. 4, pp. 4–19 (in Russian).
27. Bibilo P. N., Lankevich Yu. Yu. Ispol'zovanie polinomov Zhegalkina pri minimizacii mnogourovnevnyh predstavlenij sistem bulevykh funkcij na osnove razlozheniya Shennona [The use of Zhegalkin polynomials for minimization of multilevel representations of Boolean functions based on Shannon expansion]. *Programmnyaya inzheneriya [Software engineering]*, 2017, no. 8, pp. 369–384 (in Russian).
28. Bibilo P. N., Romanov V. I. Optimizaciya mnogourovnevnyh predstavlenij sistem bulevykh funkcij pri pereproektirovanii logicheskikh skhem [Optimization of multi-level representations of systems of Boolean functions in the re-design of logic circuits]. *Upravlyayushchie sistemy i mashiny [Control Systems and Machines]*, 2006, no. 5, pp. 20–29 (in Russian).
29. Cheremisinov D. I. Analiz i preobrazovanie strukturnykh opisaniy SBIS. *Analysis and Transformation of VLSI Structural Descriptions*. Minsk, Belorusskaya nauka, 2006, 275 p. (in Russian).

30. Kuzelin O. M., Knyshev D. A., Zotov Yu. V. Sovremennyye semejstva PLIS firmy Xilinx. *Modern XILINX FPGA Families*. Moscos, Goryachaya liniya – Telekom, 2004, 440 p. (in Russian).
31. Jeong C. Computer-aided design of digital systems. *Department of Computer Science*. Available at: <http://www1.cs.columbia.edu/~cs6861/sis/espresso-examples/ex> (accessed 20.03.2018).
32. Brayton K. R., Hachtel G. D., McMullen C., Sangiovanni-Vincentelli A. *Logic Minimization Algorithm for VLSI Synthesis*. Boston, Kluwer Academic Publishers, 1984, 193 p.
33. Tarasov I. E. PLIS Xilinx. Yazyki opisaniya apparatury VHDL i Verilog, SAPR, priemy proektirovaniya. *XILINX FPGA. Hardware Description Languages VHDL and Verilog, CAD, Design Techniques*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2020, 538 p. (in Russian).
34. Avdeev N. A., Bibilo P. N. Effektivnost' proektirovaniya zakaznyh skhem v sintezatore LeonardoSpectrum [Efficiency of custom circuit design in the Leonardo Spectrum synthesizer]. *Sovremennaya elektronika [Modern Electronics]*, 2015, no. 1, pp. 58–61 (in Russian).

Информация об авторах

Бибилу Петр Николаевич, доктор технических наук, профессор, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. E-mail: bibilo@newman.bas-net.by

Ланкевич Юрий Юрьевич, младший научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. E-mail: yurafreedom18@gmail.com

Романов Владимир Ильич, кандидат технических наук, доцент, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. E-mail: rom@newman.bas-net.by

Information about the authors

Petr N. Bibilo, Dr. Sci. (Eng.), Professor, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: bibilo@newman.bas-net.by

Yury Yu. Lankevich, Junior Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: yurafreedom18@gmail.com

Vladimir I. Romanov, Cand. Sci. (Eng.), The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: rom@newman.bas-net.by



УДК 004.33.054
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-25-42>

Оригинальная статья
Original Paper

Построение и применение маршевых тестов для обнаружения кодочувствительных неисправностей запоминающих устройств

В. Н. Ярмолик^{1✉}, В. А. Леванцевич¹, Д. В. Деменковец¹, И. Мрозек²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь
✉E-mail: yarmolik10ru@yahoo.com

²Белостоцкий технический университет,
ул. Вейска, 45А, 15-351, Белосток, Польша

Аннотация. Показывается актуальность задачи тестирования запоминающих устройств современных вычислительных систем. Исследуются математические модели неисправностей запоминающих устройств и используемые методы тестирования наиболее сложных из них на базе классических маршевых тестов. Выделяются пассивные кодочувствительные неисправности ($PNPSFk$), в которых участвуют произвольные k из N ячеек памяти, где $k \ll N$, а N представляет собой емкость памяти в битах. Для этих неисправностей приводятся аналитические выражения минимальной и максимальной полноты покрытия, которые достижимы в рамках маршевых тестов. Определяется понятие примитива, описывающего в терминах элементов маршевого теста условия активизации и обнаружения неисправностей $PNPSFk$ запоминающих устройств. Приводятся примеры построения маршевых тестов, имеющих максимальную полноту покрытия, а также маршевых тестов с минимальной временной сложностью, равной $18N$. Исследуется эффективность однократного применения тестов типа $MATS++$, $March C-$ и $March PS$ для различного количества $k \leq 9$ ячеек памяти, участвующих в неисправности $PNPSFk$. Обосновывается применимость многократного тестирования с изменяемыми адресными последовательностями, в качестве которых предлагается применять случайные последовательности адресов. Приводятся аналитические выражения для полноты покрытия сложных неисправностей $PNPSFk$ в зависимости от кратности теста. Кроме того, даются оценки среднего значения кратности тестов $MATS++$, $March C-$ и $March PS$, полученные на основании математической модели, которая описывает задачу собирателя купонов, и обеспечивающие обнаружение всех $k2^k$ неисправностей $PNPSFk$. Экспериментально показывается справедливость аналитических оценок и подтверждается высокая эффективность обнаружения неисправностей $PNPSFk$ тестами типа $March PS$.

Ключевые слова: тестирование вычислительных систем, запоминающие устройства, маршевые тесты памяти, многократное тестирование, задача собирателя купонов

Для цитирования. Построение и применение маршевых тестов для обнаружения кодочувствительных неисправностей запоминающих устройств / В. Н. Ярмолик [и др.] // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 25–42. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-25-42>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Construction and application of march tests for pattern sensitive memory faults detection

Vyacheslav N. Yarmolik^{1✉}, Vladimir A. Levantsevich¹, Denis V. Demenkovets¹, Ireneusz Mrozek²

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
st. P. Brovki, 6, 220013, Minsk, Belarus*

[✉]*E-mail: yarmolik10ru@yahoo.com*

²*Bialystok University of Technology,
st. Wiejska, 45A, 15-351, Białystok, Poland*

Abstract. The urgency of the problem of testing storage devices of modern computer systems is shown. The mathematical models of their faults and the methods used for testing the most complex cases by classical march tests are investigated. Passive pattern sensitive faults (*PNPSFk*) are allocated, in which arbitrary k from N memory cells participate, where $k \ll N$, and N is the memory capacity in bits. For these faults, analytical expressions are given for the minimum and maximum fault coverage that is achievable within the march tests. The concept of a *primitive* is defined, which describes in terms of march test elements the conditions for activation and fault detection of *PNPSFk* of storage devices. Examples of march tests with maximum fault coverage, as well as march tests with a minimum time complexity equal to $18N$ are given. The efficiency of a single application of tests such as *MATS ++*, *March C-* and *March PS* is investigated for different number of $k \leq 9$ memory cells involved in *PNPSFk* fault. The applicability of multiple testing with variable address sequences is substantiated, when the use of random sequences of addresses is proposed. Analytical expressions are given for the fault coverage of complex *PNPSFk* faults depending on the multiplicity of the test. In addition, the estimates of the mean value of the multiplicity of the *MATS++*, *March C-* and *March PS* tests, obtained on the basis of a mathematical model describing the problem of the coupon collector, and ensuring the detection of all $k2^k$ *PNPSFk* faults are given. The validity of analytical estimates is experimentally shown and the high efficiency of *PNPSFk* fault detection is confirmed by tests of the *March PS* type.

Key words: testing of computer systems, storage devices, march tests of memory, multiple testing, coupon collector problem

For citation. Yarmolik V. N., Levantsevich V. A., Demenkovets D. V., Mrozek I. Construction and application of march tests for pattern sensitive memory faults detection. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 25–42 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-25-42>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Быстрый прогресс в области полупроводниковых технологий привел к созданию разнообразных типов запоминающих устройств большой емкости, широко используемых в различных приложениях [1, 2]. Так, запоминающие устройства современных вычислительных систем занимают до 94 % площади кристалла системы, что приводит к возрастанию требований к их надежности [3–5]. Косвенным результатом такого роста емкости запоминающих устройств является не только увеличение вероятности отказов памяти, но и увеличение сложности неисправностей запоминающих устройств, которая обусловлена высокой плотностью размещения запоминающих ячеек, а также разнообразными механизмами неисправностей [1, 6]. Общепринятой моделью неисправностей запоминающих устройств, покрывающей более простые виды неисправностей памяти, являются так называемые кодочувствительные неисправности (*pattern sensitive faults, PSF*) [6, 7].

Неисправности *PSF* вызваны аномалиями запоминающего устройства и паразитными эффектами, которые проявляются в зависимости как от хранимых в памяти данных, так и от их изменений и последовательностей обращений (операций чтения и записи) к памяти [6–8]. В запоминающем устройстве емкостью N бит может храниться 2^N различных наборов двоичных данных, надежность записи и считывания которых обеспечивает исправное поведение памяти. Показано, что для определения неисправности *PSF* запоминающего устройства минимальная сложность тестовой последовательности определяется выражением $2^N(3N^2 + 2N)$ [7, 9]. Это приводит к тому, что для больших объемов современных запоминающих устройств временная сложность

реализации алгоритмов тестирования памяти чрезвычайно велика [6–10]. Поэтому задача тестирования запоминающих устройств с целью обнаружения кодочувствительных неисправностей на протяжении последних десятилетий и до настоящего времени являлась и является весьма актуальной [11–15].

Кодочувствительные неисправности PSF описывают поведение нескольких ячеек памяти вплоть до N ячеек, где N – емкость памяти в битах [6]. Для подобных неисправностей логическое состояние одной ячейки памяти, называемой базовой (*base cell*), может зависеть от содержимого (0 или 1) или от логических переходов из 1 в 0 или из 0 в 1 в соседних ячейках (*neighborhood cells*) запоминающего устройства. Под логическим переходом из 1 в 0, обозначаемым символом \downarrow , понимают изменение единичного состояния ячейки памяти на нулевое состояние, а под переходом из 0 в 1 – изменение нулевого состояния на единичное, которое обозначается символом \uparrow [6, 7]. Различают два вида кодочувствительных неисправностей: неограниченные (*unrestricted*) и ограниченные (*restricted*), или граничные (*neighborhood, NPSF*). Под $NPSF$ понимают такие разновидности неисправностей PSF , для которых вводится ограничение как на количество ячеек памяти, участвующих в неисправности, так и на их физическое расположение в матрице запоминающих ячеек. При тестировании современных запоминающих устройств обычно придерживаются последней, более реальной модели кодочувствительных неисправностей, для которой рассматривается небольшое число $k \leq 9$ ячеек памяти, входящих в неисправность $NPSFk$, а их местоположение может быть произвольным [5, 6, 16]. Существуют три классические модели неисправностей $NPSFk$, а именно активные ($ANPSFk$), пассивные ($PNPSFk$) и статические ($SNPSFk$) [6]. Активными, или динамическими, являются такие $NPSFk$, для которых базовая ячейка изменяет свое содержимое из-за изменения в наборе, хранящемся в соседних $k-1$ ячейках. Пассивными называются такие $NPSFk$, для которых содержимое базовой ячейки не может быть изменено из-за определенного набора данных в соседних $k-1$ ячейках. Статические $SNPSFk$ – это неисправности, при которых содержимое базовой ячейки принудительно переводится в одно из двух состояний 0 или 1 из-за определенного набора в соседних $k-1$ ячейках. Отметим, что все перечисленные неисправности возникают при изменении содержимого памяти, т. е. при выполнении операции записи в ячейку памяти [5, 6].

В качестве объекта исследования чаще всего рассматриваются пассивные кодочувствительные неисправности ($PNPSFk$), где k обозначает количество произвольных ячеек памяти емкостью N бит, участвующих в конкретной неисправности. Отметим, что результаты, полученные для $PNPSFk$, легко обобщаются и для других классов кодочувствительных неисправностей в силу того, что $PNPSFk$ является моделью наиболее трудно обнаруживаемых неисправностей памяти, покрывающей другие виды неисправностей [5, 6].

В настоящей статье основное внимание уделено анализу эффективности существующих тестов для обнаружения кодочувствительных неисправностей $PNPSFk$, синтезу однократных маршевых тестов с максимальной полнотой покрытия таких неисправностей и оценке их эффективности при многократном применении.

Анализ существующих разновидностей моделей неисправностей $PNPSFk$. Существуют различные виды кодочувствительных неисправностей $NPSFk$ в зависимости от тех ограничений, которые накладываются на обобщающую модель $PSFk$. Первым необходимым ограничением является количество запоминающих элементов, участвующих в неисправности $NPSFk$ [5, 6]. Как правило, k не превышает 9. Это следует из того факта, что для тестирования подобных неисправностей необходимо время, пропорциональное величине 2^k . Вторым ограничением является физическое соседство ячеек памяти. На практике обычно используют модели кодочувствительных неисправностей $NPSFk$ с числом k , равным 3, 5 или 9, конфигурации и обозначения которых показаны на рис. 1 [5, 6, 11, 17].

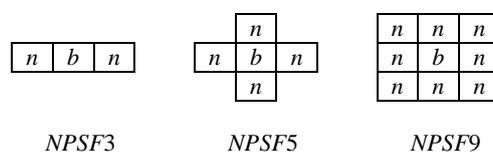


Рис. 1. Модели кодочувствительных неисправностей

Как следует из рис. 1, в каждой из приведенных неисправностей в явном виде выделяется базовый запоминающий элемент b и соседние запоминающие элементы n . Соседние ячейки запоминающего устройства являются физическими соседями по отношению к базовому элементу. Исследования, посвященные построению тестов для обнаружения $NPSF3$ при известной физической топологии, достаточно полно представлены в работах [5, 6, 13, 15, 17]. Наиболее распространенными моделями $NPSF$ являются $NPSF5$ и $NPSF9$, которые получили название неисправностей типа 1 (*type 1*) и типа 2 (*type 2*) [6, 7, 10]. Существуют и другие конфигурации $NPSFk$ как по взаимному расположению запоминающих элементов, так и по их количеству. Одной из таких распространенных разновидностей неисправностей является $NPSFk$, для которой все k запоминающих элементов принадлежат одному столбцу или одной строке матрицы ячеек памяти [6, 18, 19], а максимальное значение k достигает значения 25 [5, 6, 15, 17]. Среди указанного множества неисправностей выделяют *neighborhood word-line sensitive faults (NWSF)*, т. е. неисправности, связанные с шиной данных [20, 21]. В работе [22] был предложен вариант соседства с четырьмя ячейками (*T-type*), которое обеспечивало обнаружение неисправностей, чувствительных к двоичному набору окружения битовой шины памяти (*bit-line neighborhood pattern sensitive faults, NBLSFs*). Достаточно полно модели кодочувствительных неисправностей (*row (column) pattern sensitive faults*), связанные с топологией строк и столбцов матрицы запоминающих элементов, исследованы в работе [18]. Весьма интересной моделью кодочувствительных неисправностей являются неисправности, чувствительные к операции чтения (*disturb neighborhood pattern sensitive faults*), впервые представленные и проанализированные в работе [23].

Описание неисправностей $NPSFk$, когда уточняются топологические особенности памяти, является идеальным с точки зрения решения проблемы тестирования запоминающих устройств. Однако на практике физическое месторасположение запоминающих элементов памяти и их логические адреса в основном не совпадают и на уровне пользователя являются недоступной информацией [5, 6, 15, 17, 24, 25]. Как правило, логически соседние запоминающие элементы физически располагаются удаленно друг от друга и, наоборот, физически соседние ячейки имеют адреса, удаленные друг от друга в используемом адресном пространстве памяти [17, 25]. Причиной данного факта является ряд технологических приемов, используемых при производстве современных запоминающих устройств [6, 17, 18].

Выделяют k различных классов $PNPSFk$ в зависимости от местоположения в адресном пространстве памяти базовой ячейки b по отношению к соседним ячейкам n . Например, для $k = 5$ существует пять классов неисправностей $PNPSF5$: $b_i n_{i_3} n_{i_2} n_{i_1} n_{i_0}$, $n_i b_{i_3} n_{i_2} n_{i_1} n_{i_0}$, $n_{i_4} n_{i_3} b_{i_2} n_{i_1} n_{i_0}$, $n_{i_4} n_{i_3} n_{i_2} b_{i_1} n_{i_0}$ и $n_{i_4} n_{i_3} n_{i_2} n_{i_1} b_{i_0}$, где адреса ячеек в адресном пространстве имеют следующее соотношение: $i_0 < i_1 < i_2 < i_3 < i_4$. Каждый класс неисправностей включает как минимум две неисправности $PNPSFk$ в зависимости от состояния базового элемента, которое не может быть изменено на противоположное состояние. Например, классу $n_i b_{i_3} n_{i_2} n_{i_1} n_{i_0}$ неисправностей $PNPSF5$ для конкретного набора $(0, 0, 0, 0)$ в соседних ячейках $n_{i_4} n_{i_2} n_{i_1} n_{i_0}$ принадлежат две неисправности, имеющие вид $\langle 0, \uparrow, 0, 0, 0 \rangle$, $\langle 0, \downarrow, 0, 0, 0 \rangle$. В обеих неисправностях состояния соседних ячеек с адресами i_0 , i_1 , i_2 и i_4 принимаются нулевыми. При этих состояниях в случае неисправности $\langle 0, \uparrow, 0, 0, 0 \rangle$ базовая ячейка не может выполнить переход из нулевого состояния в единичное, а для второй неисправности $\langle 0, \downarrow, 0, 0, 0 \rangle$ – из единичного в нулевое. В общем случае в соседних ячейках возможны любые из 2^{k-1} двоичных наборов, каждый из которых определяет два неисправных поведения базовой ячейки. Соответственно, общее количество $PNPSFk$, относящихся к одному конкретному классу из k возможных, равняется $2 \cdot 2^{k-1} = 2^k$. В то же время для фиксированных k ячеек памяти, для которых существует k классов неисправностей, имеем общее количество $Q_{TN}(PNPSFk)$ неисправностей $PNPSFk$, равное $k2^k$. Число всевозможных неисправностей $PNPSFk$ для памяти емкостью N бит определяется выражением [17]

$$Q_{TN}(PNPSFk) = k \cdot 2^k \cdot \binom{N}{k}. \quad (1)$$

Последний сомножитель в равенстве (1) представляет собой количество сочетаний по k ячеек памяти из общего их количества, определяемого емкостью N памяти, причем каждое такое сочетание соответствует определенной конфигурации неисправностей $PNPSFk$, определяемой ячейками памяти, участвующими в ней. Емкость современных запоминающих устройств N велика и является существенно большей по сравнению с количеством k ячеек, участвующих в рассматриваемых кодочувствительных неисправностях. Поэтому для реальных значений N приведенная оценка (1) принимает большие значения, показывающие сложность проблемы синтеза тестов для обнаружения кодочувствительных неисправностей запоминающих устройств.

В связи с большим объемом запоминающих устройств их тестирование оказывается возможным только с применением маршевых тестов (*march tests*), временная сложность реализации которых линейно зависит от емкости N памяти [6]. Маршевый тест состоит из конечной последовательности маршевых элементов, называемых фазами, каждая из которых представляет конечную последовательность операций записи и чтения, применяемых к каждой ячейке памяти перед переходом к следующей ячейке. Операция может состоять из записи 0 в ячейку ($w0$), записи 1 в ячейку ($w1$), чтения ожидаемого 0 из ячейки ($r0$) и чтения ожидаемой 1 из ячейки ($r1$). Каждый маршевый элемент содержит символ, определяющий порядок формирования адресной последовательности (*address sequence*), где символ \uparrow определяет последовательный перебор адресов памяти по возрастанию, символ \downarrow – последовательный перебор адресов по убыванию, а сочетание двух символов $\uparrow\downarrow$ означает формирование адресов по убыванию либо по возрастанию. Убывающая последовательность адресов (\downarrow) представляет собой последовательность, которая формируется в обратном порядке по сравнению с возрастающей последовательностью (\uparrow), при этом в качестве возрастающей последовательности адресов может быть использована любая последовательность, состоящая из всех N адресов. Тест *MATS*: $\{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(r0,w1); \downarrow(r1)\}$ служит простейшим примером семейства маршевых тестов и имеет временную сложность $4N$. Часто используемыми маршевыми тестами являются тесты *MATS++*: $\{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(r0,w1); \downarrow(r1,w0,r0)\}$ и *March C-*: $\{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(r0,w1); \uparrow(r1,w0); \downarrow(r0,w1); \downarrow(r1,w0); \uparrow\downarrow(r0)\}$, имеющие временную сложность $6N$ и $10N$ соответственно.

Не нарушая общности последующих рассуждений, предположим, что всегда для любого маршевого теста используется фаза инициализации вида $\uparrow\downarrow(w0)$. Тогда, учитывая последовательное обращение к запоминающим ячейкам и одинаковые операции записи используемого маршевого теста, применяемые к ним, можно заключить, что содержимое памяти после выполнения каждой из фаз будет либо исходным нулевым, либо инверсным, когда в каждой ячейке будет записана единица. Аналогичное заключение можно сделать и для k ячеек памяти с упорядоченными адресами $i_0 < i_1 < i_2 < \dots < i_{k-1}$, участвующих в неисправности $PNPSFk$ $n_{i_{k-1}} n_{i_{k-2}} n_{i_{k-3}} \dots n_{i_{j+1}} b_i n_{i_{j-1}} \dots n_{i_2} n_{i_1} n_{i_0}$. Такая особенность маршевых тестов позволяет определить множество обнаруживаемых неисправностей, которое соответствует следующему утверждению.

Утверждение. *К множеству обнаруживаемых маршевыми тестами неисправностей $PNPSFk$ относятся такие их разновидности, для которых в соседних ячейках n , расположенных до базовой ячейки b , находятся только нулевые значения или только единичные значения, а в соседних ячейках после базовой также находятся одинаковые значения (нулевые или единичные), причем независимо от значений в соседних ячейках до базовой ячейки.*

Согласно приведенному утверждению для случая кодочувствительных неисправностей $PNPSFk$ $n_{i_{k-1}} n_{i_{k-2}} n_{i_{k-3}} \dots n_{i_{j+1}} b_i n_{i_{j-1}} \dots n_{i_2} n_{i_1} n_{i_0}$ произвольного j -го класса, $j \in \{1, 2, \dots, k-2\}$, множество обнаруживаемых неисправностей будет состоять из восьми видов неисправностей каждого из этих классов. Для нулевого (i_0) и $k-1$ -го (i_{k-1}) классов в силу отсутствия соседних ячеек слева или справа обнаруживаемыми будут только четыре вида неисправностей $PNPSFk$.

В качестве примера обнаруживаемых неисправностей на базе маршевых тестов в табл. 1 приведены все виды неисправностей для каждого из $k=5$ классов.

Таблица 1

Обнаруживаемые неисправности *PNPSF5*

Классы <i>PNPSF5</i>	Виды неисправностей <i>PNPSF5</i>
$n_{i_4} n_{i_3} n_{i_2} n_{i_1} b_{i_0}$	$\langle 0,0,0,0,\uparrow \rangle, \langle 0,0,0,0,\downarrow \rangle, \langle 1,1,1,1,\uparrow \rangle, \langle 1,1,1,1,\downarrow \rangle$
$n_{i_4} n_{i_3} n_{i_2} b_{i_1} n_{i_0}$	$\langle 0,0,0,\uparrow,0 \rangle, \langle 0,0,0,\downarrow,0 \rangle, \langle 1,1,1,\uparrow,1 \rangle, \langle 1,1,1,\downarrow,1 \rangle,$ $\langle 0,0,0,\uparrow,1 \rangle, \langle 0,0,0,\downarrow,1 \rangle, \langle 1,1,1,\uparrow,0 \rangle, \langle 1,1,1,\downarrow,0 \rangle$
$n_{i_4} n_{i_3} b_{i_2} n_{i_1} n_{i_0}$	$\langle 0,0,\uparrow,0,0 \rangle, \langle 0,0,\downarrow,0,0 \rangle, \langle 1,1,\uparrow,1,1 \rangle, \langle 1,1,\downarrow,1,1 \rangle,$ $\langle 0,0,\uparrow,1,1 \rangle, \langle 0,0,\downarrow,1,1 \rangle, \langle 1,1,\uparrow,0,0 \rangle, \langle 1,1,\downarrow,0,0 \rangle$
$n_{i_4} b_{i_3} n_{i_2} n_{i_1} n_{i_0}$	$\langle 0,\uparrow,0,0,0 \rangle, \langle 0,\downarrow,0,0,0 \rangle, \langle 1,\uparrow,1,1,1 \rangle, \langle 1,\downarrow,1,1,1 \rangle,$ $\langle 0,\uparrow,1,1,1 \rangle, \langle 0,\downarrow,1,1,1 \rangle, \langle 1,\uparrow,0,0,0 \rangle, \langle 1,\downarrow,0,0,0 \rangle$
$b_{i_4} n_{i_3} n_{i_2} n_{i_1} n_{i_0}$	$\langle \uparrow,0,0,0,0 \rangle, \langle \downarrow,0,0,0,0 \rangle, \langle \uparrow,1,1,1,1 \rangle, \langle \downarrow,1,1,1,1 \rangle$

Соответственно, согласно утверждению 1 максимально возможное число $Q_{MAX}(PNPSFk)$ обнаруживаемых неисправностей *PNPSFk* при применении однократного маршевого теста определяется равенством

$$Q_{MAX}(PNPSFk) = (8 \cdot (k - 2) + 2 \cdot 4) \cdot \binom{N}{k} = 8 \cdot (k - 1) \cdot \binom{N}{k}. \quad (2)$$

Соотношение (2) показывает предельные возможности маршевых тестов, которые достижимы при однократном их применении.

Анализ известных разновидностей тестов для обнаружения неисправностей *PNPSFk*. Как отмечалось в предыдущих разделах, объектом исследований в части сложных неисправностей памяти, как правило, являются неисправности *PNPSFk* [6, 17].

Для нахождения определенной неисправности памяти, в том числе и неисправности *PNPSFk*, в используемом для этих целей маршевом тесте необходимо выполнить как условия ее активизации (*sensitization*), так и условия обнаружения (*detection*) [3, 5, 6]. Процесс активизации неисправности требует предварительной инициализации (*initialization*) содержимого в k ячейках памяти, для которого заданная неисправность *PNPSFk* будет активизирована. Инициализация необходима как для соседних ячеек, участвующих в неисправности в соответствии с приведенным утверждением, так и для базовой ячейки и определяется одним из восьми видов неисправностей *PNPSFk*. Процедура инициализации заключается в предварительном обнулении содержимого памяти либо записи во все ячейки памяти единичных значений, а также выборе в последующей фазе теста соответствующего направления адресации, возрастающего либо убывающего. Выполнение этих двух условий позволит сформировать (инициализировать) содержимое в k произвольных ячейках памяти, соответствующее одному из восьми видов неисправностей *PNPSFk*. Отметим временную зависимость указанных процедур, которая заключается в последовательной реализации в маршевом тесте инициализации, затем активизации и, наконец, обнаружения неисправности.

В случае классических маршевых тестов условия инициализации, активизации и обнаружения неисправности *PNPSFk* очевиднее всего реализуются тремя последовательными фазами маршевого теста, которые в дальнейшем будем называть предыдущей, текущей и последующей фазами, а их совокупность – примитивом. Все восемь видов неисправностей *PNPSFk* и необходимые для их обнаружения примитивы, реализуемые маршевыми тестами, приведены в табл. 2.

Отметим, что все обнаруживаемые неисправности соответствуют приведенному утверждению и поэтому могут быть выявлены маршевым тестом. Например, маршевый тест *MATS* реализует примитив, состоящий из предыдущей фазы $\uparrow\downarrow(w0)$, текущей фазы $\uparrow(r0,w1)$ и последующей фазы $\downarrow(r1)$, что обеспечивает условия активизации и обнаружения неисправности вида $\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$ для всех k классов неисправностей *PNPSFk*. Для случая $k = 4$ фиксированных ячеек памяти тест *MATS* обнаружит четыре неисправности $\langle 0,0,0,\uparrow \rangle, \langle 0,0,\uparrow,1 \rangle, \langle 0,\uparrow,1,1 \rangle$ и $\langle \uparrow,1,1,1 \rangle$, а остальные $k \cdot 2^k - k = 4 \cdot 2^4 - 4 = 60$ неисправностей *PNPSF4* в этих ячейках данный тест не обнаружит.

Из табл. 2 видно, что примитив может состоять также из двух последовательных фаз маршевого теста, как и для случая ранее рассмотренной неисправности вида $\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow, 1,1,1,\dots,1\rangle$, однако это требует усложнения текущей фазы, в которой необходима реализация процедуры обнаружения неисправности. В таком случае примитив будет состоять только из двух фаз: предыдущей и следующей за ней текущей фазы.

Таблица 2

Виды неисправности $PNPSFk$ и необходимые примитивы для их обнаружения

Обнаруживаемые виды неисправностей $PNPSFk$	Примитив		
	Предыдущая фаза	Текущая фаза	Последующая фаза
$\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow,1,1,1,\dots,1\rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$	$\uparrow(r0,w1)$	$\uparrow\downarrow(r1,\dots)$
	$\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$	$\uparrow(r0,w1,r1)$	–
$\langle 0,0,0,\dots,0,\downarrow,1,1,1,\dots,1\rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$	$\downarrow(r1,w0)$	$\uparrow\downarrow(r0,\dots)$
	$\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$	$\downarrow(r1,w0,r0)$	–
$\langle 1,1,1,\dots,1,\uparrow,0,0,0,\dots,0\rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$	$\downarrow(r0,w1)$	$\uparrow\downarrow(r1,\dots)$
	$\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$	$\downarrow(r0,w1,r1)$	–
$\langle 1,1,1,\dots,1,\downarrow,0,0,0,\dots,0\rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$	$\uparrow(r1,w0)$	$\uparrow\downarrow(r0,\dots)$
	$\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$	$\uparrow(r1,w0,r0)$	–
$\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow,0,0,0,\dots,0\rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$	$\uparrow\downarrow(r0,w1,r1,w0)$	–
$\langle 0,0,0,\dots,0,\downarrow,0,0,0,\dots,0\rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$	$\uparrow\downarrow(r0,w1,r1,w0)$	$\uparrow\downarrow(r0,\dots)$
	$\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$	$\uparrow\downarrow(r0,w1,r1,w0,r0)$	–
$\langle 1,1,1,\dots,1,\downarrow,1,1,1,\dots,1\rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$	$\uparrow\downarrow(r1,w0,r0,w1)$	–
$\langle 1,1,1,\dots,1,\uparrow,1,1,1,\dots,1\rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$	$\uparrow\downarrow(r1,w0,r0,w1)$	$\uparrow\downarrow(r1,\dots)$
	$\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$	$\uparrow\downarrow(r1,w0,r0,w1,r1)$	–

В общем случае тест $MATS$ характеризуется минимальной полнотой покрытия неисправностей, так как он позволяет обнаруживать только один вид неисправности $PNPSFk$, а именно $\langle 0,0,0,\dots, 0,\uparrow,1,1,1,\dots,1\rangle$. Общее количество $Q_{Dk}(PNPSFk)$ обнаруживаемых тестом $MATS$ неисправностей $PNPSFk$ в k фиксированных ячейках равняется k , а во всей памяти емкостью N бит определяется выражением

$$Q_{DN}(PNPSFk) = Q_{Dk}(PNPSFk) \cdot \binom{N}{k} = k \cdot \binom{N}{k}. \quad (3)$$

Таким образом, полнота покрытия однократного маршевого теста $MATS$ как процентное отношение количества $Q_{DN}(PNPSFk)$ обнаруживаемых неисправностей $PNPSFk$ к их общему числу $Q_{TN}(PNPSFk)$ (см. (1)) принимает вид

$$FC_{MATS}(PNPSFk) = \frac{Q_{DN}(PNPSFk)}{Q_{TN}(PNPSFk)} \cdot 100\% = \frac{Q_{Dk}(PNPSFk) \cdot \binom{N}{k}}{Q_{Tk}(PNPSFk) \cdot \binom{N}{k}} \cdot 100\% = \frac{1}{2^k} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Анализ соотношения (4) позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, полнота покрытия неисправностей $PNPSFk$ произвольного маршевого теста для всей памяти емкостью N бит совпадает с полнотой покрытия для этих же неисправностей в k произвольных фиксированных ячейках памяти. Во-вторых, полнота покрытия $FC_{MATS}(PNPSFk)$ является минимально возможной полнотой покрытия, достигаемой маршевыми тестами. Второй вывод следует из того факта, что произвольный маршевый тест обязательно содержит фазу инициализации, а в последующих фазах – операцию записи инверсного значения и проверку правильности ее выполнения. В совокупности это составляет по меньшей мере один примитив, обеспечивающий обнаруже-

ние как минимум одного из видов неисправностей $PNPSFk$, приведенных в табл. 2. Более сложные маршевые тесты по сравнению с тестом $MATS$ в части числа их фаз и количества операций чтения (записи) в фазах, как правило, имеют большую полноту покрытия $FC_{Test}(PNPSFk)$. Например, тест $MATS++$, имеющий сложность теста $6N$, которая больше сложности $4N$ теста $MATS$, характеризуется полнотой покрытия $FC_{MATS++}(PNPSFk) = 1/2^{k-1} \cdot 100\%$. Это следует из того факта, что данный тест обнаруживает k неисправностей $PNPSFk$ вида $\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$ и k неисправностей вида $\langle 0,0,0,\dots,0,\downarrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$, так как содержит соответствующие примитивы. Примитив $\uparrow\downarrow(w0)$, $\uparrow(r0,w1)$, $\downarrow(r1,w0,r0)$ теста $MATS++$ обеспечивает обнаружение $\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$, а примитив $\uparrow(r0,w1)$, $\downarrow(r1,w0,r0)$ реализует условия покрытия неисправностей $\langle 0,0,0,\dots,0,\downarrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$. Более сложный тест $March C-$ обеспечивает обнаружение уже четырех видов $PNPSFk$, приведенных в табл. 3 с соответствующими примитивами теста.

Таблица 3

Виды $PNPSFk$ и примитивы, формируемые тестом $March C-$ для их обнаружения

Примитив	Предыдущая фаза	$\uparrow\downarrow(w0)$	$\uparrow(r0,w1)$	$\uparrow(r1,w0)$	$\downarrow(r0,w1)$
	Текущая фаза	$\uparrow(r0,w1)$	$\uparrow(r1,w0)$	$\downarrow(r0,w1)$	$\downarrow(r1,w0)$
	Последующая фаза	$\uparrow(r1,w0)$	$\downarrow(r0,w1)$	$\downarrow(r1,w0)$	$\uparrow\downarrow(r0)$
Виды обнаруживаемых неисправностей $PNPSFk$		$\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow,1,1,\dots,1 \rangle$	$\langle 1,1,1,\dots,1,\downarrow,0,0,\dots,0 \rangle$	$\langle 1,1,1,\dots,1,\uparrow,0,0,\dots,0 \rangle$	$\langle 0,0,0,\dots,0,\downarrow,1,1,\dots,1 \rangle$

Максимальной полнотой покрытия неисправностей $PNPSFk$ характеризуются маршевые тесты, синтезированные для обнаружения сложных кодочувствительных неисправностей, которые при однократном применении обнаруживают все восемь видов указанных ранее неисправностей $PNPSFk$ (см. табл. 2). Среди наиболее известных тестов выделяют $March PS$: $\{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(r0,w1,r1,w0,r0,w1); \uparrow(r1,w0,r0,w1,r1); \uparrow(r1,w0,r0,w1,r1,w0); \uparrow(r0,w1,r1,w0,r0)\}$ [26], сложность которого равняется $23N$, и $March 17N$, часто называемый $Cheng test$ [12]: $\{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(w1,r1,w0); \uparrow(r0,w1); \uparrow(r1,w0,r0,w1); \uparrow(r1,w0); \downarrow(r0,w1); \downarrow(r1,w0); \uparrow\downarrow(r0)\}$. Указанные тесты достигают максимально возможной полноты покрытия неисправностей $PNPSFk$, определяемой выражением [17]

$$FC_{MAX}(PNPSFk) = \frac{Q_{MAX}(PNPSFk)}{Q_{TN}(PNPSFk)} \cdot 100\% = \frac{k-1}{k \cdot 2^{k-3}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Отметим, что вне зависимости от вида и структуры маршевого теста однократное его применение для произвольного начального состояния памяти и применяемой адресной последовательности не позволяет достичь полноты покрытия больше величины, определяемой выражением (5) [3, 17].

Построение однократных маршевых тестов с максимальной полнотой покрытия неисправностей $PNPSFk$. Первоначально рассмотрим ряд особенностей примитивов, необходимых для обнаружения неисправностей $PNPSFk$, приведенных в предыдущем разделе. Для конкретного вида неисправностей $PNPSFk$, например $\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$, примитив, обеспечивающий их обнаружение, может состоять из трех или двух фаз (см. табл. 2). В обоих случаях минимальная временная сложность реализации обоих примитивов (количество операций чтения (записи)) равняется $4N$. Однако с учетом того, что конкретная фаза маршевого теста может участвовать в нескольких примитивах, средняя и суммарная сложности примитивов, описывающих обнаружение более чем одного вида неисправностей $PNPSFk$, может быть существенно меньше. Например, временная сложность теста $March C-$, равная суммарной сложности примитивов, составляет $10N$, а сам тест обнаруживает четыре вида неисправностей $PNPSFk$. Поэтому при построении тестов необходимо, чтобы каждая фаза участвовала как можно в большем числе примитивов. В этом случае достигается минимальная сложность синтезируемого теста. Примерами таких тестов могут быть приведенный ранее тест $March 17N$ и тест $March$

$PNPSFk$ [17]: $\{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(r0,w1,r1,w0); \downarrow(r0,w1); \uparrow(r1,w0,r0,w1); \uparrow(r1,w0); \uparrow(r0,w1); \downarrow(r1,w0,r0)\}$, сложность которого равна $18N$.

Второй особенностью примитивов является возможность их построения с использованием в текущей фазе более одной операции записи $w0$ или $w1$, как это видно, например, из табл. 2. Однако независимо от сложности фаз теста примитивы, включающие такие фазы, могут обеспечить условия активизации и обнаружения не более чем двух видов неисправностей $PNPSFk$. Это следует из того, что текущая фаза может сформировать только два перехода (\uparrow , \downarrow) в базовой ячейке для одного из четырех состояний в соседних ячейках (см. утверждение). Для формирования двух переходов (\uparrow , \downarrow) необходимы как минимум две операции записи. Применение еще одной операции записи необходимо только для случая инвертирования ее содержимого памяти. Примером построения подобного примитива является случай его синтеза для обнаружения двух видов неисправностей $PNPSFk$, а именно $\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$ и $\langle 0,0,0,\dots,0,\downarrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$. Соответствующий примитив может состоять из предыдущей фазы $\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$ и текущей вида $\uparrow(r0,w1,r1,w0,r0,w1)$ (см. тест *March PS*). Примитив, представленный фазами $\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$ и $\downarrow(r1,w0,r0,w1,r1,w0)$, также описывает обнаружение неисправностей $\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$ и $\langle 0,0,0,\dots,0,\downarrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$. В то же время два примитива $\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$, $\downarrow(r0,w1,r1,w0,r0,w1)$ и $\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$, $\uparrow(r1,w0,r0,w1, r1,w0)$ обеспечивают обнаружение следующих двух неисправностей $\langle 1,1,1,\dots,1,\uparrow,0,0,0,\dots,0 \rangle$ и $\langle 1,1,1,\dots,1,\downarrow,0,0,0,\dots,0 \rangle$.

Используя два из четырех приведенных выше примитивов, можно построить маршевый тест, имеющий такую же полноту покрытия неисправностей $PNPSFk$, как и тест *March C-*. Примером подобного теста может быть тест $\{\uparrow\downarrow(w0); \downarrow(r0,w1,r1,w0,r0,w1); \downarrow(r1,w0,r0,w1,r1,w0)\}$, обнаруживающий, так же как и *March C-*, четыре вида неисправностей $PNPSFk$.

Основываясь на понятиях примитивов, приведенных в настоящей статье, можно построить маршевый тест, обеспечивающий требуемую полноту покрытия неисправностей $PNPSFk$.

Для случая тестов типа *March PS* процедура синтеза будет состоять из выбора набора примитивов, каждый из которых обеспечивает обнаружение двух видов неисправностей $PNPSFk$, а их совокупность, представляющая искомый тест, – всех восьми видов неисправностей. Анализ примитивов и обнаруживаемых ими пар неисправностей, приведенных в табл. 4, свидетельствует о том, что тест будет состоять как минимум из четырех фаз, кроме фазы инициализации.

Таблица 4

Неисправности $PNPSFk$ и необходимые примитивы для их обнаружения

Обнаруживаемые пары неисправностей $PNPSFk$	Примитив		
	Предыдущая фаза	Текущая фаза	Последующая фаза
$\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$	$\uparrow(r0,w1,r1,w0,r0,w1)$	–
$\langle 0,0,0,\dots,0,\downarrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$	$\downarrow(r1,w0,r0,w1,r1,w0)$	–
$\langle 1,1,1,\dots,1,\uparrow,0,0,0,\dots,0 \rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$	$\downarrow(r0,w1,r1,w0,r0,w1)$	–
$\langle 1,1,1,\dots,1,\downarrow,0,0,0,\dots,0 \rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$	$\uparrow(r1,w0,r0,w1,r1,w0)$	–
$\langle 0,0,0,\dots,0,\uparrow,0,0,0,\dots,0 \rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$	$\uparrow\downarrow(r0,w1,r1,w0,r0)$	–
$\langle 0,0,0,\dots,0,\downarrow,0,0,0,\dots,0 \rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w0,\dots)$	$\uparrow\downarrow(r0,w1,r1,w0)$	$\uparrow\downarrow(r0,\dots)$
$\langle 1,1,1,\dots,1,\uparrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$	$\uparrow\downarrow(r1,w0,r0,w1,r1)$	–
$\langle 1,1,1,\dots,1,\downarrow,1,1,1,\dots,1 \rangle$	$\uparrow\downarrow(\dots,w1,\dots)$	$\uparrow\downarrow(r1,w0,r0,w1)$	$\uparrow\downarrow(r1,\dots)$

Итогом такого синтеза могут быть следующие тесты типа *March PS*:

$$\{\uparrow\downarrow(w0); \downarrow(r0,w1,r1,w0,r0); \uparrow(r0,w1,r1,w0,r0,w1); \uparrow(r1,w0,r0,w1,r1); \uparrow(r1,w0,r0,w1,r1,w0)\},$$

$$\{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(r0,w1,r1,w0,r0); \downarrow(r0,w1,r1,w0,r0,w1); \downarrow(r1,w0,r0,w1,r1); \downarrow(r1,w0,r0,w1,r1,w0)\},$$

$$\{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(r0,w1,r1,w0); \downarrow(r0,w1,r1,w0,r0,w1); \downarrow(r1,w0,r0,w1); \downarrow(r1,w0,r0,w1,r1,w0)\},$$

$$\{\uparrow\downarrow(w1); \uparrow(r1,w0,r0,w1); \downarrow(r1,w0,r0,w1,r1,w0); \downarrow(r0,w1,r1,w0); \downarrow(r0,w1,r1,w0,r0,w1)\}.$$

Приведенные тесты являются результатом эвристического подхода к синтезу тестов, заключающегося в подборе необходимых фаз и их сочетания для обеспечения максимальной полноты покрытия тестом неисправностей $PNPSFk$. Отметим, что полученный результат обеспечивает максимальную эффективность полученных тестов только по отношению к неисправностям $PNPSFk$ и не гарантирует их эффективность по отношению к другим видам неисправностей, в том числе и более простым их разновидностям. Последнее утверждение также справедливо и для менее сложных тестов, в которых используется особенность фаз теста участвовать более чем в одном примитиве. Приведем примеры оптимальных с точки зрения временной сложности тестов:

$$\begin{aligned} & \{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(r0,w1); \uparrow(r1,w0); \downarrow(r0,w1); \downarrow(r1,w0,r0,w1); \downarrow(r1,w0); \uparrow(r0,w1,r1,w0,r0)\}, \\ & \{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(r0,w1); \uparrow(r1,w0,r0,w1); \downarrow(r1,w0); \uparrow(r0,w1,r1,w0); \downarrow(r0,w1); \downarrow(r1,w0,r0)\}, \\ & \{\uparrow\downarrow(w1); \uparrow(r1,w0); \uparrow(r0,w1,r1,w0); \uparrow(r0,w1); \downarrow(r1,w0); \downarrow(r0,w1); \uparrow(r1,w0,r0,w1); \uparrow\downarrow(r1)\}. \end{aligned}$$

Очевидно, что, применяя рассмотренную методику, можно построить достаточно большое множество тестов, характеризующихся максимальной полнотой покрытия неисправностей $PNPSFk$ (5). Среди их многообразия выделим тест *March OP*:

$$\{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(r0,w1); \uparrow(r1,w0); \downarrow(r0,w1); \downarrow(r1,w0,r0,w1); \downarrow(r1,w0); \uparrow(r0,w1,r1,w0); \uparrow\downarrow(r0)\}. \quad (6)$$

Тест *March OP* является расширением теста *March C-* в части добавления двух примитивов: $\uparrow\downarrow(r1,w0,r0,w1)$, $\uparrow\downarrow(r1, \dots)$ и $\uparrow\downarrow(r0,w1,r1,w0)$, $\uparrow\downarrow(r0, \dots)$, обеспечивающих обнаружение четырех дополнительных видов неисправностей $PNPSFk$ (см. табл. 4). Временная сложность $18N$ теста *March OP* соответствует минимально достижимой сложности известных тестов с максимальной полнотой покрытия для указанных неисправностей. Тест *March OP* по аналогии с тестом *Cheng* может быть адаптирован для обнаружения неисправностей $PNPSFk$ при заданных значениях k и стандартных начальных состояний памяти, необходимых для их обнаружения. Это достигается путем удаления первой операции чтения, что приводит к уменьшению сложности теста до $17N$. Однако для неразрушающего тестирования памяти, при котором фаза инициализации отсутствует, указанная первая операция чтения является необходимой.

При классической реализации любого из рассмотренных выше тестов, обнаруживающих максимальное количество неисправностей $PNPSFk$, численные значения $FC_{\max}(PNPSFk)$ при однократном их применении (табл. 5) принимают невысокие значения, особенно с ростом величины k .

Таблица 5

Полнота покрытия, %

$PNPSFk$	$PNPSF3$	$PNPSF4$	$PNPSF5$	$PNPSF6$	$PNPSF7$	$PNPSF8$	$PNPSF9$
$FC_{\max}(PNPSFk)$	66,66	37,50	20,0	10,41	5,35	2,73	1,38
$FC_{\text{March } C-}(PNPSFk)$	50	25	12,5	6,25	3,12	1,56	0,78
$FC_{\min}(PNPSFk)$	12,50	6,25	3,12	1,56	0,78	0,39	0,19

Максимальная полнота покрытия, равная 66,66 % для $k = 3$, достигается ранее рассмотренными маршевыми тестами, покрывающими все восемь видов неисправностей $PNPSFk$. Минимальной полнотой покрытия характеризуются тесты, обнаруживающие только один вид неисправностей $PNPSFk$, например *MATS*, а достаточно высокую покрывающую способность показывает тест *March C-*.

Радикальным увеличением полноты покрытия сложных кодочувствительных неисправностей памяти является применение многократных маршевых тестов, хорошо изученных для случая детерминированных начальных состояний памяти с известной физической топологией [3, 6, 11–14, 26] и для случая, когда топология неизвестна [3, 24, 27]. Большой цикл работ по неразрушающему тестированию (*transparent testing*), по сути, представляющий собой многократное тестирование, а также псевдоисчерпывающее (*pseudoexhaustive*) тестирование запоминающих

устройств, основан на применении маршевых тестов с изменяющимся содержимым памяти [3, 16, 17, 27–31]. Модификация адресных последовательностей для улучшения качества тестов памяти первоначально была предложена и исследована в работе [33] и получила свое развитие в работах [5, 17, 34, 35], однако в этих работах рассматривались многократные тесты небольшой кратности, использующие стандартные детерминированные адресные последовательности [5, 17, 34, 35].

Оценка эффективности обнаружения неисправностей $PNPSFk$ многократными маршевыми тестами с изменяемыми адресными последовательностями. Развитие методов многократного применения маршевых тестов привело к появлению псевдоисчерпывающих тестов памяти [5, 16]. Сущность подобных тестов заключается в формировании в произвольных k из N ячейках памяти всевозможных 2^k двоичных комбинаций. Как показано в [16], основой высокой эффективности таких тестов является формирование восьми видов орбит, представляющих собой набор двоичных комбинаций в произвольных k из N ячейках памяти. Вид орбит и их количество, формируемое маршевым тестом, используются для определения покрывающей способности теста для различных типов неисправностей памяти. Применяя понятие орбиты, по аналогии с псевдоисчерпывающими тестами введем восемь видов орбит, представляющих условия активизации восьми видов неисправностей $PNPSFk$, приведенных в табл. 2. В табл. 6 представлены орбиты O_0, O_1, O_2 и O_3 , характерные для менее сложных маршевых тестов типа $March C-$, а в табл. 7 – орбиты Q_0, Q_1, Q_2 и Q_3 , присущие более сложным их разновидностям.

Таблица 6

Орбиты O_0, O_1, O_2 и O_3 , формируемые тестами типа $March C-$

O_0					O_1					O_2					O_3				
i_4	i_3	i_2	i_1	i_0	i_4	i_3	i_2	i_1	i_0	i_4	i_3	i_2	i_1	i_0	i_4	i_3	i_2	i_1	i_0
0	0	0	0	↑	↑	0	0	0	0	1	1	1	1	↓	↓	1	1	1	1
0	0	0	↑	1	1	↑	0	0	0	1	1	1	↓	0	0	↓	1	1	1
0	0	↑	1	1	1	1	↑	0	0	1	1	↓	0	0	0	0	↓	1	1
0	↑	1	1	1	1	1	1	↑	0	1	↓	0	0	0	0	0	0	↓	1
↑	1	1	1	1	1	1	1	1	↑	↓	0	0	0	0	0	0	0	0	↓

Таблица 7

Дополнительные орбиты Q_0, Q_1, Q_2 и Q_3 , формируемые тестами типа $March PS$

Q_0					Q_1					Q_2					Q_3				
i_4	i_3	i_2	i_1	i_0	i_4	i_3	i_2	i_1	i_0	i_4	i_3	i_2	i_1	i_0	i_4	i_3	i_2	i_1	i_0
0	0	0	0	↑	↑	0	0	0	0	1	1	1	1	↓	↓	1	1	1	1
0	0	0	↑	0	0	↑	0	0	0	1	1	1	↓	1	1	↓	1	1	1
0	0	↑	0	0	0	0	↑	0	0	1	1	↓	1	1	1	1	↓	1	1
0	↑	0	0	0	0	0	0	↑	0	1	↓	1	1	1	1	1	1	↓	1
↑	0	0	0	0	0	0	0	0	↑	↓	1	1	1	1	1	1	1	1	↓

Каждая из представленных орбит описывает условие активизации одного из видов обнаруживаемых неисправностей $PNPSFk$ и соответствует фазам маршевого теста, представляющим примитив для активизации и обнаружения данного вида $PNPSFk$ (см. табл. 2). Нетрудно заметить, что только одну орбиту O_0 формирует классический тест $MATS$, две орбиты O_0 и O_1 – тест $MATS++$, четыре орбиты O_0, O_1, O_2 и O_3 – тесты типа $March C-$ и, наконец, максимальное количество орбит, дополнительно включающих орбиты Q_0, Q_1, Q_2 и Q_3 , генерируют тесты типа $March PS$. Отметим, что произвольный маршевый тест генерирует произвольное сочетание орбит, что и определяет его эффективность.

При однократной реализации маршевого теста с изменяемыми начальными условиями, в том числе и с измененной адресной последовательностью, полнота покрытия кодочувстви-

тельных неисправностей $PNPSFk$, так же как и любых других неисправностей, количественно остается неизменной [6, 33]. Отличием являются только конкретные конфигурации неисправностей $PNPSFk$, которые обнаруживаются либо не обнаруживаются при реализации теста с заданной последовательностью адресов [33]. В качестве иллюстрации последнего утверждения приведем пример реализации теста $MATS$ для двух отличающихся адресных последовательностей, в результате применения которых формируются две различные орбиты O_{01} и O_{02} . В первом случае для произвольных $k = 5$ из N ячеек с адресами $i_0 < i_1 < i_2 < i_3 < i_4$ тестом $MATS$ будут обнаружены пять неисправностей $PNPSFk$ $\langle 0,0,0,0,\uparrow \rangle$, $\langle 0,0,0,\uparrow,1 \rangle$, $\langle 0,0,\uparrow,1,1 \rangle$, $\langle 0,\uparrow,1,1,1 \rangle$ и $\langle \uparrow,1,1,1,1 \rangle$, образующих орбиту O_{01} (табл. 8).

Таблица 8

Орбиты O_{01} и O_{02}

O_{01}					O_{02}				
i_4	i_3	i_2	i_1	i_0	i_4	i_3	i_2	i_1	i_0
0	0	0	0	\uparrow	0	0	\uparrow	0	0
0	0	0	\uparrow	1	0	0	1	0	\uparrow
0	0	\uparrow	1	1	\uparrow	0	1	0	1
0	\uparrow	1	1	1	1	\uparrow	1	0	1
\uparrow	1	1	1	1	1	1	1	\uparrow	1

При изменении порядка адресов в новой адресной последовательности теста $MATS$, для которой, например, окажется, что $i_2 < i_0 < i_4 < i_3 < i_1$, этот тест обнаружит такое же количество неисправностей $PNPSFk$ в тех же $k = 5$ из N ячейках памяти, но уже других, а именно $\langle 0,0,1,0,\uparrow \rangle$, $\langle 1,1,1,\uparrow,1 \rangle$, $\langle 0,0,\uparrow,0,0 \rangle$, $\langle 1,\uparrow,1,0,1 \rangle$ и $\langle \uparrow,0,1,0,1 \rangle$.

Для последующих итераций многократного тестирования памяти будем применять нулевые начальные состояния ячеек памяти и изменяемые адресные последовательности, которые представляют собой случайные последовательности адресов из множества $N!$ возможных последовательностей. Несмотря на ряд ограничений, таких как количество адресов N и их формирование без повторов, представляется возможным генерирование подобных последовательностей, максимально близких по своим свойствам к случайным последовательностям [5, 16].

В отличие от многократных маршевых тестов, основанных на изменении начального состояния памяти, при многократном тестировании с изменяемыми адресными последовательностями маршевый тест должен удовлетворять необходимому условию обнаружения неисправностей $PNPSFk$, для которых базовая ячейка выполняет оба перехода, а именно переходы \uparrow и \downarrow . Это необходимо для достижения полноты покрытия, близкой к 100 % при большом числе l повторений теста. В частности, тест $MATS$ при многократном его применении позволяет достичь только 50 % полноты покрытия, так как обнаруживает лишь те неисправности, в которых базовая ячейка не может выполнить только один переход (\uparrow).

Если предположить, что однократное применение маршевого теста позволяет обнаруживать неисправности $PNPSFk$ с полнотой покрытия $FC_{Test}(PNPSFk)$, то l -кратное его использование при произвольных (случайных) адресных последовательностях позволяет достичь полноты покрытия, вычисляемой согласно выражению

$$FC_{Test}(PNPSFk, l) = \left(1 - \left(1 - \frac{FC_{Test}(PNPSFk)}{100\%} \right)^l \right) \cdot 100\% \quad (7)$$

Для трех разновидностей тестов, а именно тестов типа $MATS++$, $March C-$ и тестов семейства $March PS$, соответствующие выражения для полноты покрытия имеют вид

$$\begin{aligned}
 FC_{MATS++}(PNPSFk, l) &= \left(1 - \left(1 - \frac{1}{2^{k-1}}\right)^l\right) \cdot 100\%, \\
 FC_{March C-}(PNPSFk, l) &= \left(1 - \left(1 - \frac{1}{2^{k-2}}\right)^l\right) \cdot 100\%, \\
 FC_{March PS}(PNPSFk, l) &= \left(1 - \left(1 - \frac{k-1}{k \cdot 2^{k-3}}\right)^l\right) \cdot 100\%.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Соответствие аналитических метрик (8) и полноты покрытия неисправностей $PNPSFk$ реальным значениям было оценено путем экспериментальных исследований для небольших объемов памяти и трех значений величины k . Исходное состояние памяти для каждой итерации многократного теста принималось неизменным, а сами реализации тестов отличались только адресной последовательностью, применяемой в каждой из последующих итераций. В трех последовательных реализациях тестов $MATS++$, $March C-$ и $March PS$ адреса ячеек памяти формировались в псевдослучайной последовательности с использованием генераторов M -последовательностей [5, 17]. В результате суммарная полнота покрытия при двукратном и трехкратном применении маршевых тестов заметно возрастает и в целом соответствует аналитическим оценкам, что подтверждают данные табл. 9 и 10.

Таблица 9

Экспериментальные значения полноты покрытия FC для случайных последовательностей адресов, %

$PNPSFk$	$PNPSF3$			$PNPSF4$			$PNPSF5$		
	l	1	2	3	1	2	3	1	2
$FC_{MATS++}(PNPSFk)$	24,90	42,74	55,83	12,48	22,61	30,95	6,31	11,87	16,91
$FC_{March C-}(PNPSFk)$	49,87	72,74	83,04	24,93	41,42	53,23	12,46	22,14	30,02
$FC_{March PS}(PNPSFk)$	66,31	85,13	92,54	37,39	58,07	71,11	20,01	34,93	45,28

Таблица 10

Аналитические оценки полноты покрытия FC для случайных последовательностей адресов, %

$PNPSFk$	$PNPSF3$			$PNPSF4$			$PNPSF5$		
	l	1	2	3	1	2	3	1	2
$FC_{MATS++}(PNPSFk)$	25	43,75	57,81	12,5	23,43	33,01	6,25	12,10	17,60
$FC_{March C-}(PNPSFk)$	50	75	87,5	25	43,75	57,81	12,5	23,43	33,01
$FC_{March PS}(PNPSFk)$	66,66	88,88	96,29	37,5	60,93	75,58	20	36	48,80

Анализ приведенных результатов позволяет сделать вывод о достаточно хорошей эффективности многократных тестов с изменяемыми случайными адресными последовательностями для обнаружения неисправностей $PNPSFk$. Видно, что использование трехкратного теста типа $March PS$ позволяет достичь полноты покрытия $FC_{March PS}(PNPSF5)$, практически близкой к 50 %, а максимальная полнота покрытия, близкая к 100 %, достижима только для достаточно больших значений l . В то же время следует отметить, что выражение (7) позволяет оценить кратность теста l для требуемой полноты покрытия $FC_{Test}(PNPSFk, l)$. Эта величина определяется из полученного на основании (7) выражения

$$l = \left\lceil \frac{\log_{10} \left(1 - \frac{FC_{Test}(PNPSFk, l)}{100\%}\right)}{\log_{10} \left(1 - \frac{FC_{Test}(PNPSFk)}{100\%}\right)} \right\rceil.
 \tag{9}$$

Например, для получения требуемой полноты покрытия $FC_{March\ PS}(PNPSF5, l) = 30\%$ неисправностей $PNPSF5$ с помощью многократного теста типа $March\ PS$ величина кратности, определенная согласно (9), равняется $l = \lceil (-0,155)/(-0,097) \rceil = 2$. Отметим, что в соответствии с (5) $FC_{March\ PS}(PNPSF5) = 20\%$, а полученный результат согласуется с экспериментальными данными, приведенными в табл. 9. В то же время для желаемых величин полноты покрытия, близких к 100% , величина l может рассматриваться как оценка кратности многократного теста. Для полноты покрытия $FC_{March\ PS}(PNPSF5, l) = 95\%$ значение этой оценки равняется 14.

При определении эффективности тестирования запоминающих устройств часто возникает вопрос о средней величине кратности многократного теста, покрывающего все заданные неисправности, т. е. обеспечивающего 100% -ю полноту покрытия. Подобная задача решалась в рамках псевдоисчерпывающего тестирования [5, 16, 30] и сводилась к классической задаче собирателя купонов [36]. Теоретические выводы и оценки, полученные для данной задачи, хорошо согласуются с экспериментальными результатами, приведенными для формирования псевдоисчерпывающих тестовых процедур на базе тестов $MATS++$ и $March\ C-$ [16, 30].

Для неисправностей $PNPSFk$ и многократных маршевых тестов с изменяемыми случайными адресными последовательностями примем те же допущения и ограничения, которые принимались для генерирования многократных тестов, реализующих псевдоисчерпывающие тесты [16]. Тогда согласно задаче собирателя купонов оценка среднего значения $l_{Test}(PNPSFk)$ кратности l для тестов типа $MATS++$, $March\ C-$ и $March\ PS$ вычисляется на основании следующих выражений:

$$\begin{aligned} l_{MATS++}(PNPSFk) &= \frac{k \cdot 2^k}{2k} \cdot \sum_i^{k \cdot 2^k} \frac{1}{i} = 2^{k-1} \cdot \sum_i^{k \cdot 2^k} \frac{1}{i}; \\ l_{March\ C-}(PNPSFk) &= \frac{k \cdot 2^k}{4k} \cdot \sum_i^{k \cdot 2^k} \frac{1}{i} = 2^{k-2} \cdot \sum_i^{k \cdot 2^k} \frac{1}{i}; \\ l_{March\ PS}(PNPSFk) &= \frac{k \cdot 2^k}{8 \cdot (k-1)} \cdot \sum_i^{k \cdot 2^k} \frac{1}{i} = \frac{k \cdot 2^{k-3}}{k-1} \cdot \sum_i^{k \cdot 2^k} \frac{1}{i}. \end{aligned} \quad (10)$$

Соотношения (10) позволяют определить среднее значение кратности l соответствующего теста для обнаружения всех $k2^k$ возможных неисправностей $PNPSFk$. Численные значения данной характеристики приведены в табл. 11.

Таблица 11

Среднее значение кратности теста, необходимое для обнаружения всех неисправностей $PNPSFk$

k	2	3	4	5	6	7	8	9
$l_{MATS++}(PNPSFk)$	5,434	15,104	37,952	85,904	208,93	472,00	1049,9	2307,3
$l_{March\ C-}(PNPSFk)$	2,717	7,556	18,976	42,952	104,46	236,00	524,93	1153,7
$l_{March\ PS}(PNPSFk)$	1	4,164	12,651	26,845	62,678	137,66	299,95	648,93

Данные табл. 11 позволяют сделать вывод, что маршевые тесты, специально ориентированные на обнаружение неисправностей $PNPSFk$ (тесты типа $March\ PS$), при многократном их применении имеют несомненное преимущество для случая обнаружения подобных неисправностей. Однако среднее значение кратности принимает существенные значения уже для величин $k > 5$.

Заключение. В работе проведен анализ моделей неисправностей запоминающих устройств и методов их обнаружения. Получены оценки полноты покрытия сложных кодочувствительных неисправностей $PNPSFk$ маршевых тестов. Введено понятия примитива, описывающего условия активизации и обнаружения неисправностей, и приведены примеры построения тестов, основанных на реализации требуемого множества подобных примитивов. Показана невысокая эффективность однократного применения тестов для обнаружения неисправностей $PNPSFk$,

которая уменьшается с увеличением количества k ячеек памяти, участвующих в неисправности. Обосновано применение многократных маршевых тестов с изменяемыми адресными последовательностями. Получены аналитические оценки кратности многократных маршевых тестов для обнаружения неисправностей $PNPSFk$, позволяющие определить как полноту покрытия тестом неисправностей $PNPSFk$, так и требуемое значение кратности многократного теста.

Список использованных источников

1. The International Technology Roadmap for Semiconductors: 2003 Edition. – San Jose, CA, USA, Semiconductor Industry Association, 2003. – 65 p.
2. Sharma, A. K. Advanced Semiconductor Memories: Architectures, Designs, and Applications / A. K. Sharma. – London : John Wiley & Sons, 2003. – 652 p.
3. Wang, L.-T. VLSI Test Principles and Architectures: Design for Testability / L.-T. Wang, C.-W. Wu, X. Wen. – Amsterdam : Elsevier, 2006. – 808 p.
4. Bushnell, M. L. Essentials of Electronic Testing for Digital, Memory & Mixed-Signal VLSI Circuits / M. L. Bushnell, V. D. Agrawal. – N. Y., USA : Kluwer Academic Publishers, 2000. – 690 p.
5. Ярмолик, В. Н. Контроль и диагностика вычислительных систем / В. Н. Ярмолик. – Минск : Бестпринт, 2019. – 387 с.
6. Goor, A. J. Testing Semiconductor Memories: Theory and Practice / A. J. Goor. – Chichester, UK : John Wiley & Sons, 1991. – 536 p.
7. Hayes, J. P. Detection of pattern-sensitive faults in random access memories / J. P. Hayes // IEEE Transactions on Computer. – 1975. – Vol. 24, no. 2. – P. 150–157.
8. Anderson, K. Device manufacturers test problems / K. Anderson // Proc. of IEEE Semiconductor Test Symp. – Cherry Hill, NJ, USA, 1972. – P. 17–26.
9. Suk, D. S. Test procedures for a class of pattern-sensitive faults in semiconductor random-access memories / D. S. Suk, S. M. Reddy // IEEE Transactions on Computer. – 1980. – Vol. 29, no. 6. – P. 419–429.
10. Hayes, J. P. Testing memories for single-cell pattern-sensitive fault / J. P. Hayes // IEEE Transactions on Computer. – 1980. – Vol. 29, no. 3. – P. 249–254.
11. Cheng, K.-L. Efficient neighborhood pattern-sensitive fault test algorithms for semiconductor memories / K.-L. Cheng, M.-F. Tsai, C. T. Wu // Proc. of 19th IEEE VLSI Test Symp. – Marina Del Rey, CA, USA, 2001. – P. 225–237.
12. Cheng, K.-L. Neighborhood pattern-sensitive fault testing and diagnostics for random-access memories / K.-L. Cheng, M.-F. Tsai, C. T. Wu // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2002. – Vol. 21, no. 11. – P. 284–267.
13. Cascaval, P. Efficient march test for 3-coupling faults in random access memories / P. Cascaval, S. Bennett // Microprocessors and Microsystems. – 2001. – Vol. 24, no. 10. – P. 501–509.
14. Kang, D.-C. An efficient built-in self-test algorithm for neighborhood pattern sensitive faults in high-density memories / D.-C. Kang, S.-B. Cho // Proc. of 4th Korea-Russia Intern. Symp. (KORUS 2000). – Ulsan, South Korea, 2000. – Vol. 2. – P. 218–223.
15. Cockburn, B. F. Deterministic tests for detecting scrambled pattern-sensitive faults in RAMs / B. F. Cockburn // Proc. IEEE Intern. Workshop Memory Technology Design and Testing (MTDT). – San Jose, CA, USA, 1995. – P. 117–122.
16. Ярмолик, В. Н. Псевдоисчерпывающее тестирование запоминающих устройств на базе маршевых тестов типа March A / В. Н. Ярмолик, И. Мрозек, С. В. Ярмолик // Информатика. – 2020. – № 2(17). – С. 54–70.
17. Ярмолик, С. В. Маршевые тесты для самотестирования ОЗУ / С. В. Ярмолик, А. П. Занкович, А. А. Иванюк. – Минск : Бестпринт, 2009. – 270 с.
18. Franklin, M. A built in self-test algorithm for row/column pattern sensitive faults in RAMs / M. Franklin, K. Saluja, K. Kinoshita // IEEE J. of Solid-State Circuits. – 1990. – Vol. 25, no. 2. – P. 514–524.
19. Sfikas, Y. Physical design oriented DRAM neighborhood pattern sensitive fault testing / Y. Sfikas, Y. Tsiatouhas // Proc. of 12th Intern. Symp. on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS). – Liberec, Czech Republic, 2009. – P. 108–113.
20. Parallel testing of multi-port static random access memories / F. Karimi [et al.] // Microelectronics J. – 2003. – Vol. 34, no. 1. – P. 3–21.
21. Min, D.-S. Multiple twisted data line techniques for coupling noise reduction in embedded DRAMS / D.-S. Min, D. Langer // IEEE Custom Integrated Circuits Conf. – San Diego, CA, USA, 1999. – P. 231–234.

22. Kang, D.-C. An efficient built-in self-test algorithm for neighborhood pattern and bit-line-sensitive faults in high density memories / D.-C. Kang, S. M. Park, S.-B. Cho // *ETRI J.* – 2004. – Vol. 26, no. 6. – P. 520–534.
23. Goor, A. J. van de. Disturb neighborhood pattern sensitive fault / A. J. van de Goor, I. B. S. Tlili // *IEEE Intern. VLSI Test Symp.* – San Diego, CA, USA, 1997. – P. 37–45.
24. Yarmolik, V. N. Transparent memory testing for pattern-sensitive faults / V. N. Yarmolik, M. G. Karpovsky // *Proc. of Intern. Test Conf.* – Washington DC, USA, 1994. – P. 860–869.
25. Cockburn, B. E. Synthesized transparent BIST for detecting scrambled pattern-sensitive faults in RAMs / B. E. Cockburn, Y. F. Sat // *Proc. of the IEEE Intern. Test Conf.* – Washington DC, USA, 1995. – P. 23–32.
26. Yarmolik, V. March PS(23N) test for DRAM pattern-sensitive faults / V. Yarmolik, Y. Klimets, S. Demidenko // *Proc. Seventh IEEE Asian Test Symp. (ATS)*. – Singapore, 1998. – P. 354–357.
27. Mrozek, I. *Multi-run Memory Tests for Pattern Sensitive Faults* / I. Mrozek. – Cham : Springer International Publishing AG, 2019. – 135 p.
28. Nicolaidis, M. Transparent BIST for RAMs / M. Nicolaidis // *Proc. IEEE Intern. Test Conf.* – Washington DC, USA, 1992. – P. 598–607.
29. Неразрушающее тестирование запоминающих устройств / В. Н. Ярмолик [и др.]. – Минск : Бест-принт, 2005. – 230 с.
30. Ярмолик, В. Н. Псевдоисчерпывающее тестирование запоминающих устройств на базе многократных маршевых тестов / В. Н. Ярмолик, И. Мрозек, В. А. Леванцевич // *Информатика*. – 2018. – № 1(15). – С. 110–121.
31. Das, D. Exhaustive and near-exhaustive memory testing techniques and their BIST implementations / D. Das, M. G. Karpovsky // *J. of Electronic Testing*. – 1997. – Vol. 10. – P. 215–229.
32. Ярмолик, С. В. Итеративные почти псевдоисчерпывающие вероятностные тесты / С. В. Ярмолик, В. Н. Ярмолик // *Информатика*. – 2010. – № 2(26). – С. 66–75.
33. Niggemeyer, D. Integration of non-classical faults in standard march tests / D. Niggemeyer, M. Redeker, J. Otterstedt // *Proc. IEEE Intern. Workshop on Memory Technology, Design and Testing*. – San Jose, USA, 1998. – P. 91–96.
34. Ярмолик, В. Н. Адресные последовательности для многократного тестирования ОЗУ / В. Н. Ярмолик, С. В. Ярмолик // *Информатика*. – 2014. – № 2(42). – С. 124–136.
35. Ярмолик, С. В. Многократные неразрушающие маршевые тесты с изменяемыми адресными последовательностями / С. В. Ярмолик, В. Н. Ярмолик // *Автоматика и телемеханика*. – 2007. – № 2. – С. 21–30.
36. Flajolet, P. Birthday paradox, coupon collectors, caching algorithms and self-organizing search / P. Flajolet, D. Gardy, L. Thimonier // *Discrete Applied Mathematics*. – Vol. 39, no. 3 – P. 207–229.

References

1. *The International Technology Roadmap for Semiconductors: 2003 Edition*. San Jose, CA, USA, Semiconductor Industry Association, 2003, 65 p.
2. Sharma A. K. *Advanced Semiconductor Memories: Architectures, Designs, and Applications*. London, John Wiley & Sons, 2003, 652 p.
3. Wang L.-T., Wu C.-W., Wen X. *VLSI Test Principles and Architectures: Design for Testability*. Amsterdam, Elsevier, 2006, 808 p.
4. Bushnell M. L., Agrawal V. D. *Essentials of Electronic Testing for Digital, Memory & Mixed-Signal VLSI Circuits*. New York, USA, Kluwer Academic Publishers, 2000, 690 p.
5. Yarmolik V. N. Контроль и диагностика вучислител'нух system. *Monitoring and Diagnostics of Computer Systems*. Minsk, Bestprint, 2019, 387 p. (in Russian).
6. Goor A. J. *Testing Semiconductor Memories: Theory and Practice*. Chichester, UK, John Wiley & Sons, 1991, 536 p.
7. Hayes J. P. Detection of pattern-sensitive faults in random access memories. *IEEE Transactions on Computer*, 1975, vol. 24, no. 2, pp. 150–157.
8. Anderson K. Device manufacturers test problems. *Proceedings of IEEE Semiconductor Test Symposium*. Cherry Hill, NJ, USA, 1972, pp. 17–26.
9. Suk D. S., Reddy S. M. Test procedures for a class of pattern-sensitive faults in semiconductor random-access memories. *IEEE Transactions on Computer*, 1980, vol. 29, no. 6, pp. 419–429.

10. Hayes J. P. Testing memories for single-cell pattern-sensitive fault. *IEEE Transactions on Computer*, 1980, vol. 29, no. 3, pp. 249–254.
11. Cheng K.-L., Tsai M.-F., Wu C. T. Efficient neighborhood pattern-sensitive fault test algorithms for semiconductor memories. *Proceedings of 19th IEEE VLSI Test Symposium*. Marina Del Rey, CA, USA, 2001, pp. 225–237.
12. Cheng K.-L., Tsai M.-F., Wu C. T. Neighborhood pattern-sensitive fault testing and diagnostics for random-access memories. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2002, vol. 21, no. 11, pp. 284–267.
13. Cascaval P., Bennett S. Efficient march test for 3-coupling faults in random access memories. *Microprocessors and Microsystems*, 2001, vol. 24, no. 10, pp. 501–509.
14. Kang D.-C., Cho S.-B. An efficient built-in self-test algorithm for neighborhood pattern sensitive faults in high-density memories. *Proceedings of 4th Korea-Russia International Symposium (KORUS 2000)*. Ulsan, South Korea, 2000, vol. 2, pp. 218–223.
15. Cockburn B. F. Deterministic tests for detecting scrambled pattern-sensitive faults in RAMs. *Proceedings IEEE International Workshop Memory Technology Design and Testing (MTDT)*. San Jose, CA, USA, 1995, pp. 117–122.
16. Yarmolik V. N., Mrozek I., Yarmolik S. V. Pseudoisчерpuyayuchie testirovanie zapominayuschih ustroystv na baze marchevuh testov tipa March A [Pseudo-exhaustive memory testing based on March A tests]. *Informatika [Informatics]*, 2020, no. 2(17), pp. 54–70 (in Russian).
17. Yarmolik V. N., Zankovich A. P., Ivanuok A. A. Marshevue testu dlya samotestirovaniya OZU. *RAM Self-Test March Tests*. Minsk, Bestprint, 2009, 270 p. (in Russian).
18. Franklin M., Saluja K., Kinoshita K. A built in self-test algorithm for row/column pattern sensitive faults in RAMs. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1990, vol. 25, no. 2, pp. 514–524.
19. Sfikas Y., Tsiatouhas Y. Physical design oriented DRAM neighborhood pattern sensitive fault testing. *Proceedings of 12th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS)*. Liberec, Czech Republic, 2009, pp. 108–113.
20. Karimi F., Irrinki S., Crosbuy T., Lombardi F. Parallel testing of multi-port static random access memories. *Microelectronics Journal*, 2003, vol. 34, no. 1, pp. 3–21.
21. Min D.-S., Langer D. Multiple twisted data line techniques for coupling noise reduction in embedded DRAMS. *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*. San Diego, CA, USA, 1999, pp. 231–234.
22. Kang D.-C., Park S. M., Cho S.-B. An efficient built-in self-test algorithm for neighborhood pattern and bit-line-sensitive faults in high density memories. *ETRI Journal*, 2004, vol. 26, no. 6, pp. 520–534.
23. Goor A. J. van de, Tlili I. B. S. Disturb neighborhood pattern sensitive fault. *IEEE International VLSI Test Symposium*. San Diego, CA, USA, 1997, pp. 37–45.
24. Yarmolik V. N., Karpovsky M. G. Transparent memory testing for pattern-sensitive faults. *Proceedings of International Test Conference*. Washington DC, USA, 1994, pp. 860–869.
25. Cockburn B. E., Sat Y. F. Synthesized transparent BIST for detecting scrambled pattern-sensitive faults in RAMs. *Proceedings of the IEEE International Test Conference*. Washington DC, USA, 1995, pp. 23–32.
26. Yarmolik V., Klimets Y., Demidenko S. March PS(23N) test for DRAM pattern-sensitive faults. *Proceedings Seventh IEEE Asian Test Symposium (ATS)*. Singapore, 1998, pp. 354–357.
27. Mrozek I. *Multi-run Memory Tests for Pattern Sensitive Faults*. Cham, Springer International Publishing AG, 2019, 135 p.
28. Nicolaidis M. Transparent BIST for RAMs. *Proceedings IEEE International Test Conference*. Washington DC, USA, 1992, pp. 598–607.
29. Yarmolik V. N., Murashko I. A., Kummert A., Ivaniuk A. A. Nerazrushayuschee testirovanie zapominayuschih ustroystv. *Transparent Memory Testing*. Minsk, Bestprint, 2005, 230 p. (in Russian).
30. Yarmolik V. N., Mrozek I., Levantsevich V. A. Pseudoisчерpuyayuchie testirovanie zapominayuschih ustroystv na baze mnogokratnuch marchevuh testov [Pseudo-exhaustive memory testing based on multiple march tests]. *Informatika [Informatics]*, 2018, no. 1(15), pp. 110–121 (in Russian).
31. Das D., Karpovsky M. G. Exhaustive and near-exhaustive memory testing techniques and their BIST implementations. *Journal of Electronic Testing*, 1997, vol. 10, pp. 215–229.
32. Yarmolik S. V., Yarmolik V. N. Iterativnue pochtii pseudoisчерpuyayuchie veroyatnostnue testu [Iterative near pseudo-exhaustive tests]. *Informatika [Informatics]*, 2010, no. 2(26), pp. 66–75 (in Russian).
33. Niggemeyer D., Redeker M., Otterstedt J. Integration of non-classical faults in standard march tests. *Proceedings IEEE International Workshop on Memory Technology, Design and Testing*. San Jose, USA, 1998, pp. 91–96.

34. Yarmolik V. N., Yarmolik S. V. Adresnue posledovatel'nosti dlya mnogokratnogo testirovaniya OZU [Address sequences for multi run RAM testing]. *Informatika [Informatics]*, 2014, no. 2(42), pp. 124–136 (in Russian).

35. Yarmolik S. V., Yarmolik V. N. Mnogokratnue nerazrushayushchie marshevue testu s izmenyaemymi adresnumi posledovatel'nostymi [Multiple non-destructive marching tests with variable address sequences]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote]*, 2007, no. 2, pp. 21–30 (in Russian).

36. Flajolet P., Gardy D., Thimonier L. Birthday paradox, coupon collectors, caching algorithms and self-organizing search. *Discrete Applied Mathematics*, vol. 39, no. 3, pp. 207–229.

Информация об авторах

Ярмолик Вячеслав Николаевич, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: yarmolik10ru@yahoo.com

Леванцевич Владимир Александрович, магистр технических наук, старший преподаватель, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: lvn@bsuir.by

Деменковец Денис Викторович, магистр технических наук, старший преподаватель, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: demenkovets@bsuir.by

Мрозек Иренеуш, доктор, адъюнкт, Белостокский технический университет.
E-mail: i.mrozek@pb.edu.pl

Information about the authors

Vyacheslav N. Yarmolik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: yarmolik10ru@yahoo.com

Vladimer A. Levantsevich, M. Sci. (Eng.), Senior Lecture, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: lvn@bsuir.by

Denis V. Demenkovets, M. Sci. (Eng.), Senior Lecture, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: demenkovets@bsuir.by

Ireneusz Mrozek, Dr. Sci., Lecture, Bialystok University of Technology.
E-mail: i.mrozek@pb.edu.pl

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ, РЕЧИ, ТЕКСТА И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

SIGNAL, IMAGE, SPEECH, TEXT PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION



УДК 004.932
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-43-60>

Оригинальная статья
Original Paper

Обнаружение и сопровождение объектов на видеопоследовательностях: формализация, критерии и результаты

Р. П. Богущ¹✉, С. В. Абламейко^{2,3}

¹Полоцкий государственный университет,
ул. Блохина, 29, Новополоцк, 211440, Беларусь
✉E-mail: bogushr@mail.ru

²Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь

³Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь

Аннотация. Одним из перспективных направлений развития и внедрения искусственного интеллекта является автоматическое обнаружение и отслеживание движущихся объектов в системах видеонаблюдения. В работе представлена формализация обнаружения и сопровождения одного и множества объектов на видеопоследовательностях. Рассмотрены критерии, характеризующие качество обнаружения сопровождаемых объектов, точность определения местоположения объекта на кадре, траекторию движения и точность сопровождения множества объектов. На основе рассмотренного обобщения разработан алгоритм сопровождения людей, использующий сверточные нейронные сети для детектирования людей и формирования признаков. Нейросетевые признаки включены в составной дескриптор, содержащий также геометрические и цветовые характеристики для описания каждого обнаруженного человека в кадре. Приведены результаты экспериментов на основе рассмотренных критериев, экспериментально подтверждено, что улучшение работы детектора позволяет повысить точность сопровождения объектов. Представлены примеры кадров обработанных видеопоследовательностей с визуализацией траекторий движения людей.

Ключевые слова: видеонаблюдение, движущийся объект, сверточная нейронная сеть, сопровождение через обнаружение, траектория движения

Для цитирования. Богущ, Р. П. Обнаружение и сопровождение объектов на видеопоследовательностях: формализация, критерии и результаты / Р. П. Богущ, С. В. Абламейко // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 43–60. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-43-60>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 11.01.2021
Принята к публикации | Accepted 10.02.2021
Опубликована | Published 26.03.2021

Object detection and tracking in video sequences: formalization, metrics and results

Rykhard P. Bohush^{1✉}, Sergey V. Ablameyko^{2,3}

¹*Polotsk State University,
st. Blokhin, 29, Novopolotsk, 211440, Belarus
✉E-mail: bogushr@mail.ru*

²*Belarusian State University,
av. Nezaliezhnasti, 4, 220030, Minsk, Belarus*

³*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*

Abstract. One of the promising areas of development and implementation of artificial intelligence is the automatic detection and tracking of moving objects in video sequence. The paper presents a formalization of the detection and tracking of one and many objects in video. The following metrics are considered: the quality of detection of tracked objects, the accuracy of determining the location of the object in a frame, the trajectory of movement, the accuracy of tracking multiple objects. Based on the considered generalization, an algorithm for tracking people has been developed that uses the tracking through detection method and convolutional neural networks to detect people and form features. Neural network features are included in a composite descriptor that also contains geometric and color features to describe each detected person in the frame. The results of experiments based on the considered criteria are presented, and it is experimentally confirmed that the improvement of the detector operation makes it possible to increase the accuracy of tracking objects. Examples of frames of processed video sequences with visualization of human movement trajectories are presented.

Keywords: video surveillance, moving object, convolutional Neural Network, tracking by detection, motion trajectory

For citation. Bohush R. P., Ablameyko S. V. Object detection and tracking in video sequences: formalization, metrics and results. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 43–60 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-43-60>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Обнаружение и сопровождение объектов на видеопоследовательностях относятся к основным задачам в «компьютерном зрении», которые имеют различное количество технических применений и все шире будут использоваться для распознавания типа активности человека в системах мониторинга и охраны, сопровождения объектов в системах технического зрения на производстве, оценки движения людей при реабилитации в медицине, анализа окружающей обстановки в автоматизированных системах вождения транспортных средств [1]. В отличие от изображений видеопоследовательности содержат значительно больший объем информации, который изменяется и в пространстве, и во времени. Поэтому обработка и анализ последовательностей изображений позволяют выявлять не только статические, но и динамические признаки объектов, что приводит к повышению результативности автоматизированной работы систем видеонаблюдения в целом.

Наиболее изученной является задача обнаружения людей и лиц на видеопоследовательностях [2]. В работе [3] предложен алгоритм сопровождения людей на видеоряде на основе метода Монте-Карло для Марковских цепей, в работе [4] – алгоритм обнаружения и сопровождения людей в интеллектуальных детекторах внештатных ситуаций на базе метода опорных векторов. В настоящее время для обнаружения объектов широкое развитие и применение получили алгоритмы на основе сверточных нейронных сетей, которые устойчивы к изменениям освещенности, динамическому заднему фону и позволяют осуществлять детектирование даже в случае существенных перекрытий объектов [5, 6].

Сопровождение множества людей в системах видеонаблюдения представляет собой актуальную прикладную задачу, однако в настоящее время она не решена в полной мере. Это обусловлено следующими факторами: отображением на видеопоследовательности огромного множества различных вариантов изображений одного и того же человека из-за его временных переходов на сцене; неоднородным задним фоном, фрагменты которого могут быть схожи по форме, текстуре или цвету с изображениями людей; низким уровнем освещенности в помещениях; наличием теней; множественными перекрытиями движущихся людей между собой или с другими объектами; значительной схожестью признаков разных сопровождаемых людей; достаточно быстрым их движением и, в ряде случаев, изменяющимся ускорением; нелинейной траекторией движения.

Существует ряд подходов для решения задачи сопровождения, однако из-за указанных проблем их результативность является недостаточной. Этап формирования эффективного набора признаков, по которым будет осуществляться обнаружение и сопровождение объектов на видеопоследовательности, является одним из наиболее сложных, так как для него имеются ограничения: следует использовать признаки, которые заранее могут быть получены для описания объектов; требуется определить ограниченный набор признаков, который позволит получить максимальную результативность, т. е. необходимо исключить малоинформативные признаки; возможно применение алгоритмов, которые удовлетворяют вычислительным требованиям прикладных систем. Авторами разработан ряд решений, которые предназначены для обнаружения и сопровождения динамических объектов на видеопоследовательностях [7], людей [8], дыма и пламени [9]. Можно говорить о том, что используемый набор признаков в значительной мере связан с применяемыми алгоритмами обнаружения и сопровождения для решения поставленных задач. Поэтому для разработки эффективных методов, методик и алгоритмов обнаружения и сопровождения объектов на видеопоследовательностях необходимо провести четкую формализацию указанных задач. Необходимо определить объекты, которые будут обнаруживаться и сопровождаться, установить основные этапы данного процесса, а также критерии, позволяющие оценить качество обработки и показать, как это реализуется на практике.

В настоящей работе предлагается формализация задач обнаружения и сопровождения объектов на видеопоследовательностях. На основе рассмотренного обобщения разработан алгоритм сопровождения множества людей, использующий метод «сопровождение через обнаружение» (tracking by detection) и сверточные нейронные сети для детектирования и формирования признаков каждого человека. Соответствие между людьми на кадрах устанавливается с использованием составного дескриптора, описывающего каждого человека и содержащего нейросетевые, геометрические и цветовые признаки. Приводятся результаты экспериментов на основе рассмотренных критериев, позволяющих оценить качество работы алгоритмов. Экспериментально подтверждается, что улучшение работы детектора повышает точность сопровождения объектов.

Формализация задачи обнаружения объектов. Видеопоследовательность, или видеопоток, – это последовательность цифровых изображений (кадров) $V = \{F_k\}$, где k – номер изображения в последовательности.

Объект на изображении (Ob) представляет собой локальную область, отличающуюся от окружающего фона и отображающую некоторую часть признаков объекта реального мира.

На каждом кадре последовательности, полученной со стационарной видеокамеры, как правило, отображается множество объектов:

$$OB_{F_k} = \{Ob_q^{F_k}\}, q = 1, \dots, Q.$$

По критерию движения каждый из них может быть отнесен к двум основным классам:

– стационарный (неподвижный) объект на последовательности изображений, который описывается множеством признаков $Ft_{Ob_q}^S$ и его координатами x_{Ob_q} , y_{Ob_q} , не изменяющимися в течение интервала времени t . Такой объект может быть представлен формальной моделью

$$\text{Ob}_q^S = \left(Ft_{\text{Ob}_q}^S, x_{\text{Ob}_q}, y_{\text{Ob}_q}, Ns_{\text{Ob}_q}^{F_k} \right),$$

где $\left(Ft_{\text{Ob}_q}, x_{\text{Ob}_q}, y_{\text{Ob}_q} \right) = \text{const} \forall F_k, k \in t$; $Ns_{\text{Ob}_q}^{F_k}$ – множество возможных шумовых воздействий на объект;

– движущийся объект на последовательности изображений, характеризующийся изменением одного или нескольких основных параметров (формы, размеров, координат) в течение интервала времени t . Трансформация формы и (или) размеров объекта приводит к изменению его признаков на кадрах $ft_{\text{Ob}_q}^{F_k}$. Такой объект может быть представлен формальной моделью

$$\text{Ob}_q^D = \left(ft_{\text{Ob}_q}^{F_k}, x_{\text{Ob}_q}^{F_k}, y_{\text{Ob}_q}^{F_k}, Ns_{\text{Ob}_q}^{F_k} \right),$$

где $x_{\text{Ob}_q}^{F_k}, y_{\text{Ob}_q}^{F_k}$ – координаты объекта; $Ft_{\text{Ob}_q}^D$ – множество признаков движущегося объекта, $Ft_{\text{Ob}_q}^D \supseteq ft_{\text{Ob}_q}^{F_k}, \forall k \in t$. При этом $ft_{\text{Ob}_q}^{F_k} \cap ft_{\text{Ob}_q}^{F_{k+i}}$, т. е. для одного и того же движущегося объекта на последовательности кадров характерно изменение его признаков.

Обнаружение объекта – это определение местоположения заданного объекта Ob^e на изображении F , причем его размеры меньше размеров изображения, а количество объектов на изображении заведомо неизвестно.

В общем случае процесс обнаружения объекта Ob^e реализуется путем сравнения признаков эталона Ft^e и всех возможных фрагментов на плоскости изображения с использованием метода M с учетом правила

$$S \left(Ft^e, Ft_{\text{Ob}_q}^F \right) \xrightarrow[Z]{M} \max,$$

где S – точность обнаружения, Z – множество ограничений.

При обнаружении стационарного объекта на последовательности изображений необходимо учитывать изменчивость динамической сцены, так как кроме статических на ней присутствуют и движущиеся объекты, причем их количество может изменяться. Объекты Ob_q^D могут перекрывать стационарный объект, что приведет к изменению его признаков на последовательности кадров:

$$Ft_{\text{Ob}_q}^{S, F_k} \neq Ft_{\text{Ob}_q}^{S, F_{k+1}}.$$

Следовательно, для обнаружения стационарного объекта на последовательности изображений, отображающих динамическую сцену, необходимо использовать метод M_{STV} , учитывающий изменение признаков во времени:

$$S \left(Ft^e, Ft_{\text{Ob}_q}^{S, F_k} \right) \xrightarrow[Z_{STV}]{M_{STV}} \max,$$

где Z_{STV} – множество ограничений при обнаружении стационарного объекта на последовательности изображений.

Вместе с тем использование видеопоследовательностей позволяет более эффективно решать задачи, не доступные при обработке одного изображения. Условия съемки динамической сцены могут привести к тому, что объект будет сильно искажен на текущем кадре и его обнаружение в заданный момент времени невозможно, например, из-за существенного перекрытия движущимся объектом, которое через несколько кадров может уменьшиться до значения, позволяющего правильно обнаружить объект на изображении.

Реальное движение, которое происходит на трехмерной динамической сцене, на видеопоследовательности представляется в виде двухмерной проекции. Перемещение этой проекции обуславливает изменение яркости пикселей областей движения на кадрах.

Обнаружение движущегося объекта – это определение местоположения объекта Ob^D на текущем кадре видеопоследовательности F^k на основе заданного F^e :

$$SD(Ob_{F^k}^D, Ob_{F^e}^D) \xrightarrow{MD} \xrightarrow{ZD} \max,$$

где SD – точность обнаружения движущегося объекта, MD – применяемый метод, ZD – множество ограничений.

В качестве F^e может использоваться предыдущий кадр или кадр, не содержащий всех возможных движущихся объектов на динамической сцене. Второй подход позволит обнаруживать движущиеся объекты, которые неподвижны в течение некоторого интервала времени.

С учетом ряда прикладных задач, которые могут быть решены с использованием анализа последовательностей изображений, множества различных объектов и множества возможных комбинаций признаков для них, общие эффективные дескрипторы и метод для обнаружения определить практически невозможно. Наиболее результативными являются специализированные методы обнаружения и анализа объектов на последовательностях изображений, ориентированные на применение для конкретных прикладных задач.

Формализация задачи сопровождения объектов. Сопровождение движущегося объекта – определение местоположения одного и того же объекта на каждом кадре видеопоследовательности в течение интервала времени t . Благодаря этому возможно построение траектории движения объекта, анализ которой необходим при решении определенных практических задач. Например, резкое изменение траектории движения человека в помещении может свидетельствовать о его падении, что важно для системы типа «умный дом».

Для осуществления сопровождения необходимо выполнить процедуры обнаружения и локализации. Используются различные способы описания объекта наблюдения:

- одной точкой, характеризующей центр масс объекта или центр минимально возможного прямоугольника, описанного вокруг объекта;
- набором ключевых точек, по которым объект может быть однозначно опознан на последующих кадрах;
- геометрическим примитивом, описанным вокруг объекта (чаще всего прямоугольником, реже эллипсом);
- внешним контуром объекта;
- набором областей, максимально устойчивым при движении, или всей областью объекта;
- инвариантными характеристиками объекта, например текстурой, цветовой гаммой и др.

Траектория движения объекта представляет собой последовательное отображение движения (или перемещения) данного объекта на видеопоследовательности:

$$Tr(Ob^D) = (Ob_{F_k}^D), \forall k \in t.$$

В физике траекторией движения называют линию, которую описывает частица при своем движении. Очевидно, что для решаемой задачи в итоге необходимо определить линию на требуемом кадре видеопоследовательности, которая покажет, как передвигался наблюдаемый объект за определенный промежуток времени. Данная линия может быть построена на основе множества точек, в которых находился объект при своем перемещении на предыдущих кадрах видеопоследовательности, т. е. траектория всего движения вычисляется как последовательное перемещение объекта от кадра к кадру. Могут быть разные варианты определения координат объекта на кадре, но наиболее используемый подход предполагает нахождение его центра (один пиксел на кадре) с координатами $x_{Ob_q}^{F_k}, y_{Ob_q}^{F_k}$. Как правило, движение рассматривается в системе координат кадра. Тогда траектория движения объекта на видеопоследовательности описывается набором координат центра объекта на каждом кадре:

$$Tr(\text{Ob}^D) = (\text{Ob}_{F_k}^D) = \left((x_{\text{Ob}_q}^{F_1}, y_{\text{Ob}_q}^{F_1}), (x_{\text{Ob}_q}^{F_2}, y_{\text{Ob}_q}^{F_2}), (x_{\text{Ob}_q}^{F_3}, y_{\text{Ob}_q}^{F_3}), \dots, (x_{\text{Ob}_q}^{F_n}, y_{\text{Ob}_q}^{F_n}) \right).$$

Желательно, чтобы траектория отображалась тонкой линией или линией единичной ширины поперечного сечения на результирующем кадре. Следует учитывать, что объекты на видеопоследовательности могут появляться не с первого кадра и выходить за пределы сцены не на последнем кадре, а в некоторый момент времени на n -м кадре. Тогда траектория движения может быть построена с кадра m , на котором обнаружен объект, и до n -го кадра. На время кратковременного скрытия движущегося объекта за другими или при невозможности его обнаружения по иным причинам траектория прерывается, но восстанавливается через несколько кадров, т. е. наблюдается ее фрагментация.

Принято различать сопровождение одного объекта (visual object tracking, VOT) и сопровождение множества объектов (multiple object tracking, MOT). Первый тип сопровождения характеризуется тем, что объект обнаруживается и локализуется на первом кадре, другие объекты не детектируются. Соответственно, требуется найти траекторию его движения Tr' с использованием метода *MTS* и ограничений *ZTS*:

$$STS(Tr') \xrightarrow{\frac{MTS}{ZTS}} \max,$$

где *STS* – точность сопровождения движущегося одиночного объекта.

Несмотря на разработку многочисленных алгоритмов, за последнее десятилетие задача VOT не завершена в полной мере из-за возможности значительного визуального изменения объекта и освещенности, помех на заднем плане, окклюзий.

При сопровождении множества объектов требуется определить множество траекторий движения $TR' = \{Tr'_q\}$ объектов на кадрах с последующим сопоставлением их между собой для определения перемещения всех объектов между кадрами:

$$STM(TR, TR') \xrightarrow{\frac{MTM}{ZTM}} \max,$$

где *TR* – множество реальных траекторий движения объектов; *STM* – критерий, характеризующий точность сопровождения множества объектов.

В кадре могут присутствовать несколько одновременно движущихся объектов. При этом объекты могут иметь практически идентичные визуальные признаки, выходить за пределы сцены на непродолжительное время или совсем ее покидать, могут появляться новые объекты, в том числе в местах выхода предыдущих, например в дверном проеме при входе в помещение, т. е. возможна потеря сопровождаемого объекта из-за его пересечения со схожим объектом или перекрытия элементом заднего плана. Сопровождение множества объектов выполняется на длительных временных интервалах и допускается прогнозирование местоположения на последующих кадрах.

Оба типа сопровождения, VOT и MOT, на первом шаге требуют обнаружения объектов. В практических приложениях эта задача может быть выполнена и оператором путем выделения заданного объекта на первом кадре, но такой подход используется, как правило, только при необходимости сопровождения одного объекта, так как при MOT на кадрах могут появляться новые объекты, требующие трекинга.

Одной из основных проблем для практического использования алгоритма сопровождения является обеспечение высокой точности при ограниченных аппаратных ресурсах и входных данных. В общем, точное сопровождение может быть достигнуто на основе решения задачи глобальной оптимизации, которая требует наличия сразу всей последовательности кадров, что в реальных системах видеонаблюдения реализовать невозможно. В существующих методах задача сопровождения объектов часто формулируется как задача оптимизации с использованием графовых алгоритмов [10]. Каждый детектированный объект представляется в виде вершины, а переход от одной вершины к другой определяется используемой функцией сходства.

Установление ассоциации на графах может быть решено методом нахождения пути с минимальной стоимостью, в котором задача сопровождения объектов наиболее эффективно решается путем глобальной оптимизации. Алгоритмы сопровождения на основе выделения и анализа особых точек требуют обязательного наличия углов в контурах изображения. При их малом количестве эффективность сопровождения будет низкой. Использование цветовых характеристик объектов для сопровождения рассмотрено в методе из работы [11]. Вероятностные подходы используют утверждение о том, что движущийся объект имеет определенное состояние, которое измеряется на каждом кадре, и для оценки его положения на следующем кадре необходимо обобщить значения из предыдущих. Для этого применяют методы на основе фильтра Калмана [12] или фильтра частиц [13]. Однако объекты могут иметь выраженную нелинейную траекторию движения (например, в ограниченном помещении). В этом случае оценка нового состояния на основе предыдущих будет определяться с высокой погрешностью, поэтому для решения различных прикладных задач используются разные подходы.

Критерии эффективности обнаружения и сопровождения. Одним из важнейших вопросов при оценке результатов обнаружения и сопровождения объектов является выбор критериев оценки качества выделенных объектов. При решении указанных двух задач требуется определить их местоположение на кадрах. Однако для задачи сопровождения имеется информация о расположении объектов на всех или некоторых предыдущих кадрах. Поэтому результативность сопровождения должна определяться не только такими известными характеристиками, как точность и полнота, но и другими критериями, которые учитывают сходство объектов на разных кадрах при нахождении траектории движения. Очевидно, что при оценке алгоритмов сопровождения множества объектов для последующего их сравнения следует применять набор различных критериев. В работах [14, 15] рассмотрены метрики, характеризующие точность и эффективность алгоритмов обнаружения и сопровождения. В статье [16] приводится обзор существующих критериев для определения качества сопровождения объектов на видеопоследовательностях различными алгоритмами, рассматриваются интегральные метрики, которые направлены на получение общей оценки алгоритма сопровождения.

Для сравнения эффективности алгоритмов сопровождения множества можно выделить:

1. *Критерии, характеризующие обнаружение сопровождаемых объектов:*

точность – доля правильно обнаруженных объектов относительно всех обнаруженных объектов при сопровождении:

$$PRC = \frac{TP}{TP + FP},$$

где TP – количество правильных обнаружений сопровождаемых объектов на всех кадрах видеопоследовательности, FP – количество ложных обнаружений сопровождаемых объектов на всех кадрах видеопоследовательности;

полнота – доля правильно обнаруженных объектов относительно всех объектов, которые должны быть обнаружены при сопровождении:

$$RCL = \frac{TP}{TP + FN},$$

где FN – количество пропусков сопровождаемых объектов на всех кадрах видеопоследовательности.

Комплексный критерий обобщает точность и полноту путем вычисления их гармонического среднего за период сопровождения и позволяет таким образом оценить работу алгоритмов сопровождения по единому показателю, который может иметь максимальное значение, равное единице, и рассчитывается как

$$IDF_1 = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}.$$

При оценке качества сопровождения используется метрика IoU (intersection over union), которая вычисляется для обнаруженной (T_{tr}) и известной (T_e) прямоугольных областей объекта в кадре:

$$IoU = \frac{T_{tr} \cap T_e}{T_{tr} \cup T_e}.$$

Значение IoU должно быть не менее 0,5 и индекс человека не должен изменяться при сопровождении для принятия решения о правильном сопровождении объекта (TP).

2. *Критерий, характеризующий точность определения местоположения (точность локализации) сопровождаемых объектов на кадрах видеопоследовательности.* Определяется как средняя точность локализации объектов в кадре (multi-object tracking precision, $MOTP$) при сопровождении, может иметь максимальное значение, равное единице, и рассчитывается по формуле

$$MOTP = \frac{\sum_k IOU(Ob_i, Ob_i^e)_k}{\sum_k NOb_k},$$

где Ob_i, Ob_i^e – сопровождаемый объект и соответствующий эталонный объект из базы данных; NOb_k – количество сопровождаемых объектов в кадре.

3. *Критерии, оценивающие траектории движения объектов:*

количество отслеживаемых траекторий (mostly tracked, MT) – общее число траекторий для объектов на видеопоследовательностях, для которых полученная траектория движения соответствует заданной не менее чем на 80 % ее продолжительности;

количество частично отслеживаемых траекторий (partially tracked, PT) – общее число траекторий для объектов на видеопоследовательностях, для которых полученная траектория движения соответствует заданной в пределах от 20 до 80 % ее продолжительности;

количество потерянных траекторий (mostly lost, ML) – общее число объектов на видеопоследовательностях, для которых полученная траектория движения соответствует заданной менее чем на 20 % ее продолжительности;

количество фрагментаций траектории (track fragmentations, FM) – общее число случаев, когда траектория меняет свой статус с отслеживаемой на неотслеживаемую, но отслеживание той же самой траектории возобновляется позже.

Критерии MT , PT , ML и FM не учитывают изменение индекса сопровождаемого объекта данной траектории.

Общее количество срывов за счет перезахвата ложного объекта при сопровождении (mismatches, MM) – количество переключений для траекторий движения сопровождаемых объектов на другие.

На рис. 1 приведены примеры ошибочных ситуаций при сопровождении множества объектов. На третьем и седьмом кадрах показаны примеры обмена траекториями двух движущихся объектов в каждом случае. Соответственно, суммарное значение $MM = 4$. При $k = 5$, т. е. на пятом кадре, объекты Ob_1 и Ob_4 покидают сцену, однако рядом с Ob_4 на ней появляется объект Ob_5 , который по своим признакам схож с Ob_4 , что приводит к ложному обнаружению, т. е. для данного кадра $FP = 1$. При $k = 3$ и $k = 4$ объект Ob_3 не обнаружен, значит, $FN = 2$. Также наблюдается потеря его траектории и фрагментация, поскольку траектория для данного объекта восстанавливается на пятом кадре.

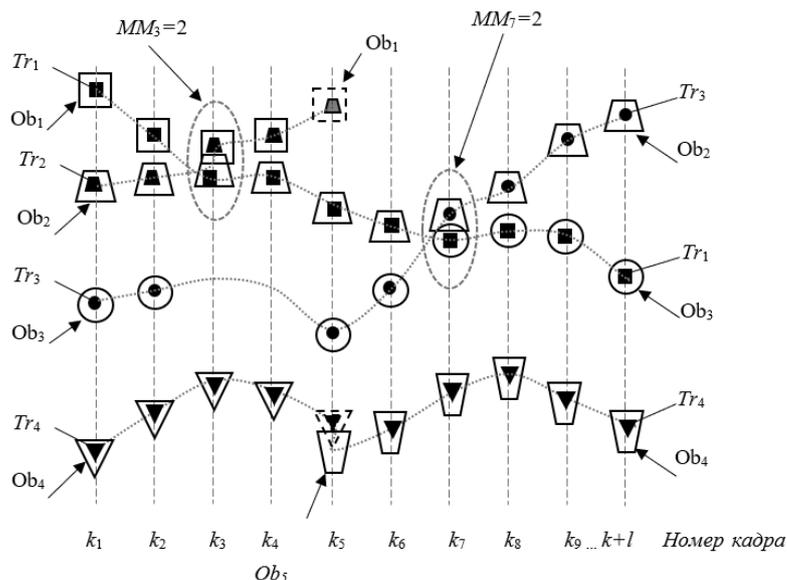


Рис. 1. Примеры ошибок при сопровождении объектов

4. *Критерий, характеризующий точность сопровождения множества объектов (multiple object tracking accuracy, MOTA).* Учитывает количество ложноположительных и ложноотрицательных результатов обнаружений, число обменов траекториями и характеризует точность сопровождения объектов во времени с учетом восстановления траектории при кратковременном отсутствии объекта:

$$MOTA = 1 - \frac{\sum_k FN_k + FP_k + MM_k}{\sum_k G_k},$$

где MM_k – количество срывов сопровождения за счет перезахвата ложного объекта при сопровождении на k -м кадре, G_k – количество объектов на k -м кадре.

Значение данного критерия должно стремиться к единице (максимально возможное), но может быть отрицательным в тех случаях, когда количество ошибок при сопровождении превышает количество всех объектов на сцене.

5. *Критерий, характеризующий быстродействие.* Скорость F_{reg} работы алгоритма сопровождения без учета детектирования объектов определяется максимально возможным числом кадров, которые могут быть обработаны за секунду.

Этапы алгоритма сопровождения через обнаружение. Для обнаружения и одновременного сопровождения людей с построением их траектории движения разработан алгоритм на основе метода «сопровождение через обнаружение». Основные этапы алгоритма показаны на рис. 2. Ключевым критерием является точность сопровождения множества объектов, которую следует максимизировать. На первом этапе выполняется задача обнаружения людей, находящихся в кадре. В последнее время наиболее часто используемым для этого инструментом являются сверточные нейронные сети (СНС). При решении данной задачи необходимо применять быстродействующую СНС, которая также должна обеспечивать высокую точность: чем точнее работает детектор, тем качественнее может быть сопровождение. Среди существующих СНС предъявляемым требованиям удовлетворяет модель YOLO [17], которая и применяется для данного шага. Выходным результатом этапа обнаружения является выделенная прямоугольная область кадра, как правило, включающая изображение человека.

Затем для выделенных областей кадра осуществляется процедура формирования признаков. Для этого предлагается составной дескриптор, включающий геометрические и СНС-признаки

всего изображения человека и верхней его части, получаемые при помощи представленной на рис. 2 архитектуры CHC FTrack, состоящей из 29 сверточных и одного полносвязного слоев. Составной дескриптор включает также индекс человека, который на последующих кадрах при правильном сопровождении не должен изменяться.

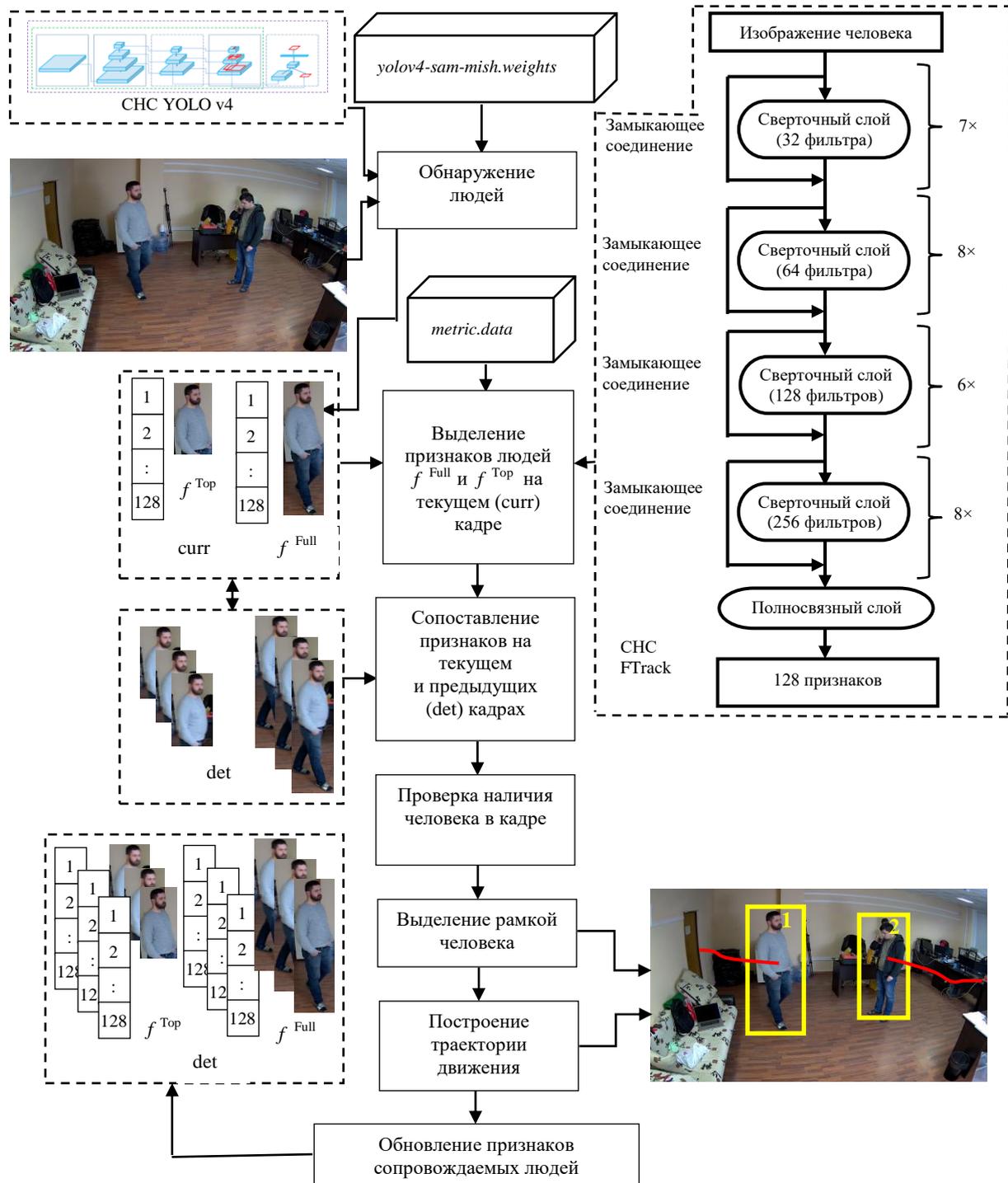


Рис. 2. Общая схема работы алгоритма, где *yolov4-sam-mish.weights* и *metric.data* – весовые коэффициенты для CHC YOLO v4 и FTrack

При движении в помещении человек может зайти за объект фона и, соответственно, признаки будут вычислены для верхней части его фигуры. Поэтому СНС-признаки вычисляются для всей и верхней половины фигуры человека, если ширина выделенного объекта меньше его высоты; в противном случае принимается решение, что полученные СНС-признаки характеризуют верхнюю часть фигуры. Далее выполняется сопоставление составных дескрипторов сопровождаемых объектов с обнаруженным детектором на текущем кадре [18].

С целью повышения результативности сопровождения сравниваются признаки для последних n верных обнаружений человека, после чего формируется матрица соответствий, которая поступает на вход венгерского алгоритма [19], применяемого для решения задачи о назначениях. Для этого осуществляется построение матрицы весовых коэффициентов. Ее элементами являются значения схожести между дескрипторами всех обнаруженных объектов на текущем кадре, количество которых определяет число столбцов, и сопровождаемых объектов с предыдущих кадров, количество которых определяет число строк. Венгерский алгоритм вычитает максимальное значение схожести из каждого элемента матрицы коэффициентов так, чтобы преобразовать ее в матрицу оптимальных назначений, в каждой строке и каждом столбце которой содержится только по одному нулю. Координаты нулей устанавливают соответствие объектов на кадрах. Эффективное решение данного этапа позволяет корректно соотносить обнаруженные объекты на текущем кадре и сопровождаемые объекты с предыдущих кадров, а также формировать правильные траектории движения для каждого из них.

Визуализация фрагмента траектории выполняется на основе вычисления кратчайшего расстояния между координатами обнаруженного объекта $x_{Ob_q}^{F_k}, y_{Ob_q}^{F_k}$ на текущем кадре и его координатами $x_{Ob_q}^{F_{k-1}}, y_{Ob_q}^{F_{k-1}}$ на кадре $(k - l)$ при последнем правильном обнаружении:

$$tr_k = \sqrt{(x_{Ob_q}^{F_k} - x_{Ob_q}^{F_{k-1}})^2 + (y_{Ob_q}^{F_k} - y_{Ob_q}^{F_{k-1}})^2}. \quad (1)$$

При обнаружении объекта на предыдущем кадре $l = 1$. Применение выражения (1) для каждого кадра, начиная с последующего после обнаружения объекта, позволяет получить и визуализировать всю траекторию его движения на сцене.

В случае если детектор не обнаруживает человека, для подтверждения его выхода со сцены используется анализ признаков цветowych гистограмм областей человека на кадрах. Для уменьшения влияния изменения освещенности цветовой пространство изображения преобразовывается из RGB в HSV, далее для оценки схожести используются только данные цветовой тона по условию из работы [18]. Человек считается вышедшим со сцены и его сопровождение прекращается, если значение схожести гистограммных признаков цветовой тона, вычисленное для изображений данного человека на текущем кадре и при последнем правильном его обнаружении, меньше заданного.

Результаты исследований. Для разметки видеопоследовательностей использовался инструмент `labelImg`, который предоставляет возможность выбора двух форматов разметки: `Yolo` и `PascalVOC`. В связи с тем что `labelImg` поддерживает только формат для детектирования

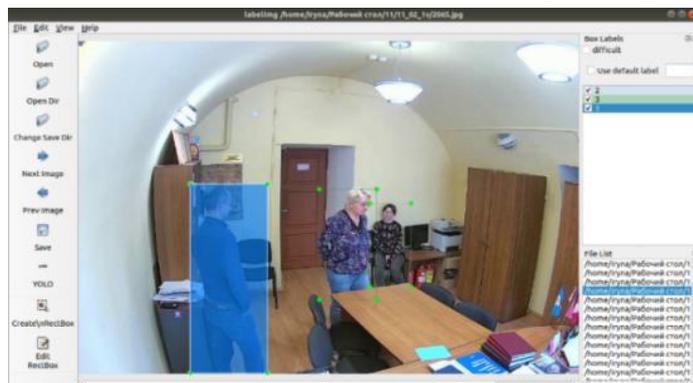


Рис. 3. Пример аннотирования видеокadra инструментом `labelImg`

объектов, видеопоследовательность разбивается на отдельные кадры. После этого на них выделяются объекты, а в качестве классов объектов используются индексы, соответствующие появлению людей на видеоряде. Затем следует объединение полученных текстовых файлов для оценки алгоритма отслеживания. На рис. 3 показан пример аннотирования кадра тестовой видеопоследовательности.

Тестирование выполнено на шести видеопоследовательностях (рис. 4) с суммарным количеством кадров 11 890, которые были получены со стационарной видекамеры в помещениях с различным освещением, нелинейной траекторией движения, полным и частичным перекрытием людей, с очень схожими внешними характеристиками, выходом людей из помещения с последующим их возвращением в кадр.

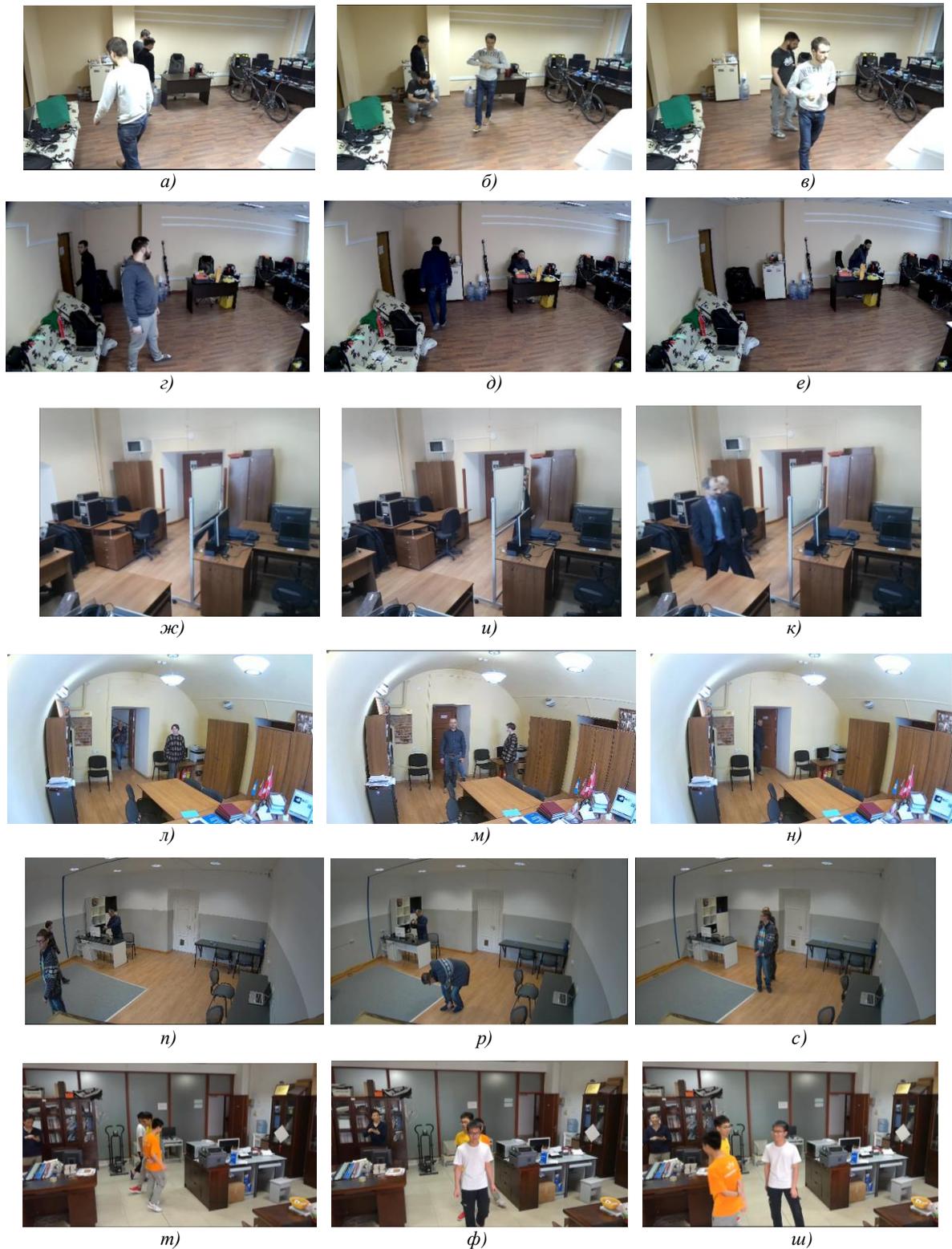


Рис. 4. Примеры кадров видеопоследовательностей

Первая тестовая видеопоследовательность (рис. 4, *a–в*) включает 2320 кадров с неравномерностью освещения и наличием теней. Влияние неравномерности освещения очевидно, если сравнить уровни яркости верхней половины фигуры человека в белом свитере на представленных изображениях из видеоряда. В кадре количество людей изменяется от одного до трех. При этом двое из них имеют очень схожие внешние характеристики: одежда практически идентична по цветовым характеристикам; рост, телосложение и цвет волос также подобны. На рис. 4, *a* и *в* видно, что два человека с наиболее схожей внешностью на многих кадрах перемещаются по сцене, перекрывая друг друга, причем на рис. 4, *в* показан пример практически полного их перекрытия в движении. На одном из кадров данной видеопоследовательности (рис. 4, *б*) человек изменил свое положение – присел.

На рис. 4, *г–е* показаны кадры второго видеоряда из 1350 изображений, который получен в том же помещении. Во время съемки на сцене присутствовали два человека, признаки изображений которых достаточно схожи. Данный видеоряд отличается более низким уровнем освещения и неоднородностью. Соответственно, когда один человек переходит в зону очень слабого освещения по направлению к двери (рис. 4, *г*) или другой человек – из ближней зоны съемки в дальнюю (рис. 4, *д*), цветовые характеристики их изображений значительно изменяются. Кроме того, на рис. 4, *д* большая часть фигуры человека скрыта объемом фона (столом). На данной видеопоследовательности достаточно четко видны тени движущихся людей, например, на стене в углу возле двери (рис. 4, *д*) и в момент выхода человека из-за стола (рис. 4, *е*). Также спинка стула на рис. 4, *е* по своим внешним признакам схожа с сидящим человеком, что является существенным шумовым фактором.

Видеокادر, представленный на рис. 4, *ж*, свидетельствует о том, что на третьем тестовом видеоряде (рис. 4, *ж–к*) люди передвигаются по помещению, скрываясь практически полностью за объектами фона (на данном кадре – за доской) и значительно удаляясь от видеокамеры. Тестовый видеоряд состоит из 1280 кадров. Неравномерность освещения также приводит к наличию теней на видеоизображениях. Объекты фона, стулья и куртка на спинке стула являются шумовыми факторами, так как их изображения могут быть ошибочно приняты за изображения людей в черной одежде, т. е. их цветовые характеристики схожи с объектами фона. Пример сложной ситуации показан на рис. 4, *и*, когда человек выходит из-за доски, но при этом вначале появляется его тень, которая достаточно хорошо видна на шкафу и может быть ошибочно определена детектором как человек. Из рис. 4, *к* видно, что на видеоряде траектории движения людей пересекаются и их изображения недостаточно четкие. В данный момент это является дополнительным шумом.

Четвертая видеопоследовательность (рис. 4, *л–н*) состоит из 3450 кадров, на которых присутствуют от одного до трех человек. Шумовыми факторами на кадрах являются: тени фигур людей на стене (рис. 4, *л, м*); пересечение траекторий движущихся людей с полным скрытием одного человека за другим (рис. 4, *м*); ситуация, когда при движении нижняя половина фигуры человека часто скрывается объектом фона, столом; множественные входы в помещение и выходы из него людей в разной их очередности (например, рис. 4, *л, н*). Вместе с тем изображения людей на данной видеопоследовательности имеют хорошее качество.

Примеры кадров пятого тестового видеоряда, который получен при более низком уровне освещения сцены и состоит из 1850 кадров, показаны на рис. 4, *п–с*. На сцене присутствуют в основном три человека, несколько людей выходят из кадра и затем возвращаются, человек совершает наклоны (рис. 4, *р*). Движения людей происходят по сложным траекториям со значительным удалением от видеокамеры и множественными перекрытиями, пример перекрытия изображений двух человек показан на рис. 4, *п*, а пример кадра, на котором два человека практически полностью скрыты третьим, приведен на рис. 4, *с*.

Шестая видеопоследовательность включает 1640 кадров (рис. 4, *т–ш*) и отличается недостаточной четкостью изображений людей, постоянным их движением по нелинейным траекториям с резкими изменениями направлений, а также множественными пересечениями. На многих кадрах присутствуют четыре человека, однако изображения только трех из них были размечены для тестирования.

На рис. 5 показаны примеры обнаружения и сопровождения людей на кадрах видеопоследовательности, которая не использовалась для сравнения алгоритмов. На рис. 5, б человек 4 (рис. 5, а) не обнаруживается детектором и его визуальные признаки в это время существенно изменяются за счет того, что он надевает куртку, поэтому на данном кадре сопровождение для него не выполняется. Однако, как видно на рис. 5, в, в дальнейшем сопровождение человека 4 восстанавливается с искомым индексом. В течение практически полного перекрытия двух изображений людей 3 и 4 (рис. 5, г) детектор обнаруживает только одного человека. Так как признаки данных людей на последних кадрах перед их перекрытием вычисляются не для всей фигуры, а только для ее верхних видимых частей, которые схожи, это приводит к обмену индексами. Анализ кадров на рис. 5, д, е показывает, что при кратковременном перекрытии видеоизображений двух движущихся людей (рис. 5, д) со схожими визуальными признаками их индексация не изменяется, т. е. сопровождение выполняется правильно (рис. 5, е).

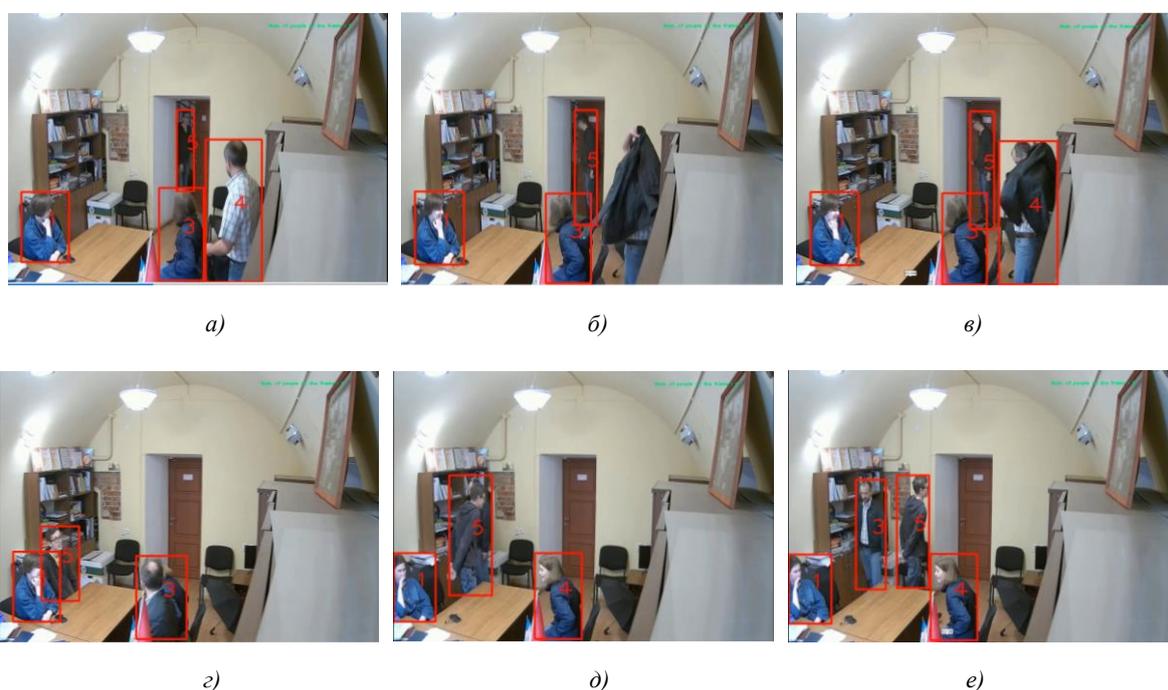


Рис. 5. Примеры сопровождения людей на видеопоследовательности

В таблице представлены результаты экспериментов по оценке результативности сопровождения людей с использованием рассмотренных критериев, лучшие по каждой группе результаты выделены жирным шрифтом. Были реализованы две модификации разработанного алгоритма, отличающиеся архитектурами СНС, которые используются для обнаружения людей. Модификация 1 применяет СНС YOLO v3, модификация 2 – СНС YOLO v4. Данные СНС характеризуются различной точностью детектирования объектов, сравнение их представлено в работе [17]. Для всех алгоритмов критерий ML равен нулю.

Результаты экспериментов по оценке эффективности алгоритмов сопровождения

Алгоритмы	Критерии										
	IDF_1	$MOTP$	PRC	RCL	FP	FN	FM	MT	PL	MM	$MOTA$
DS_v2 [20]	0,545	0,819	0,0153	0,8914	135	1759	215	14	3	61	0,8793
Модификация 1	0,833	0,824	0,0286	0,9408	252	959	195	16	1	21	0,9237
Модификация 2	0,807	0,829	0,0448	0,9535	395	754	194	15	2	39	0,9266

Анализ данных таблицы показывает, что поставленная задача повышения точности сопровождения множества объектов выполнена, так как для двух модификаций предложенного алгоритма критерий $MOTA$ выше по сравнению с подходом из работы [20]. Кроме того, со-

гласно полученным результатам повышение результативности обнаружения позволяет улучшить $MOTA$, так как при использовании для обнаружения людей СНС YOLO v3 $MOTA = 0,9237$, а при СНС YOLO v4 $MOTA = 0,9266$.

Пример применения разработанного алгоритма для видеонаблюдения вне помещений показан на рис. 6. На рис. 6, а представлен 23-й кадр видеоряда, полученный видеосистемой охраны периметра здания, на котором в правом нижнем углу обнаружен и выделен рамкой входящий в зону контроля человек. На рис. 6, б показан 346-й кадр видеоряда данной видеопоследовательности с отображением всей траектории движения сопровождаемого человека по направлению ко входу в арку здания. Визуализация траектории выполняется на основе последовательности его положений на кадрах, определяемых координатами центра рамки в течение заданного времени. Анализ рис. 6, в позволяет идентифицировать на кадрах перемещения каждого из трех человек на контролируемой сцене по их траекториям: вышедший из арки человек 2, пройдя вправо за опору уличного освещения, пошел вглубь сцены, отдаляясь от видеокамеры; человек 3 вошел в кадр в правой нижней его части и двигался по направлению к арке ближе к стене здания по сравнению с траекторией человека, который первым появился на динамической сцене (рис. 6, б); человек 4 пошел из арки в правую сторону кадра. На рис. 6, г показана траектория человека 2, которая свидетельствует о том, что он сменил направление движения после 828-го кадра по направлению к видеокамере и вышел со сцены в правом нижнем углу кадра. Таким образом, анализ траектории на кадре рис. 6, г показывает, как передвигался человек 2 с момента его появления на контролируемой сцене до выхода из нее.

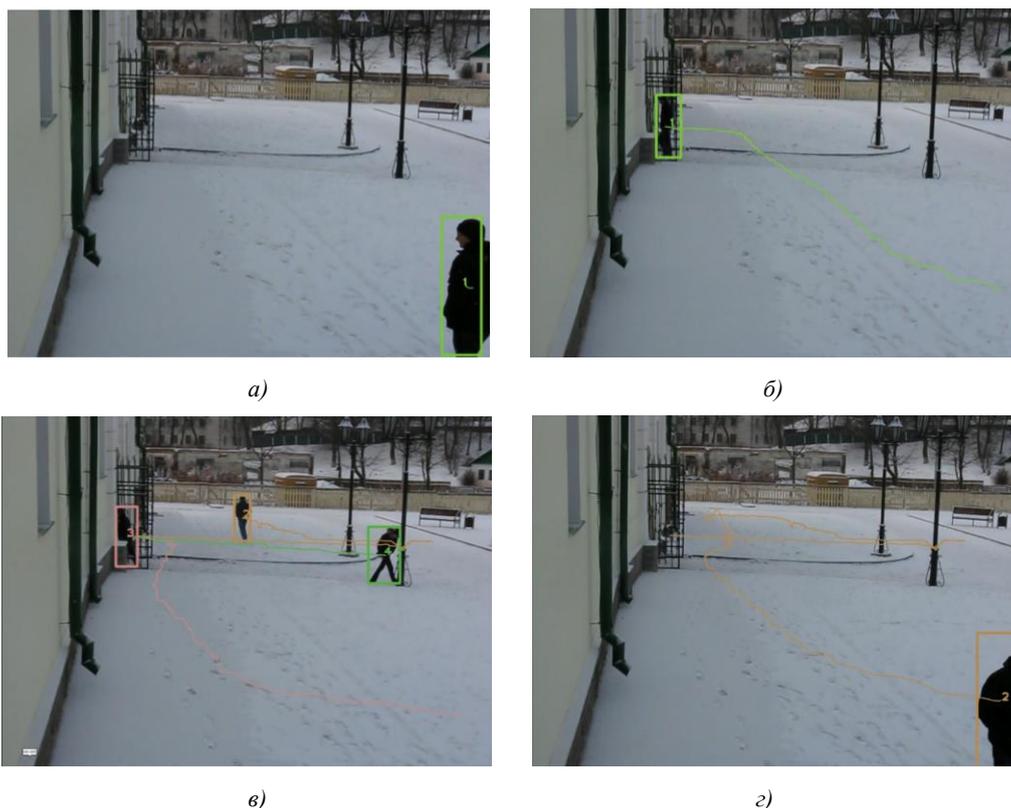


Рис. 6. Отображение траекторий движения людей на кадрах видеопоследовательности:
 а) на 23-м кадре; б) на 346-м кадре; в) на 828-м кадре; г) на 1755-м кадре

Заключение. В работе представлена формализация задачи обнаружения стационарных и движущихся объектов на видеопоследовательностях с учетом их особенностей. Рассмотрены и описаны два типа сопровождения: одного и множества объектов на видеопоследовательностях. Представлены критерии, которые могут быть использованы для оценки качества обнаружения сопровождаемых объектов, точности определения местоположения объекта на кадре,

результативности построения траектории движения, точности сопровождения множества объектов. Рассмотрены основные ошибки, возникающие при сопровождении множества объектов. На основе представленной формализации решения задач обнаружения и сопровождения разработан и приведен в статье алгоритм сопровождения людей. Данный алгоритм использует СНС для детектирования людей и формирования их признаков. Комплексный дескриптор описания обнаруженного изображения человека в кадре включает нейросетевые, геометрические и цветовые признаки. На основе рассмотренных критериев реализованы и исследованы две модификации представленного алгоритма, отличающиеся архитектурами СНС, которые применяются для обнаружения людей. Результаты экспериментов подтвердили, что повышение результативности обнаружения позволяет улучшить и качество сопровождения. Точность сопровождения множества объектов при использовании для обнаружения YOLO v3 оценивается величиной 0,9237, при применении СНС YOLO v4 – величиной 0,9266. Приведены примеры обнаружения и сопровождения людей на кадрах видеопоследовательности при существенном изменении их признаков и полном перекрытии, а также примеры визуализации траекторий движения.

Список использованных источников

1. Maggio, E. Video Tracking: Theory and Practice / A. Cavallaro, E. Maggio. – Wiley, 2011. – 295 p.
2. Datta, A. K. Face Detection and Recognition: Theory and Practice / A. K. Datta, M. Datta, P. K. Banerjee. – CRC Press, 2016. – 350 p.
3. Купляков, Д. А. Алгоритм сопровождения людей в видео на основе метода Монте-Карло для Марковских цепей / Д. А. Купляков, Е. В. Шальнов, А. С. Конушин // Программирование. – 2017. – № 4. – С. 13–21. <https://doi.org/10.1134/s0361768817040053>
4. Кирпичников, А. П. Обнаружение и сопровождение людей в интеллектуальных детекторах внештатных ситуаций / А. П. Кирпичников, С. А. Ляшева, М. П. Шлеймович // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – С. 351–356.
5. Ravish Aradhya, H. V. Object detection and tracking using deep learning and artificial intelligence for video surveillance applications / H. V. Ravish Aradhya // Intern. J. of Advanced Computer Science and Applications. – 2019. – Vol. 10, no. 12. – P. 517–530. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0101269>
6. Mane, S. Moving object detection and tracking using convolutional neural networks / S. Mane, S. Mangale // Second Intern. Conf. on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). – Madurai, India, 2018. – P. 1809–1813. <https://doi.org/10.1109/ICCONS.2018.8662921>
7. Motion detection and tracking algorithms in video streams / R. Bogush [et al.] // VNU J. of Science, Mathematics – Physics. – 2009. – Vol. 25, no. 3. – P. 143–151.
8. Богуш, Р. П. Алгоритм сопровождения людей на видеопоследовательности с использованием идентификации по лицам для наблюдения внутри помещений / Р. П. Богуш, И. Ю. Захарова, С. В. Абламейко // Вестник информационных и компьютерных технологий. – 2020. – № 7. – С. 3–14. <https://doi.org/10.14489/vkit.2020.07>
9. An effective algorithm to detect both smoke and flame using color and wavelet analysis / S. Ye. [et al.] // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2017. – Vol. 27, no. 1. – P. 131–138. <https://doi.org/10.1134/S1054661817010138>
10. Залесский, Б. А. Отслеживание динамических объектов и их распознавание с помощью графовых алгоритмов / Б. А. Залесский, А. И. Кравчонок // Информатика. – 2006. – № 2(10). – С. 7–26.
11. Залесский, Б. А. Алгоритм отслеживания объектов движущейся видеокамерой / Б. А. Залесский // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 2. – С. 144–149. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-144-149>
12. Агафонов, В. Ю. Использование фильтра Калмана в задачах трекинга объектов / В. Ю. Агафонов, В. Л. Розалиев, А. В. Заболеева-Зотова // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. – 2016. – Т. 20, № 4. – С. 13–17.
13. Gustafsson, F. Particle filters for positioning, navigation and tracking / F. Gustafsson, F. Gunnarsson, N. Bergman // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2002. – Vol. 50(2). – P. 425–437. <https://doi.org/10.1109/78.978396>
14. Performance measures and a data set for multi-target, multi-camera tracking / E. Ristani [et al.] // Computer Vision ECCV 2016 Workshops. Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9914. – P. 17–35.
15. MOTChallenge: A benchmark for single-camera multiple target tracking [Electronic resource] / P. Dendorfer [et al.] // Intern. J. of Computer Vision. – 2020. – Mode of access: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11263-020-01393-0>. – Date of access: 12.06.2020. <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01393-0>

16. Метрики оценки алгоритмов автоматического сопровождения / А. Е. Щелкунов [и др.] // Известия ЮФУ. Техн. науки. – 2020. – № 1(211). – С. 233–245.
17. Bochkovskiy, A. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection [Electronic resource] / A. Bochkovskiy, Ch.-Y. Wang, H.-Y. M. Liao. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>. – Date of access: 12.06.2020.
18. Богуш, Р. П. Алгоритм сопровождения людей на видеопоследовательностях с использованием сверточных нейронных сетей для видеонаблюдения внутри помещений / Р. П. Богуш, И. Ю. Захарова // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 1. – С. 109–116. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-565>
19. Kuhn, H. W. The Hungarian method for the assignment problem / H. W. Kuhn // *Naval Research Logistics Quarterly*. – 1955. – No. 2. – P. 83–97.
20. Wojke, N. Simple online and realtime tracking with a deep association metric / N. Wojke, A. Bewley, D. Paulus // *Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Image Processing (ICIP)*. – Beijing, China, 2017. – P. 3645–3649. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2017.8296962>

References

1. Maggio E., Cavallaro A. *Video Tracking: Theory and Practice*. Wiley, 2011, 295 p.
2. Datta A. K., Datta M., Banerjee P. K. *Face Detection and Recognition: Theory and Practice*. CRC Press, 2016, 350 p.
3. Kuplyakov D. A., Shalnov E. V., Konushin A. S. Algoritm soprovozhdenija ljudej v video na osnove metoda Monte-Karlo dlja Markovskih cepej [Markov chain Monte Carlo based video tracking algorithm]. *Programirovanie [Programming and Computer Software]*, 2017, no. 4, pp. 13–21 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/s0361768817040053>
4. Kirpichnikov A. P., Lyasheva S. A., Shleymovich M. P. Obnaruzhenie i soprovozhdenie ljudej v intellektual'nyh detektorah vneshtatnyh situacij [Detection and tracking of people in intelligent detectors of emergency situations]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta [Kazan Technological University Bulletin]*, 2014, vol. 17, pp. 351–356 (in Russian).
5. Ravish Aradhya H. V. Object detection and tracking using deep learning and artificial intelligence for video surveillance applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2019, vol. 10, no. 12, pp. 517–530. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0101269>
6. Mane S., Mangale S. Moving object detection and tracking using convolutional neural networks. *Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*. Madurai, India, 2018, pp. 1809–1813. <https://doi.org/10.1109/ICCONS.2018.8662921>
7. Bogush R., Maltsev S., Kastyuk A., Brovko N., Gluhau D. Motion detection and tracking algorithms in video streams. *VNU Journal of Science, Mathematics – Physics*, 2009, vol. 25, no. 3, pp. 143–151.
8. Bogush R. P., Zakharova I. Yu., Ablameyko S. V. Algoritm soprovozhdenija ljudej na videoposledovatel'nosti s ispol'zovaniem identifikacii po licam dlja nabljudenija vnutri pomeshhenij [Algorithm for person tracking on video sequences using face identification for indoor surveillance]. *Vestnik informacionnyh i komp'yuternyh tehnologij [Herald of Computer and Information Technologies]*, 2020, no. 7, pp. 3–14 (in Russian). <https://doi.org/10.14489/vkit.2020.07>
9. Ye S., Zhican B., Chen C., Bohush R., Ablameyko S. An effective algorithm to detect both smoke and flame using color and wavelet analysis. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2017, vol. 27, no. 1, pp. 131–138. <https://doi.org/10.1134/S1054661817010138>
10. Zalesky B. A., Kravchonok A. I. Otslezhivanie dinamicheskikh objektov i ih raspoznavanie s pomoshh'ju grafovyh algoritmov [Tracking dynamical objects and their recognition by graph algorithms]. *Informatika [Informatics]*, 2006, no. 2(10), p. 7–26 (in Russian).
11. Zalesky B. A. Algoritm otslezhivaniya objektov dvizhushhejsja videokameroy [Object tracking algorithm by moving video camera]. *Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus]*, 2020, vol. 64, no. 2, pp. 144–149 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-144-149>
12. Agafonov V. Yu., Rozaliev V. L., Zaboleeva-Zotova A. V. Ispol'zovanie fil'tra Kalmana v zadachah trekinga objektov [Using the Kalman filter in object tracking tasks. Intelligent systems]. *Intellektual'nye sistemy. Teoriya i prilozhenija [Theory and Applications]*, 2016, vol. 20, no. 4, pp. 13–17 (in Russian).
13. Gustafsson F., Gunnarsson F., Bergman N. Particle filters for positioning, navigation and tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, vol. 50(2), pp. 425–437. <https://doi.org/10.1109/78.978396>
14. Ristani E., Solera F., Zou R., Cucchiara R., Tomasi C. Performance measures and a data set for multi-target, multi-camera tracking. *Computer Vision ECCV 2016 Workshops. Lecture Notes in Computer Science*, 2016, vol. 9914, pp. 17–35.

15. Dendorfer P., Ošep A., Milan A., Schindler K., Cremers D., ..., Leal-Taixé L. MOTChallenge: A benchmark for single-camera multiple target tracking. *International Journal of Computer Vision*, 2020. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11263-020-01393-0> (accessed 12.06.2020). <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01393-0>
16. Shchelkunov A. E., Kovalev V. V., Morev K. I., Sidko I. V. Metriki ocenki algoritmov avtomaticheskogo soprovozhdenija [The metrics for tracking algorithms evaluation]. *Izvestija Juzhnogo federal'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki [News of the Southern Federal University. Engineering Sciences]*, 2020, no. 1(211), pp. 233–245 (in Russian).
17. Bochkovskiy A., Wang Ch.-Y., Liao H.-Y. M. *YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2004.10934> (accessed 12.06.2020).
18. Bohush R. P., Zakharava I. Y. Algoritm soprovozhdenija ljudej na videoposledovatel'nostjah s ispol'zovaniem svetochnyh nejronnyh setej dlja videonabljudenija vnutri pomeshhenij [Person tracking algorithm based on convolutional neural network for indoor video surveillance]. *Komp'yuternaja optika [Computer Optics]*, 2020, vol. 44, no. 1, pp. 109–116 (in Russian). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-565>
19. Kuhn H. W. The Hungarian method for the assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1955, no. 2, pp. 83–97.
20. Wojke N., Bewley A., Paulus D., Wojke N. Simple online and realtime tracking with a deep association metric. *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Beijing, China, 2017, pp. 3645–3649. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2017.8296962>

Информация об авторах

Богуш Рихард Петрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей, Полоцкий государственный университет.

E-mail: bogushr@mail.ru

Абламейко Сергей Владимирович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси; профессор механико-математического факультета, Белорусский государственный университет.

E-mail: ablameyko@bsu.by

Information about the authors

Rykhard P. Bohush, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Computer Systems and Networks, Polotsk State University.

E-mail: bogushr@mail.ru

Sergey V. Ablameyko, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus; Professor of the Faculty of Mechanics and Mathematics, Belarusian State University.

E-mail: ablameyko@bsu.by



УДК 004.93
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-61-71>

Оригинальная статья
Original Paper

Об оценке результатов классификации несбалансированных данных по матрице ошибок

В. В. Старовойтов[✉], Ю. И. Голуб

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь
✉E-mail: valerys@newman.bas-net.by*

Аннотация. При применении классификаторов в реальных приложениях часто число элементов одного класса больше числа элементов другого, т. е. имеет место дисбаланс данных. В статье исследуются оценки результатов классификации данных такого типа. Рассматривается, какой из переводов термина confusion matrix более точен, как предпочтительнее представлять данные в такой матрице и какими функциями лучше оценивать результаты классификации по ней.

На реальных данных демонстрируется, что с помощью популярной функции точности ассигасу не всегда корректно оцениваются ошибки классификации несбалансированных данных. Нельзя также сравнивать значения функции ассигасу, вычисленные по матрицам с абсолютными количественными и нормализованными по классам результатами классификации. При дисбалансе данных точность, вычисленная по матрице ошибок с нормализованными значениями, как правило, будет иметь меньшие значения, поскольку она определяется по иной формуле. Такой же вывод сделан относительно большинства функций, используемых в литературе для нахождения оценок результатов классификации.

Показывается, что для представления матриц ошибок лучше использовать абсолютные значения распределения объектов по классам вместо относительных, так как они описывают количество протестированных данных каждого класса и их дисбаланс.

При построении классификаторов рекомендуется оценивать ошибки функциями, не зависящими от дисбаланса данных, что позволяет надеяться на получение более корректных результатов классификации реальных данных.

Ключевые слова: классификация объектов, несбалансированные данные, матрица ошибок, функции точности классификации, парадокс точности, нейронная сеть, диагностика заболеваний

Благодарности. Работа частично выполнена в рамках проекта БРФФИ Ф20РА-014.

Для цитирования. Старовойтов, В. В. Об оценке результатов классификации несбалансированных данных по матрице ошибок / В. В. Старовойтов, Ю. И. Голуб // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 61–71. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-61-71>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 27.12.2020
Подписана в печать | Accepted 04.01.2021
Опубликована | Published 26.03.2021

About the confusion-matrix-based assessment of the results of imbalanced data classification

Valery V. Starovoitov[✉], Yuliya I. Golub

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*
[✉]E-mail: valerys@newman.bas-net.by

Abstract. When applying classifiers in real applications, the data imbalance often occurs when the number of elements of one class is greater than another. The article examines the estimates of the classification results for this type of data. The paper provides answers to three questions: which term is a more accurate translation of the phrase "confusion matrix", how preferable to represent data in this matrix, and what functions to be better used to evaluate the results of classification by such a matrix.

The paper demonstrates on real data that the popular accuracy function cannot correctly estimate the classification errors for imbalanced data. It is also impossible to compare the values of this function, calculated by matrices with absolute quantitative results of classification and normalized by classes. If the data is imbalanced, the accuracy calculated from the confusion matrix with normalized values will usually have lower values, since it is calculated by a different formula. The same conclusion is made for most of the classification accuracy functions used in the literature for estimation of classification results.

It is shown that to represent confusion matrices it is better to use absolute values of object distribution by classes instead of relative ones, since they give an idea of the amount of data tested for each class and their imbalance.

When constructing classifiers, it is recommended to evaluate errors by functions that do not depend on the data imbalance, that allows to hope for more correct classification results for real data.

Keywords: classification, imbalanced data, confusion matrix, classification accuracy functions, accuracy paradox, neural network, disease diagnosis

Acknowledgements. This work was partially performed within the framework of the BRFFR project F20RA-014.

For citation. Starovoitov V. V., Golub Yu. I. About the confusion-matrix-based assessment of the results of imbalanced data classification. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 61–71 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-61-71>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Классификация – это процедура разделения некоторого множества объектов на заранее определенные классы. Так, скрининг в здравоохранении представляет собой обследование группы клинически бессимптомных лиц с целью выявления случаев некоторого заболевания, т. е. разделения людей на здоровых и больных. Флюорография служит для выявления скрыто протекающих заболеваний легких и является примером бинарной классификации. При диагностике многих заболеваний определяют их стадии по ряду признаков. Можно выполнить разделение группы пациентов с выявленным заболеванием на классы согласно стадии заболевания по образцу многоклассовой классификации. Пропорции классов неизвестны, но, как правило, имеют разные размеры. Этим и определяется дисбаланс данных [1].

Результаты деления некоторого множества данных на N классов часто описываются в виде квадратной матрицы $C = [c_{ij}]$, $i, j \in [1, 2, \dots, N]$, где i – номер строки, j – номер столбца, N – число предварительно определенных классов. По строкам обычно записываются результаты, определенные экспертами и называемые истинными, по столбцам – предсказанные классификаторами. Тогда c_{ij} есть число объектов i -го класса, отнесенных к j -му классу. Количество объектов m -го класса определено экспертами и равно $n_m = \sum_{j=1}^N c_{mj}$. Коэффициент дисбаланса классов данных (отношение числа объектов большего класса i к числу объектов меньшего класса k) определяется выражением $IR = \max_{m,k} (n_m/n_k)$ [1].

В англоязычной литературе матрицу, подобную $C = [c_{ij}]$, называют confusion matrix. Одно из первых упоминаний такой матрицы при описании результатов классификации приведено

в статье [2]. Известны разные трактовки данного выражения в русскоязычной литературе (табл. 1). На взгляд авторов, более точным и распространенным вариантом перевода является словосочетание «матрица ошибок».

Таблица 1
 Частота использования вариантов перевода термина confusion matrix

Термин	Число ссылок при поиске в google.com	Число ссылок на сайте scholar.google.com
Confusion matrix	1 350 000	121 000
Matrix error	111 000	6270
Матрица ошибок	508 000	8130
Матрица неточностей	1580	105
Матрица путаницы	1720	9

Чтобы представить данные в матрице ошибок для последующей оценки результатов классификации, обычно используются два варианта значений: абсолютные количественные и нормализованные по классам. В первом варианте элементы матрицы ошибок – это числа объектов, отнесенных к каждому классу. Во втором варианте сначала формируется матрица абсолютных значений, затем она нормализуется путем деления каждого элемента матрицы на сумму элементов строки, в которой он находится, т. е. на число элементов класса согласно экспертным оценкам. После этого сумма элементов каждой строки матрицы ошибок становится равной единице.

Для определения лучшего способа оценки результатов классификации несбалансированных данных, представленных матрицей ошибок, оценим на примерах инвариантность оценок результатов классификации, вычисленных по обоим вариантам представления матриц ошибок.

Одной из самых популярных функций оценок результатов классификации является функция точности ассигасу, которая вычисляется по данным матрицы ошибок. При использовании этой функции часто возникают некорректные заключения о качестве работы классификатора, когда не учитывается представление данных в матрице (абсолютное или нормализованное). Кроме того, ассигасу часто используется в процессе обучения искусственных нейронных сетей разных типов, а некорректные оценки результатов классификации могут привести к выбору не самого лучшего варианта классификатора.

В табл. 2 приведены основные формулы оценки результатов многоклассовой классификации, используемые в статье.

Таблица 2

Основные функции оценок многоклассовой классификации

Обозначение	Математическое выражение
ACC – функция точности ассигасу	$ACC = \frac{1}{N} (c_{11} + c_{22} + \dots + c_{NN})$
ACCBal – сбалансированная по классам функция точности [3]	$ACCBal = \frac{1}{N} \left(\frac{c_{11}}{n_1} + \frac{c_{22}}{n_2} + \dots + \frac{c_{NN}}{n_N} \right)$
SinACC – сбалансированная по классам функция точности на базе синусов [4]	$SinACC = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sqrt{\sum_{j \neq i}^N c_{ij}^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N c_{ij}^2}}$
AU1U – среднее сумм функций чувствительности и специфичности, вычисленных для всех вариантов бинарных матриц $[c_{ii}, c_{ki}, c_{kk}, c_{ik}]$, построенных из матрицы ошибок C [5]	$AU1U = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k>i}^N \left(\frac{c_{ii}}{c_{ii} + c_{ki}} + \frac{c_{kk}}{c_{kk} + c_{ik}} \right)$

Далее в табл. 3 и 4 используются следующие наименования оценочных функций, формулы которых можно найти в работах [5–7]:

Каппа – каппа-функция Коэна;

AveragePrecision – среднее арифметическое функций Precision, вычисленных для отдельных классов;

GeomMeanPrecision – среднее геометрическое функций Precision, вычисленных для отдельных классов;

GeomMeanSensitivity – среднее геометрическое функций Sensitivity, вычисленных для отдельных классов;

CosineCoef – косинусный коэффициент;

VM – среднее геометрическое функций Sensitivity и Precision, вычисленных для отдельных классов;

Fmicro – среднее арифметическое гармонических средних Sensitivity и Precision для отдельных классов;

Fmacro – гармоническое среднее Sensitivity и Precision для отдельных классов;

Jmacro – среднее арифметическое индексов Юдена для отдельных классов;

sInd – среднее арифметическое индексов сходства в ROC-пространстве на базе специфичности и чувствительности отдельных классов;

normMCC – нормализованный коэффициент Коэна с диапазоном значений [0, 1];

AUNU – средняя площадь под ROC-кривыми N бинарных матриц ошибок, построенных по принципу «один против всех» из матрицы C [6];

AUNP – то же с учетом весов, пропорциональных числу элементов каждого класса к сумме всех данных.

Если классификация бинарная ($N = 2$), то $AU1U = ACCBal$ по определению. Кроме того, $AU1U = AUNU = AUNP$, а для нормализованных матриц ошибок все эти функции совпадают с ACC.

Анализ оценок результатов классификации заболеваний кожи. В работе [8] исследована задача классификации семи классов заболеваний кожи с помощью глубокой сверточной нейронной сети. Экспериментировали на наборе данных, который использовался при проведении международного конкурса компьютерных алгоритмов ISIC-2018 Challenge. В нем собраны цветные цифровые изображения пораженных участков кожи по семи приведенным ниже классам заболеваний:

1. *Actinic keratoses*. Актинический кератоз и интраэпителиальная карцинома, распространенные неинвазивные варианты плоскоклеточного рака, которые можно лечить без хирургического вмешательства.

2. *Basal cell carcinoma*. Базально-клеточная карцинома – распространенный вариант эпителиального рака кожи, который редко метастазирует, но при отсутствии лечения разрастается.

3. *Benign keratosis*. Доброкачественный кератоз, себорейный кератоз, солнечный лентиго и лишайник плоскоклеточный как кератоз.

4. *Dermatofibroma*. Дерматофиброма – доброкачественное поражение кожи как воспалительная реакция на травму.

5. *Melanocytic nevi*. Меланоцитарные невусы – доброкачественные новообразования меланоцитов.

6. *Melanoma*. Меланома – смертельная форма рака кожи, которая на ранней стадии часто не диагностируется или ошибочно диагностируется как доброкачественное поражение кожи.

7. *Vascular lesions*. Сосудистые поражения кожи.

Раннее и точное выявление меланомы крайне важно, поскольку от этого зависит жизнь пациентов. На рис. 1, *a* показана матрица ошибок C из статьи [8], где в шестом классе описаны результаты определения меланомы: в шестом столбце – экспертами, в шестой строке – нейронной сетью. Отметим, что во всех матрицах ошибок, представленных в настоящей статье, истинные результаты классификации записаны в столбцах.

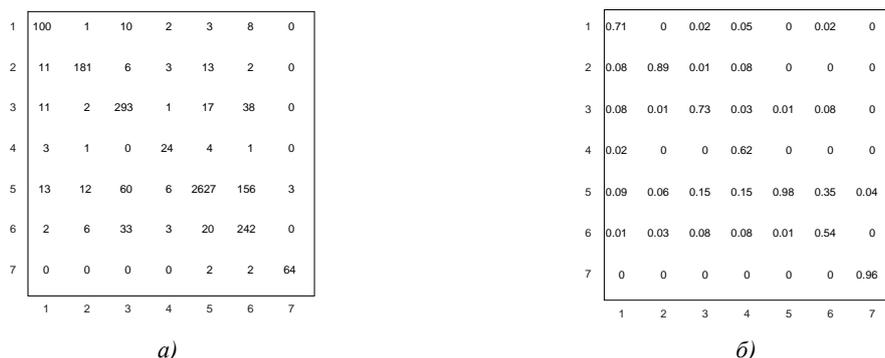


Рис. 1. Примеры представления матрицы ошибок: а) абсолютные значения; б) нормализованные (округленные до сотых) значения

Показатель точности (ассигасу, АСС) для данной матрицы ошибок составляет $АСС = 0,8864$, или 88,64 %, а для ее нормализованного варианта (рис. 1, б) $АСС = 0,77465$, или 77,465 %. Разные оценки точности получились потому, что тестируемые данные не сбалансированы по классам, а функция АСС этого не учитывает. Самым большим классом в исходной матрице является пятый, самым маленьким – четвертый, коэффициент дисбаланса $IR = 68,87$. Для более объективной оценки точности классификации следует применять функцию сбалансированной точности (balanced assigasu, АССBal) либо другой показатель, например функцию точности на базе синусов SinАСС [4].

Если в матрице ошибок изменить результаты классификации шестого класса, увеличив их пропорционально в десять и сто раз (рис. 2), значения функции АСС станут равными 0,71194 и 0,5677 соответственно. Однако после нормализации измененных значений все матрицы ошибок примут одинаковый вид, как на рис. 1, б. При этом значение функции АСС для трех вариантов матриц ошибок будет одинаковым – 0,77465. Это легко доказать:

$$АССBal = \frac{1}{N} \left(\frac{c_{11}}{n_1} + \frac{c_{22}}{n_2} + \dots + \frac{c_{kk}}{n_k} + \dots + \frac{c_{NN}}{n_N} \right) = \frac{1}{N} \sum_i^N c_{ii}^{norm} = АСС,$$

где c_{ii}^{norm} – значения диагональных элементов нормализованной матрицы ошибок.

Таким образом, при наличии несбалансированных классов данных при нормализации значений матрицы ошибок теряется информация о дисбалансе классов. Популярная функция точности АСС трансформируется в функцию сбалансированной точности АССBal. Вследствие этого сравнивать значения функции АСС, вычисленные для нормализованных и ненормализованных матриц, некорректно.

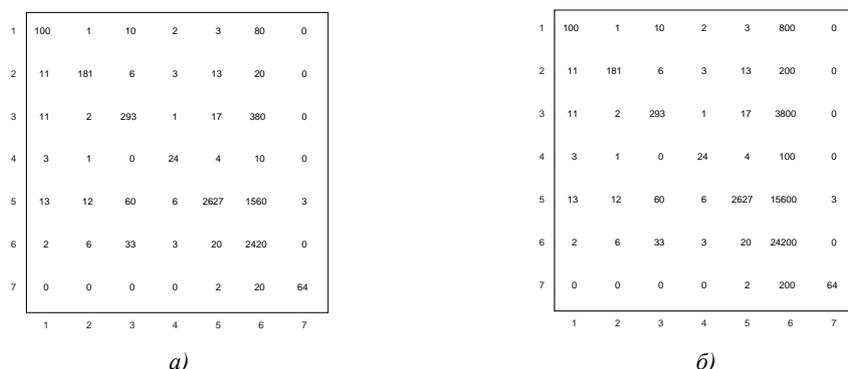


Рис. 2. Количество объектов шестого класса, увеличенное в десять (а) и сто (б) раз. Ошибки классификации распределены в тех же пропорциях

Если требуется выполнить разделение на два класса (меланому и другие заболевания), то данные будут сбалансированы по-иному: $IR = 7,8775$. Как видно на рис. 3, 79 % от общего числа изображений меланомы диагностированы верно на фоне других заболеваний кожи. Точность диагностики по матрице абсолютных значений ошибок функцией ассигасу равна 0,9320, при

этом точность по нормализованным значениям ошибок, вычисленная другими функциями, равна $ACC_{Bal} = AUNU = AUNP = AUIU = 0,8673$.

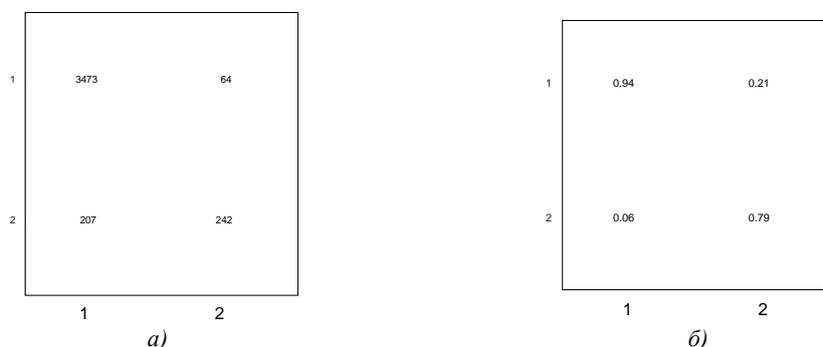


Рис. 3. Матрицы ошибок заболеваний кожи, разделенных на два класса: меланома и другие заболевания, с абсолютными (а) и нормализованными значениями (б)

Рассмотрим оценки, вычисляемые по матрицам ошибок при мультиклассовой классификации (табл. 3). Курсивом выделены значения функций, которые изменяются при разном дисбалансе классов. Только четыре функции в табл. 3 инвариантны к дисбалансу классов: ACC_{Bal} , $SinACC$, $GeomMeanSensitivity$ и $AUIU$.

Таблица 3

Оценки, вычисленные по матрицам, представленным на рис. 1 и 2

Функция	С абсолютными значениями, IR = 68,87	С нормализованными значениями, IR = 1	С увеличенным в сто раз шестым классом, IR = 1151,3
ACC	0,8864	<i>0,7746</i>	<i>0,5677</i>
ACC_{Bal}	<i>0,7746</i>	<i>0,7746</i>	<i>0,7746</i>
$SinACC$	<i>0,7966</i>	<i>0,7966</i>	<i>0,7966</i>
Kappa	0,7681	<i>0,7371</i>	<i>0,1591</i>
AveragePrecision	0,8324	<i>0,8133</i>	<i>0,3116</i>
GeomMeanPrecision	0,8296	<i>0,7992</i>	<i>0,2152</i>
GeomMeanSensitivity	0,7581	0,7581	0,7581
CosineCoef	0,8030	<i>0,7937</i>	<i>0,4913</i>
VM	0,8010	<i>0,7849</i>	<i>0,4363</i>
Fmicro	0,8025	<i>0,7935</i>	<i>0,4445</i>
Fmacro	0,7985	<i>0,7762</i>	<i>0,3603</i>
Jmacro	0,7392	<i>0,7371</i>	<i>0,7077</i>
sInd	0,8232	<i>0,8276</i>	<i>0,8069</i>
normMCC	0,8862	<i>0,8726</i>	<i>0,6422</i>
AUNU	0,8696	<i>0,8685</i>	<i>0,8538</i>
AUNP	0,8759	<i>0,8685</i>	<i>0,7656</i>
AUIU	0,9527	0,9527	0,9527

Анализ оценок результатов классификации землетрясений. Проанализируем матрицы ошибок, описанные в статье [9]. Целью работы было исследование возможностей искусственных нейронных сетей по предсказанию мощности землетрясений. Рассматривались три варианта деления наблюдаемых сейсмических сигналов в зависимости от предсказанной и зарегистрированной магнитуды M в эпицентре. Все данные были суммированы по месяцам с июля 2012 г. по июнь 2013 г. По данным каждого месяца строились матрицы ошибок класси-

фикации землетрясений в зависимости от магнитуды на два класса ($M \leq 2,0$; $M > 2,0$), три класса ($M \leq 1,5$; $1,5 < M < 3,0$; $M \geq 3,0$) и четыре класса ($M < 0,5$; $0,5 \leq M < 1,5$; $1,5 \leq M < 3,0$; $M \geq 3,0$) соответственно.

Рассмотрим результаты классификации данных о землетрясениях за июнь 2013 г. на три класса (рис. 4, а). Авторы работы [9] утверждают, что точность прогноза, представленного этой матрицей, очень хорошая, особенно для слабых землетрясений, которых подавляющее большинство. В данном примере коэффициент дисбаланса классов $IR = 3066,5$. Формально результат классификации хорош, так как значение точности $ACC = 0,9932$. Однако в матрице ошибок только 37,98 % объектов второго и 30,00 % объектов третьего класса классифицированы верно. При этом сбалансированная точность $ACC_{Bal} = 0,6966$, т. е. в 1,4258 раза меньше, чем точность при абсолютном представлении данных в матрице ошибок.

В результаты прогноза для второго класса в матрицу ошибок были внесены изменения (рис. 4, б). В новой матрице всего 27 % объектов второго класса классифицированы верно. При этом $ACC = 0,9908$, т. е. показатель точности при оценке абсолютных данных уменьшился всего на 0,24 %. Однако для нормализованного варианта матрицы ошибок сбалансированная точность $ACC_{Bal} = 0,5214$, т. е. она уменьшилась на 33,6 % относительно исходного нормализованного значения функции ACC_{Bal} .

Далее в матрице ошибок изменим результаты классификации третьего класса. Он описан в третьем столбце матрицы на рис. 4, в и соответствует самым мощным землетрясениям. Абсолютная погрешность по сравнению с исходной матрицей невелика: всего пять лишних объектов третьего класса ошибочно отнесены к соседнему второму классу землетрясений средней мощности. Этой матрице соответствуют следующие оценки результатов классификации: абсолютная точность $ACC = 0,9931$; сбалансированная точность $ACC_{Bal} = 0,6113$, т. е. на 37,54 % ниже.

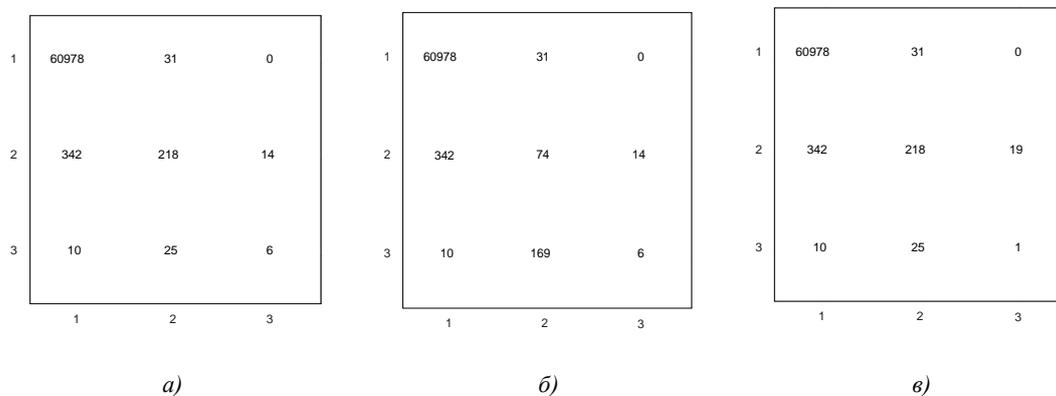


Рис. 4. Матрица ошибок предсказания землетрясений за июнь 2013 г. (а), измененные результаты классификации второго (б) и третьего (в) классов

Приведем еще два примера оценок классификации реальных результатов предсказания землетрясений из работы [9]. На рис. 5, а показаны ошибки классификации по измерениям, полученным за январь 2013 г. (всего 63 675 объектов), а на рис. 5, б – за декабрь 2012 г. (всего 63 677 объектов, на два больше). Вместе с тем IR первой матрицы на рис. 5 равен 3961,8, а второй – 5279,8. При этом значения функции точности ACC практически одинаковы: 0,9956 и 0,99536, но значения сбалансированной точности ACC_{Bal} намного меньше: 0,6423 и 0,6012. Вычислим точность классификации по отдельным классам: для первой матрицы 0,9962, 0,8474 и 0,0833; для второй – 0,9972, 0,6815 и 0,1250. Последние числа в каждой тройке объясняют, почему снизились усредненные значения сбалансированной точности, но ничего не говорят о дисбалансе классов. Матрицы с оценками ошибок изображены на рис. 6.

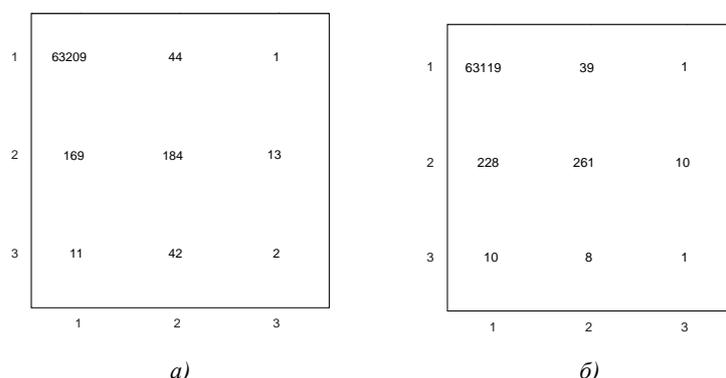


Рис. 5. Матрицы ошибок классификации данных за январь 2013 г. (а) и декабрь 2012 г. (б)

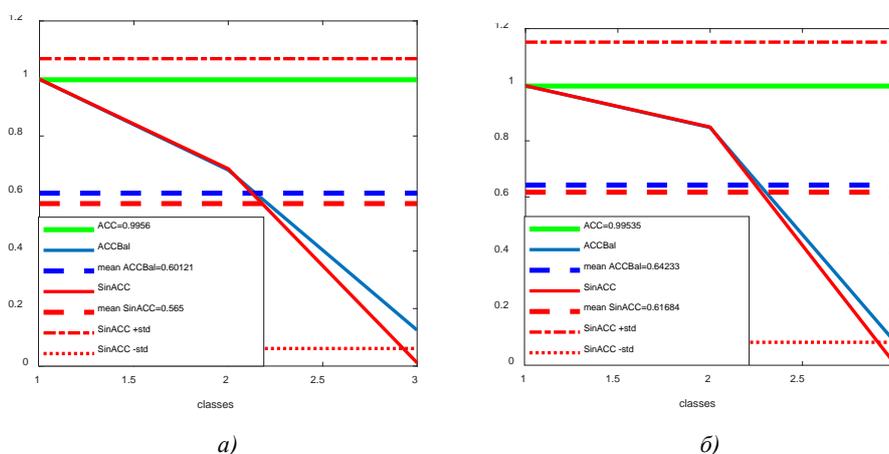


Рис. 6. Графики и оценки классификации (общие и по классам), вычисленные по матрицам на рис. 5

На рис. 7 показаны матрицы ошибок предсказания землетрясений при разделении одних и тех же данных на два, три и четыре класса землетрясений согласно магнитудам (см. данные за декабрь 2012 г. в статье [9]). Коэффициенты дисбаланса данных в этих матрицах равны 470,7, 5279,8 и 5256,9. При делении данных на четыре класса (рис. 7, в) второй и четвертый классы были распознаны недостаточно: всего 11,68 и 8,33 % образцов в этих классах распознаны верно. Тем не менее для всех четырех классов стандартная функция точности дает значение 0,9953, а нормализованная – всего 0,5119. При делении данных на два класса (рис. 7, а) значения этих функций равны соответственно 0,9934 и 0,9302, т. е. достаточно высокие. Таким образом, при создании классификатора нужно учитывать дисбаланс при делении данных на классы и результаты классификации отдельных классов.

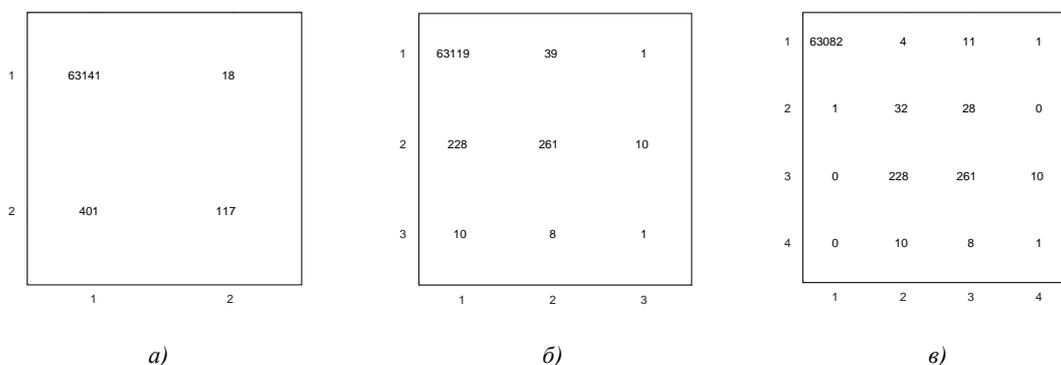


Рис. 7. Матрицы ошибок классификации данных за декабрь 2012 г. при их разделении на два (а), три (б) и четыре (в) класса землетрясений

Приведенные примеры матриц ошибок (рис. 2–5, 7) подтверждают так называемый парадокс точности (ассигасу paradox, впервые описанный в статье [10]), который отмечает некорректность применения классической функции точности к несбалансированным данным. Если абсолютно все данные будут отнесены неким примитивным классификатором к самому большому классу, точность этого классификатора будет равна отношению реального числа объектов наибольшего класса к общему объему данных. Например, для данных, представленных матрицей ошибок на рис. 4, а, точность будет равна 98,95 %. Однако такой классификатор будет абсолютно бесполезен, так как он не предскажет ни одного мощного землетрясения, а в медицинских приложениях – ни одного заболевания.

В табл. 4 приведены значения других оценок, используемых при мультиклассовой классификации данных и вычисленных по матрицам, представленным на рис. 4, а и б, а также их нормализованным вариантам. Курсивом выделены значения оценок, изменившихся после нормализации матрицы ошибок; жирным курсивом – значения оценок, увеличившихся после существенного уменьшения числа правильно классифицированных данных второго класса; жирным шрифтом – названия функций, значения которых не меняются после нормализации матрицы ошибок.

Таблица 4

Оценки результатов классификации, вычисленные по матрицам ошибок предсказания землетрясений

Функция	Матрица на рис. 4, а		Матрица на рис. 4, б	
	с абсолютными значениями, IR = 3066,5	с нормализованными значениями, IR = 1	с измененными результатами второго класса, IR = 3066,5	с нормализованными значениями, IR = 1
ACC	0,9932	<i>0,5085</i>	0,9908	0,4249
ACCBal	0,5085	0,5085	0,4249	0,4249
SinACC	0,3933	0,3933	0,3473	0,3473
Kappa	0,5329	<i>0,2628</i>	0,3689	0,1374
AveragePrecision	0,6966	<i>0,5947</i>	0,5339	0,3576
GeomMeanPrecision	0,6191	<i>0,5632</i>	0,2792	0,3232
GeomMeanSensitivity	0,3816	0,3816	0,2662	0,2662
CosineCoef	0,5952	<i>0,5499</i>	0,4763	0,3898
VM	0,5854	<i>0,4910</i>	0,4476	0,3711
Fmicro	0,5879	<i>0,5483</i>	0,4732	0,3883
Fmacro	0,5692	<i>0,4453</i>	0,4226	0,3523
Jmacro	0,3174	<i>0,2628</i>	0,2287	0,1374
sInd	0,5177	<i>0,5369</i>	0,4555	0,4783
normEMCC	0,7851	<i>0,6499</i>	0,6985	0,5764
AUNU	0,6587	<i>0,6314</i>	0,6143	0,5687
AUNP	0,7132	<i>0,6314</i>	0,7056	0,5687
AUIU	0,6495	0,6495	0,5122	0,5122

Все месячные данные и результаты их классификации, приведенные в работе [9], очень схожи. Показатели точности разделения сейсмических сигналов этих данных на два, три и четыре класса выше 99 %, поэтому авторы статьи [9] заявляют о разработке очень хорошего классификатора сигналов для предсказания землетрясений. Проведенный анализ показывает, что это не совсем корректно.

Закключение. Популярная функция точности ассигасу не может корректно оценивать ошибки классификации несбалансированных классов данных. Нельзя также сравнивать значения данной функции, вычисленные по матрицам с абсолютными количественными и нормализованными по классам результатами классификации. В этом случае оценки могут существенно различаться при дисбалансе классов данных, поскольку функция точности, вычисленная по матрице ошибок с нормализованными значениями, является сбалансированной и имеет другую формулу.

Такой же вывод сделан относительно большинства функций, используемых для вычисления оценок результатов классификации данных и представленных в настоящей статье. Исключением являются только функции сбалансированной точности ACCVal, функции SinACC, GeomMeanSensitivity и AUIU. Любые вычисляющие геометрическое среднее функции, такие как GeomMeanSensitivity и GeomMeanPrecision, равняются нулю, если хотя бы один из классов будет полностью неверно классифицирован, т. е. не будет верно распознанных объектов этого класса. Все это имеет место при использовании простейших классификаторов. Поэтому функции геометрического усреднения не следует применять для оценок результатов классификации, особенно при большом числе классов и (или) малом количестве объектов одного из классов.

При использовании любого классификатора для прогнозирования в реальных ситуациях никогда не известен истинный баланс данных. В реальных приложениях дисбаланс имеет место всегда: здоровых больше, чем больных; слабых землетрясений больше, чем сильных, и т. п. Это подтверждают оценки матриц ошибок на рис. 4, которые приведены в табл. 4. Таким образом, при обучении и настройке классификаторов лучше оценивать результаты функциями, не зависящими от дисбаланса данных. Независимость от дисбаланса позволяет надеяться на получение более корректных результатов классификации реальных данных.

Для представления матриц ошибок лучше использовать абсолютные значения вместо относительных, так как они дают представление о количестве протестированных данных каждого класса и их дисбалансе.

Список использованных источников

1. A review on ensembles for the class imbalance problem: bagging-, boosting-, and hybrid-based approaches / M. Galar [et. al.] // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*. – 2012. – Vol. 42, no. 4. – P. 463–484. <https://doi.org/10.1109/tsmcc.2011.2161285>
2. Miller, G. A. An analysis of perceptual confusions among some English consonants / G. A. Miller, P. E. Nicely // *The J. of the Acoustical Society of America*. – 1955. – Vol. 27, no. 2. – P. 338–352. <https://doi.org/10.1121/1.1907526>
3. The balanced accuracy and its posterior distribution / K. H. Brodersen [et. al.] // *Intern. Conf. on Pattern Recognition*. – Istanbul, 2010. – P. 3121–3124.
4. Starovoitov, V. New function for estimating imbalanced data classification results / V. Starovoitov, Yu. Golub // *Pattern Recognition and Image Analysis*. – 2020. – Vol. 30, no. 3. – P. 295–302.
5. Hand, J. D. A simple generalisation of the area under the ROC curve for multiple class classification problems / J. D. Hand, J. R. Till // *Machine Learning*. – 2001. – Vol. 45, no. 2. – P. 171–186. <https://doi.org/10.1023/A:1010920819831>
6. Fawcett, T. Using rule sets to maximize ROC performance / T. Fawcett // *Proc. IEEE Intern. Conf. on Data Mining*. – 2001. – P. 131–138. <https://doi.org/10.1109/ICDM.2001.989510>
7. Ballabio, D. Multivariate comparison of classification performance measures / D. Ballabio, F. Grisoni, R. Todeschini // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. – 2018. – Vol. 174. – P. 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2017.12.004>
8. Классификация повреждений кожи по данным дерматоскопии с использованием методов глубокого обучения / Е. Ю. Щетинин [и др.] // *Математическая биология и биоинформатика*. – 2020. – Т. 15, № 2. – С. 180–194.
9. Buscema, P. M. Artificial Adaptive Systems to predict the magnitude of earthquakes / P. M. Buscema, G. Massini, G. Maurelli // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. – 2015. – Vol. 56, no. 2. – P. 227–256.
10. Valverde-Albacete, F.J. 100 % classification accuracy considered harmful: The normalized information transfer factor explains the accuracy paradox / F. J. Valverde-Albacete, C. Pelaez-Moreno // *PloS One*. – 2014. – Vol. 9, no. 1. – P. e84217. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084217>

References

1. Galar M., Fernandez A., Barrenechea E., Bustince H., Herrera F. A review on ensembles for the class imbalance problem: bagging-, boosting-, and hybrid-based approaches. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2012, vol. 42, no. 4, pp. 463–484. <https://doi.org/10.1109/tsmcc.2011.2161285>

2. Miller G. A., Nicely P. E. An analysis of perceptual confusions among some English consonants. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1955, vol. 27, no. 2, pp. 338–352. <https://doi.org/10.1121/1.1907526>
3. Brodersen K. H., Ong C. S., Stephan K. E., Buhmann J. M. The balanced accuracy and its posterior distribution. *International Conference on Pattern Recognition*, 2010, Istanbul, pp. 3121–3124.
4. Starovoitov V., Golub Yu. New function for estimating imbalanced data classification results. *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2020, vol. 30, no. 3, pp. 295–302.
5. Hand J. D., Till J. R. A simple generalisation of the area under the ROC curve for multiple class classification problems. *Machine Learning*, 2001, vol. 45, no. 2, pp. 171–186. <https://doi.org/10.1023/A:1010920819831>.
6. Fawcett T. Using rule sets to maximize ROC performance. *Proceedings IEEE International Conference on Data Mining*, 2001, pp. 131–138. <https://doi.org/10.1109/ICDM.2001.989510>
7. Ballabio D., Grisoni F., Todeschini R. Multivariate comparison of classification performance measures. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2018, vol. 174, pp. 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2017.12.004>
8. Shhetinin E. Ju., Sevast'janov L. A., Demidova A. V., Kuljabov D. S. Klassifikacija povrezhdenij kozhi po dannym dermatoskopii s ispol'zovaniem metodov glubokogo obucheniya [Dermatoscopy classification of skin lesions using deep learning methods]. *Matematicheskaja biologija i bioinformatika [Mathematical biology and bioinformatics]*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 180–194.
9. Buscema P. M., Massini G., Maurelli G., Artificial Adaptive Systems to predict the magnitude of earthquakes. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 2015, vol. 56, no. 2, pp. 227–256.
10. Valverde-Albacete F. J., Pelaez-Moreno C. 100 % classification accuracy considered harmful: The normalized information transfer factor explains the accuracy paradox. *PloS One*, 2014, vol. 9, no. 1, p. e84217. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084217>

Информация об авторах

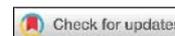
Старовойтов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: valerys@newman.bas-net.by

Голуб Юлия Игоревна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: 6423506@gmail.com

Information about the authors

Valery V. Starovoitov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: valerys@newman.bas-net.by

Yuliya I. Golub, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: 6423506@gmail.com



УДК 004.932 + 53.088.6

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-72-83>Оригинальная статья
Original Paper

Алгоритм предварительной обработки данных линейки приборов с зарядовой связью на основе адаптивного фильтра Винера

Г. С. Литвинович[✉], И. И. Бручковский

Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, Минск, 220045, Беларусь
[✉]E-mail: litvinovichgs@yandex.by

Аннотация. Для применения спектрометров в задачах дистанционного зондирования Земли исследователю необходимо выбирать режимы регистрации спектров, позволяющие добиться наивысшей точности спектральных измерений. При регистрации сигнала с борта авианосителей, обеспечивающих максимальный охват исследуемой территории, важно получить данные с максимальным отношением сигнал-шум за минимальное время, поскольку накопление выборки спектров для последующего усреднения невозможно. В работе представлены экспериментальные результаты определения компонентов шума (шума считывания; фотонного, электронного дробового и структурного шумов) для монохромной неохлаждаемой ПЗС-линейки Toshiba TCD1304DG (ПЗС – приборы с зарядовой связью) при различных условиях регистрации спектра: температуре детектора, времени экспозиции. Полученные зависимости компонентов шума позволяют оценить уровень шума для известных условий регистрации спектров. Предлагается алгоритм обработки данных ПЗС на основе адаптивного фильтра Винера с целью увеличения соотношения сигнал-шум путем использования априорной информации о статистических параметрах компонентов шума. Такой подход позволил увеличить отношение сигнал-шум спектров яркости небесной сферы на 4–9 дБ при регистрации сигнала на различных временах экспозиции. Практическое применение предлагаемого алгоритма уменьшило неопределенность расчета вегетационного индекса *NDVI* в 1,5 раза при регистрации спектров отражения растительности с борта самолета в надирной геометрии измерений.

Ключевые слова: линейка ПЗС, шум детектора, фотонный шум, шум считывания, электронный дробовый шум, фильтр Винера, температура детектора, вегетационный индекс

Для цитирования. Литвинович, Г. С. Алгоритм предварительной обработки данных линейки приборов с зарядовой связью на основе адаптивного фильтра Винера / Г. С. Литвинович, И. И. Бручковский // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 72–83. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-72-83>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 04.09.2020
Подписана в печать | Accepted 16.11.2020
Опубликована | Published 26.03.2021

Algorithm for preliminary processing of charge coupled devices array data based on the adaptive Wiener filter

Hleb S. Litvinovich[✉], Ilya I. Bruchkouski

*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems
of Belarusian State University,
st. Kurchatova, 7, Minsk, 220045, Belarus
✉E-mail: litvinovichgs@yandex.by*

Abstract. The researcher should choose the modes of recording spectra which allow to achieve the highest accuracy of spectral measurements in remote sensing systems. When registering a signal from aircraft which provide maximum coverage of the studied area, it is important to obtain a signal with the maximum signal-to-noise ratio in a minimum time, since the accumulation of spectra samples for averaging is impossible. The paper presents the experimental results of determining the noise components (readout noise, photon, electronic shot, pattern noise) for a monochrome uncooled CCD-line detector Toshiba TCD1304DG (CCD – charge-coupled devices) with various conditions of spectrum registration: detector temperature, exposition. Obtained dependences of the noise components make it possible to estimate the noise level for well-known conditions of spectra registration. The algorithm for processing CCD data based on an adaptive Wiener filter is proposed to increase the signal-to-noise ratio by using a priori information about the statistical parameters of the noise components. Such approach has allowed to increase the signal-to-noise ratio of sky spectral brightness by 4–9 dB for exposure times. The practical application of the algorithm has reduced the uncertainty in the vegetation index NDVI by 1.5 times when recording the reflection spectra of vegetation from the aircraft in the nadir measurement geometry.

Keywords: CCD-line detector, detector noise, photon noise, readout noise, electron shot noise, Wiener filter, detector temperature, vegetation index

For citation. Litvinovich H. S., Bruchkouski I. I. Algorithm for preliminary processing of charge coupled devices array data based on the adaptive Wiener filter. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 72–83 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-72-83>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Линейки ПЗС нашли широкое применение в качестве детектора для малогабаритных спектрометров. В то же время некоторые из задач, решаемых при помощи малогабаритных спектрометров, предъявляют повышенные требования к таким характеристикам детектора, как чувствительность и отношение сигнал-шум. Поэтому для проведения предварительной обработки спектров с целью увеличения соотношения сигнал-шум необходима информация о параметрах компонентов шума при заданных условиях регистрации полезного сигнала, что особенно актуально для неохлаждаемых детекторов ПЗС.

В литературе описываются методы определения параметров компонентов шума для различных типов детекторов [1–3], в том числе с учетом влияния температурных эффектов, так как количественная оценка характеристик компонентов шума для конкретного детектора ПЗС в составе спектрального прибора не только задает точность проводимых измерений, но и может предоставить информацию об оптимальных режимах работы спектрального прибора.

При проведении исследований применяется стандартная методика определения параметров компонентов шума [1] для монохромной неохлаждаемой ПЗС-линейки Toshiba TCD1304DG (URL: <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/product/linear-image-sensors/detail.TCD1304DG.html>), которая используется в составе малогабаритного спектрометра ССП-600Н [4, 5] в качестве детектора излучения. Спектрометр ССП-600Н предназначен для оперативного решения задач дистанционного зондирования природных объектов, в том числе в режиме полевых измерений.

Цель работы состоит в нахождении оптимальных режимов работы спектрометра ССП-600Н для увеличения соотношения сигнал-шум с учетом количественно определенных статистических характеристик компонентов шума ПЗС-линейки Toshiba TCD1304DG.

Методика определения компонентов шума. Рассматриваемая в данной работе ПЗС-линейка Toshiba TCD1304DG содержит 3648 рабочих и 13 конструктивно затемненных пикселей. Сигнал с линейки ПЗС считывается с частотой 250 кГц и оцифровывается с 12-битным разрешением таким образом, что может быть описан выражением [1]

$$N = I \cdot PRNU + D = I \cdot PRNU + SN_{ph}(I) + FPN(T, t) + SN_{dark}(T, t) + N_{read}(T), \quad (1)$$

где N – сигнал на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) электрической схемы детектора, принимающий значение от 0 до 4096 ед.;

I – освещенность пиксела, Вт/м²;

$PRNU$ – коэффициент чувствительности пиксела к излучению, $\frac{\text{ед. АЦП} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$;

D – суммарный сигнал от всех видов шумов, ед. АЦП;

T – температура детектора, °С;

t – время накопления заряда, экспозиция, с;

$SN_{ph}(I)$ – фотонный дробовый шум, ед. АЦП;

$FPN(T, t)$ – структурный шум, ед. АЦП;

$SN_{dark}(T, t)$ – электронный дробовый шум, ед. АЦП;

$N_{read}(T)$ – шум считывания, ед. АЦП.

Методику определения компонентов шума представим в виде двух блок-схем [1]: проведения измерений при наличии света, попадающего на детектор (рис. 1, а), и проведения измерений в темноте (рис. 1, б). За оценку величины шума принималось значение среднеквадратического отклонения (СКО) сигнала. Для вычисления СКО каждого вида шума с учетом температуры детектора выполнялись аналогичные шаги методики при другой температуре детектора, анализ полученных результатов проводился для 25 и 35 °С. Такие температуры были выбраны из-за отсутствия термокамеры, способной поддерживать температуру ниже комнатной и имеющей прозрачное окно для ввода оптического излучения внутрь. Поэтому минимальной температурой в исследовании стала комнатная температура 25 °С, тогда как температура 35 °С примерно соответствует температуре детектора спектрометра, находящегося в летнее время под воздействием прямых солнечных лучей на широтах Беларуси.

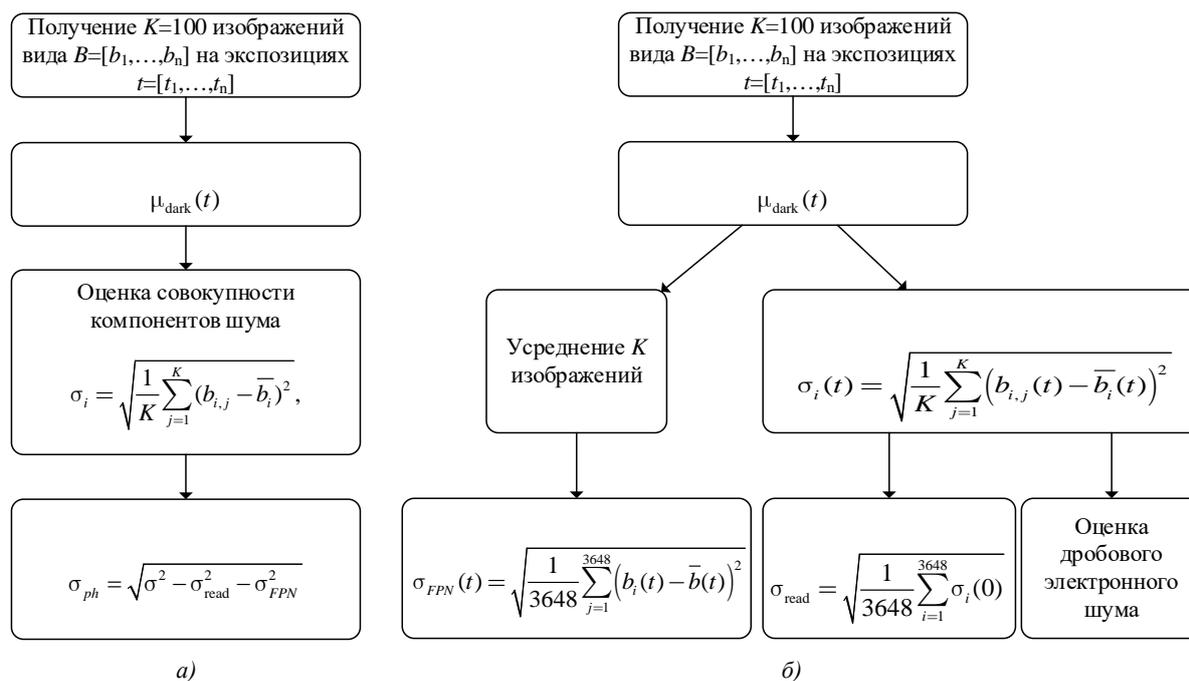


Рис. 1. Блок-схемы методики определения компонентов шума [1] при наличии (а) и отсутствии (б) света

Компоненты шума вычислялись с использованием выборки из $K = 100$ изображений для набора времен экспозиции из диапазона от 15 до 2000 мс, выходной сигнал детектора представлен в виде вектора $\vec{B} = [b_1, b_2, \dots, b_{3648}]$. В ранее проведенном исследовании [4] для этого типа детектора была показана эффективность выбора именно 100 изображений. Пример изображений для оценки компонентов шума показан на рис. 2.

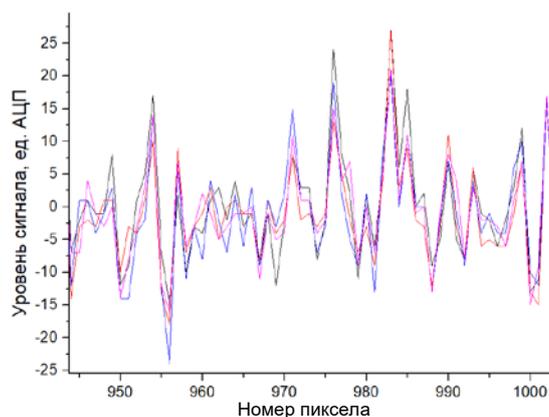


Рис. 2. Вид четырех фрагментов изображений, на основе которых проводился анализ компонентов шума

За оценку численного значения каждого вида шума (SN_{ph} , FPN , SN_{dark} , N_{read}) принимались два типа СКО:

– временное для SN_{ph} , SN_{dark} , N_{read} , т. е. СКО значений i -го пиксела для K измерений,

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (b_{i,j} - \bar{b}_i)^2}, \quad (2)$$

где $b_{i,j}$ – значение i -го пиксела для j -го измерения, \bar{b}_i – арифметическое среднее значение i -го пиксела по K измерениям;

– пространственное для FPN , т. е. СКО значений всех пикселов в линейке для одного измерения,

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{3648} \sum_{i=1}^{3648} (b_i - \bar{b})^2}, \quad (3)$$

где b_i – значение i -го пиксела, \bar{b} – арифметическое среднее значение всех пикселов изображения.

Детектор имеет 13 конструктивно изолированных от света пикселов, сигнал с которых представляется в виде вектора $\vec{D} = [d_1, d_2, \dots, d_{13}]$. Это позволяет регистрировать темновой сигнал, т. е. аддитивный сигнал $\mu_{dark}(t)$, обусловленный тепловой генерацией электронов и наличием электронной подставки:

$$\mu_{dark}(t) = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} d_i(t). \quad (4)$$

Для всех измерений b_i , описанных в настоящей работе, производилась коррекция темнового сигнала $\mu_{dark}(t)$ по формуле

$$\tilde{b}_i = b_i - \mu_{dark}, \quad (5)$$

где \tilde{b}_i – скорректированное значение. Коэффициент чувствительности пиксела к излучению $PRNU$ определялся при помощи процедуры калибровки спектрометра по эталону спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) [6–8].

Результаты экспериментального определения компонентов шума. Структурный шум (FPN) вызван различием в чувствительности отдельных пикселей детектора и проявляется как шум определенного пространственного рисунка (см. рис. 2), поэтому был проведен эксперимент по определению амплитуды и установлению характеристик изменчивости пространственного рисунка. Для этого регистрировалась серия из $K=100$ изображений при отсутствии света с временем экспозиции от 15 до 2000 мс. Вместе с тем исследовалось влияние тепловых эффектов: эксперимент повторялся для двух температур детектора (25 и 35 °C).

При отсутствии освещенности ($I = 0$) выражение (1) принимает вид

$$N = FPN + SN_{\text{dark}}(T, t) + N_{\text{read}}(T). \quad (6)$$

Поскольку электронный шум $SN_{\text{dark}}(T, t)$ и шум считывания $N_{\text{read}}(T)$ подчиняются нормальному распределению и принимают случайное значение от измерения к измерению, усреднение выборки изображений на каждой экспозиции позволяет выделить на изображении постоянный рисунок, определяемый структурным шумом FPN . Зависимость СКО структурного шума FPN от времени экспозиции оценивалась по формуле (3) с учетом усредненных выборок изображений. Электронный дробовый шум $SN_{\text{dark}}(T, t)$ и шум считывания $N_{\text{read}}(T)$ определялись в зависимости от времени экспозиции усредненного по всем пикселям временного СКО согласно формуле (2). Результаты обработки экспериментальных данных показаны на рис. 3.

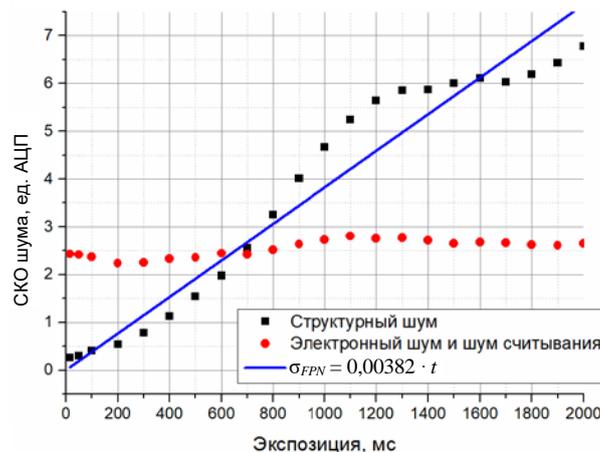


Рис. 3. Зависимость компонентов шума от времени экспозиции

Оценка СКО структурного шума для различного времени экспозиции может быть аппроксимирована линейной функцией

$$\sigma_{FPN}(t) = 0,00382 \cdot t, \quad (7)$$

где t – время экспозиции, мс.

Использование приближения (7) не оказывает существенного влияния на дальнейшие расчеты, так как расходитсся с экспериментальными данными на величину не более одного отсчета АЦП. На малых значениях экспозиции ($t < 260$ мс) структурным шумом можно пренебречь, так как его уровень меньше минимального значения разряда АЦП.

Так как шум считывания $N_{\text{read}}(T)$ обусловлен в том числе и особенностями электронной схемы, зависит от времени считывания и не зависит от времени экспозиции, он оценивался как сигнал, полученный с детектора при нулевой экспозиции. Поскольку обеспечить нулевое время экспозиции для реального детектора не представляется возможным, оценка СКО шума считывания $N_{\text{read}}(T)$ получалась при помощи аппроксимации зависимости СКО совокупности шума считывания и электронного шума (рис. 3) до нулевого времени экспозиции.

Как показано на рис. 3, график зависимости СКО совокупности электронного дробового шума и шума считывания является достаточно пологим, т. е. сумма СКО указанных компонентов шума ограничена шумом считывания, который вносит наибольший вклад, поэтому $\sigma_{\text{read}} \approx 2,55$. Следует отметить, что при $t > 700$ мс структурный шум начинает преобладать над шумом считывания.

Фотонный шум вызван неравномерным попаданием фотонов на пиксел детектора. Соответствующая вероятность описывается распределением Пуассона [9], согласно которому СКО фотонного шума пропорционально квадратному корню из числа сигнальных электронов:

$$\sigma_N \sim \sqrt{N}. \quad (8)$$

Для оценки величины фотонного шума регистрировались сигналы различной интенсивности в пределах динамического диапазона детектора на фиксированной экспозиции 200 мс, которая была выбрана из соображений небольшого вклада уже определенных компонентов шума и уровня сигнала, занимающего весь динамический диапазон детектора. СКО фотонного шума определялось с учетом рассчитанного по формуле (2) временного СКО шума σ по выражению

$$\sigma_{ph} = \sqrt{\sigma^2 - \sigma_{\text{read}}^2 - \sigma_{FPN}^2}. \quad (9)$$

С использованием экспериментальных данных, представленных на рис. 4, зависимость величины фотонного шума $SN_{ph}(N)$ от уровня сигнала N рассчитывалась по формуле

$$\sigma_{ph}(N) = 0,07 \cdot \sqrt{N}. \quad (10)$$

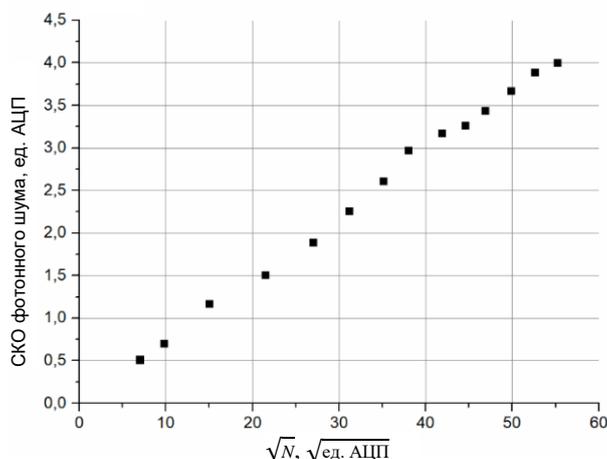


Рис. 4. Зависимость фотонного шума от уровня сигнала

Другими словами, при линейном увеличении уровня сигнала уровень фотонного шума и, следовательно, отношение сигнал-шум возрастают пропорционально \sqrt{N} . Поэтому при проведении измерений с целью минимизации вклада фотонного шума есть смысл регистрировать максимальные уровни сигнала в пределах области линейности детектора.

Для исследования влияния температуры на компоненты шума детектор был помещен в термостабилизированную камеру, где измерения проводились при температурах $(25 \pm 0,5)$ и $(35 \pm 0,5)$ °С. Результаты сравнительного анализа показаны на рис. 5, где в качестве уровня сигнала для фотонного шума взято типичное значение 1500 отсчетов АЦП.

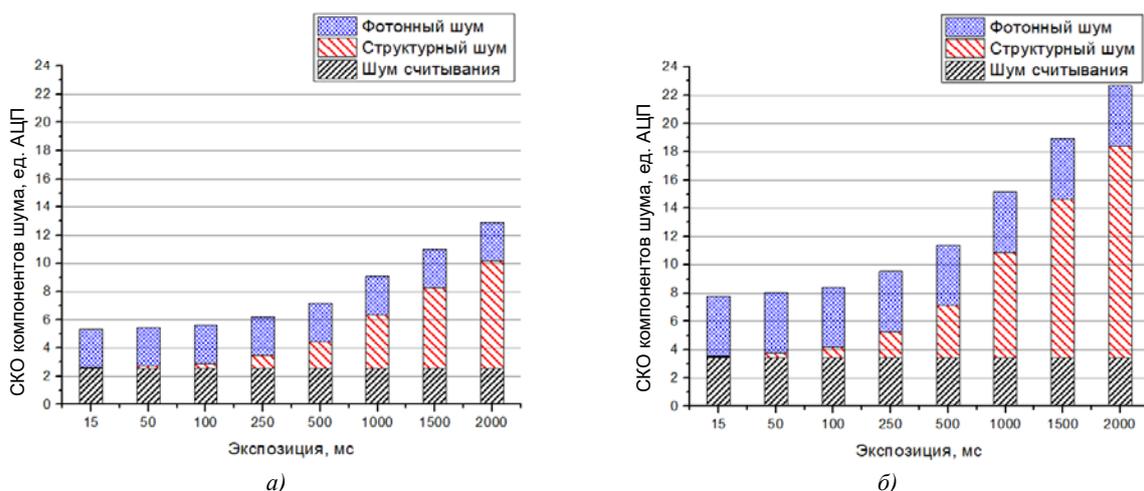


Рис. 5. СКО компонентов шума в итоговом сигнале: а) при 25 °С; б) при 35 °С

На временах экспозиции менее 100 мс наибольший вклад в результирующий шум вносят фотонный шум и шум считывания, которые эффективно устраняются путем усреднения нескольких измерений. На временах экспозиции более 100 мс структурный шум начинает преобладать над остальными компонентами шума и для его коррекции следует применять особые меры, например попиксельное вычитание сигнала, зарегистрированного при отсутствии света на той же экспозиции. В таблице представлены аналитические аппроксимации для различных компонентов шумового сигнала, полученные по экспериментальным данным для детектора Toshiba TCD1304DG согласно методике, изложенной в работе [1].

Величина компонентов шума для различных условий регистрации

Шум	25 °С	35 °С
Структурный	$\sigma_{FPN}(t) = 0,00382 \cdot t$	$\sigma_{FPN}(t) = 0,0075 \cdot t$
Считывания	$\sigma_{read} \approx 2,55$	$\sigma_{read} \approx 3,4$
Фотонный	$\sigma_{ph}(N) = 0,07 \cdot \sqrt{N}$	$\sigma_{ph}(N) = 0,11 \cdot \sqrt{N}$

При увеличении температуры детектора структурный шум становится более явным и при отсутствии термостабилизации детектора требует отдельного внимания при проведении измерений.

Предварительная обработка данных фильтром Винера. Для уменьшения амплитуды результирующего шума в регистрируемых спектрах в исследовании применялась одна из версий фильтра Винера [10], представляющего собой частный случай цифрового фильтра низких частот. Так как выполнение процедуры фильтрования методом скользящего среднего приводит к сдвигу изображения (что может иметь негативные последствия в задачах спектрометрии), то фильтр Винера в данном случае является предпочтительным, поскольку не имеет указанного недостатка.

Для корректного использования Фурье-фильтров низких частот с целью уменьшения амплитуды результирующего шума необходимы априорные знания о характеристиках фильтруемого сигнала, что требует подбора параметров фильтра в зависимости от режима измерений (экспозиции, интенсивности сигнала) и специфики решаемой задачи. Поэтому применение адаптивного фильтра Винера является наиболее универсальным решением для коррекции спектральных данных в случае детектора Toshiba TCD1304DG в связке со спектрометром ССП-600Н, так как применение фильтра основано только на измеренных статистических параметрах шумовых компонентов детектора. Значение интенсивности i -го пикселя в отфильтрованном изображении b'_i пересчитывалось:

$$b'_i = \mu_{i-4,i+4} + \frac{\sigma_{i-4,i+4}^2 - v^2}{\sigma_{i-4,i+4}^2} (b_i - \mu_{i-4,i+4}) =$$

$$= \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k} + \frac{\left(\frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 [b_{i-k}^2 - \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k}] \right)^2 - v^2}{\left(\frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 [b_{i-k}^2 - \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k}] \right)^2} \left(b_i - \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{i-k} \right), \quad (11)$$

где b_i – значение интенсивности i -го пиксела зашумленного изображения, μ – математическое среднее сигнала b_i в окне, σ – СКО сигнала b_i в окне, v – СКО шума в сигнале.

Величина v в случае априорных знаний об оценках СКО шумовых компонентов рассчитывалась следующим образом:

$$v = \sqrt{\sigma_{\text{read}}^2 + \sigma_{ph}^2 + \sigma_{FPN}^2}, \quad (12)$$

где σ_{read} , σ_{ph} и σ_{FPN} – оценки СКО шумовых компонентов, полученные экспериментально.

В случае использования фильтра без априорных знаний об оценках СКО шумовых компонентов величина СКО шума в сигнале v находилась по формуле

$$v = \frac{1}{3648} \sum_{j=1}^{3648} \left(\frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 [b_{j-k}^2 - \frac{1}{9} \sum_{k=-4}^4 b_{j-k}] \right). \quad (13)$$

Для фильтрации применялось скользящее окно в девять пикселов с перекрытием в восемь пикселов, которое достаточно для оценки локальных параметров сигнала, но не расширяет спектральные линии. Так, в качестве значения СКО шума в сигнале v при использовании фильтра к спектральным данным без априорных знаний об оценках СКО шумовых компонентов применялось среднее значение σ по всем окнам в сигнале.

С целью контроля эффективности применения цифрового фильтра Винера регистрировались спектры яркости небесной сферы на временах экспозиции 50, 150, 500 и 2000 мс при температуре детектора 25 °С. В качестве меры качества сигнала использовалось среднее значение отношения сигнал-шум SNR по изображению спектра яркости небесной сферы:

$$SNR = \frac{1}{3648} \sum_{i=1}^{3648} SNR_i = \frac{1}{3648} \sum_{i=1}^{3648} \left(10 \cdot \log_{10} \frac{N_i^2}{\sigma^2} \right), \quad (14)$$

где SNR_i – отношение сигнал-шум i -го пиксела; N_i – значение сигнала в i -м пикселе, ед. АЦП; σ – СКО сигнала в пикселе, ед. АЦП.

За оценку σ для расчета отношения сигнал-шум принималось СКО сигнала, полученного попиксельным вычитанием двух последовательно зарегистрированных изображений спектра яркости небесной сферы:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{3648} \sum_{i=1}^{3648} \left((N_{1,i} - N_{0,i}) - \overline{(N_{1,i} - N_{0,i})} \right)^2}, \quad (15)$$

где $N_{0,i}$ и $N_{1,i}$ – значения i -го пиксела двух последовательно снятых изображений; $\overline{(N_{1,i} - N_{0,i})}$ – среднее арифметическое значений i -го пиксела двух последовательно зарегистрированных изображений.

Данный способ позволяет рассчитать действительное СКО сигнала для применяемой системы, поскольку результирующий шум в пикселе изображения может включать в себя другие виды шума, которые могут зависеть в том числе и от уровня рассеянного излучения

внутри спектрометра. Таким образом, по формуле (14) рассчитывались значения SNR для спектров яркости небесной сферы, зарегистрированных при различном времени экспозиции и подвергнутых предварительной обработке без фильтрации, фильтром Винера без априорных знаний о шуме и фильтром Винера с известной из эксперимента величиной шума. Рассчитанные значения SNR показаны на рис. 6.

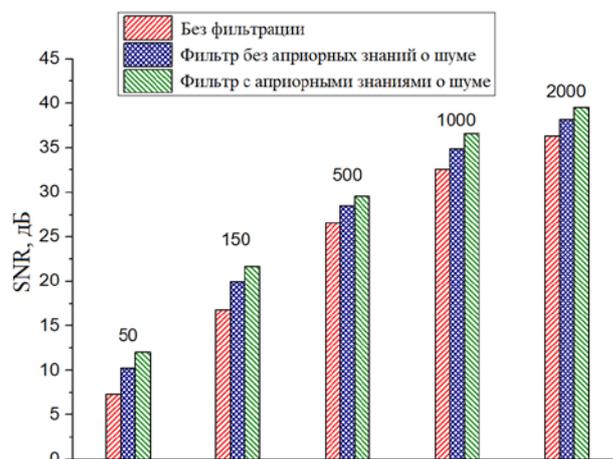


Рис. 6. Результаты оценки величины SNR спектра яркости небесной сферы для различного времени экспозиции, мс

Из диаграммы на рис. 6 видно, что наилучшие результаты достигнуты на малых временах экспозиции, где отношение сигнал-шум повысилось на 9 дБ. При регистрации очень слабых сигналов с увеличением времени экспозиции отношение сигнал-шум повышается на 4 дБ. Также стоит отметить, что использование априорных знаний о компонентах шума позволяет более точно подобрать параметры цифрового фильтра для коррекции сигнала, полученного при заданных условиях.

Экспериментальная проверка алгоритма. Для практической проверки описанной выше методики предварительной обработки спектральных данных проводился натурный эксперимент, в котором спектрометр ССП-600Н размещался на авиационной платформе и регистрировал спектры крон деревьев в надирной геометрии наблюдений с высоты около 100 м.

Выбранный спектр был получен при относительно большой экспозиции (861 мс) из-за низкой освещенности крон деревьев солнцем. На рис. 7 изображен характерный фрагмент спектра растительности, полученного согласно предлагаемой методике с использованием фильтра и без него. К исходному спектру был применен фильтр Винера с заранее определенными параметрами, после чего значения АЦП были пересчитаны в значения СПЭЯ.

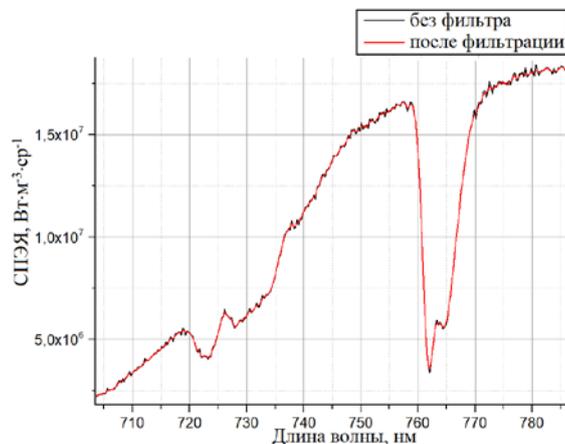


Рис. 7. Фрагмент спектра отражения растительности, полученный с авиационного носителя

На рис. 7 можно заметить, что применение фильтра приводит к сглаживанию шума в спектре, при этом сохраняются форма и положение узкой линии поглощения кислорода на длине волны 762 нм.

Так как проводимый натуральный эксперимент был посвящен методике обнаружения патологий вегетации хвойных лесных насаждений по данным многоуровневых оптических измерений, для оценки состояния растительного покрова использовался в том числе и индекс

$$NDVI = \frac{I(800) - I(670)}{I(800) + I(670)}, \quad (16)$$

где $I(800)$, $I(670)$ – коэффициенты спектральной яркости объекта при 800 и 670 нм соответственно.

За оценку неопределенности индекса $NDVI$ принималась величина

$$\sigma_{NDVI} = NDVI \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{800}^2}{I(800)} + \frac{\sigma_{670}^2}{I(670)}}, \quad (17)$$

где σ_{800} и σ_{670} – СКО сигнала, рассчитанное по формуле (2). Для расчета использовалось значение $K = 9$, достаточное для определения локальных характеристик сигнала. Значение индекса $NDVI$ для спектра без предварительной обработки составило $0,87 \pm 0,03$, в то время как значение индекса $NDVI$ по отфильтрованному спектру составило $0,87 \pm 0,02$.

Таким образом, использование априорных знаний о статистических параметрах компонентов шума для заданных условий регистрации изображения позволяет существенно улучшить отношение сигнал-шум на 4–9 дБ (или в 3–10 раз) по отношению к изображению без применения фильтра. Практическое применение фильтра позволило уменьшить неопределенность рассчитываемого вегетационного индекса $NDVI$ в 1,5 раза, что дало возможность улучшить качество последующей обработки спектральных данных для решения задачи классификации объектов методами оптического дистанционного зондирования.

Заключение. В работе представлен алгоритм предварительной обработки данных неохлаждаемого детектора на основе линейки ПЗС с возможностью контроля температуры. По результатам проведенных экспериментов установлены статистические параметры различных компонентов шума для линейки Toshiba TCD1304DG. Так, СКО шума считывания σ_{read} не зависит от времени экспозиции и оказывается равной 2,55 ед. АЦП при температуре 25 °С. СКО структурного шума σ_{FPN} возрастает при увеличении времени экспозиции, фотонный шум σ_{ph} линейно зависит от квадратного корня интенсивности сигнала согласно выражению (10). Все компоненты шума при увеличении температуры на 10 °С возрастают в 1,3–2 раза в зависимости от вида шума.

При необходимости регистрации слабых сигналов на длительных временах экспозиции имеет смысл проводить регистрацию сигнала, суммируя несколько изображений на временах экспозиции менее 100 мс. Такой подход позволяет уменьшить компоненты структурного шума σ_{FPN} до величины, меньшей шага оцифровки сигнала.

Применение алгоритма обработки на основе фильтра Винера, использующего априорные знания о статистических параметрах различных компонентов шума в полезном сигнале, дает возможность повысить отношение сигнал-шум на 4–9 дБ при регистрации сигнала на различных временах экспозиции без накопления выборки для последующего усреднения, что особенно актуально в случаях единичных измерений, например, при решении задач дистанционного мониторинга. Представленный алгоритм был опробован на спектральных данных натурального эксперимента с авиационной платформы в надириной геометрии наблюдений, что позволило уменьшить неопределенность расчета вегетационного индекса $NDVI$ в 1,5 раза.

Список использованных источников

1. A technique for evaluation of CCD video-camera noise / K. Irie [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2008. – Vol. 18, iss. 2. – P. 280–284.
2. A model for measurement of noise in CCD digital-video cameras / K. Irie [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2008. – Vol. 19, no. 4. – P. 1–5.

3. Матюхин, В. В. Модель шума фоточувствительной матрицы Dalsa CM42M / В. В. Матюхин, Д. Г. Паринов, Е. А. Татарина // Прикладная физика. – 2017. – № 6. – С. 60–67.
4. Литвинович, Г. С. Методика определения характеристик спектрального прибора для геофизических наблюдений / Г. С. Литвинович, И. И. Бручковский, С. И. Бручковская // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : тез. докл. XV Всерос. откр. конф., Москва, 13–17 нояб. 2017 г. / Институт космических исследований Российской академии наук ; ред. : Л. М. Зеленый [и др.]. – М., 2017. – С. 139.
5. Алгоритм коррекции дифракции второго порядка в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой / С. И. Бручковская [и др.] // Журн. приклад. спектроскопии. – 2019. – Т. 86, № 4. – С. 620–627.
6. Энергетическая калибровка оптических съемочных систем дистанционного зондирования / И. М. Цикман [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2012. – № 3(58). – С. 13–20.
7. Kacker, R. Guidelines for Radiometric Calibration of Electro-Optical Instruments for Remote Sensing / R. Kacker. – National Institute of Standards and Technology, 2015. – 131 p.
8. Ferrero, A. Low-uncertainty absolute radiometric calibration of a CCD / A. Ferrero, J. Campos, A. Pons // Metrologia. – 2006. – Vol. 43, no. 2. – P. 17–21.
9. Князев, М. Г. Расчет пороговых значений потока излучения и освещенности для ПЗС матриц KODAK KAI-1003M, KODAR KAI-1020, PHILIPS FTF3020M / М. Г. Князев, А. В. Бондаренко, И. В. Докучаев // Цифровая обработка сигналов. – 2006. – № 3. – С. 49–56.
10. Jae, S. Lim. Two-Dimensional Signal and Image Processing / Lim Jae S. – Prentice Hall PTR, 1989. – 694 p.

References

1. Irie K., McKinnon A. E., Unsworth K., Woodhead I. M. A technique for evaluation of CCD video-camera noise. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2008, vol. 18, iss. 2, pp. 280–284. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2007.913972>.
2. Irie K., McKinnon A. E., Unsworth K., Woodhead I. M. A model for measurement of noise in CCD digital-video cameras. *Measurement Science and Technology*, 2008, vol. 19, no. 4, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/4/045207>.
3. Matyuhin V. V., Parinov D. G., Tatarina E. A. Model' shuma fotochuvstvitel'noj matricy Dalsa CM42M [Dalsa CM42M photosensitive matrix noise model]. *Prikladnaya fizika [Applied Physics]*, 2017, no. 6, pp. 60–67 (in Russian).
4. Litvinovich G. S., Bruchkovskij I. I., Bruchkovskaya S. I. Metodika opredeleniya harakteristik spektral'nogo pribora dlya geofizicheskikh nablyudenij [Technique for determining the characteristics of a spectral instrument for geophysical observations]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa : tezisy dokladov XV Vserossijskoj otkrytoj konferencii, Moskva, 13–17 nojabrja 2017 g. [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space: Abstracts of the XV All-Russian Open Conference, Moscow, 13–17 November 2017]*, Moscow, 2017, p. 139.
5. Bruchkovskaya S. I., Litvinovich G. S., Bruchkovskij I. I., Katkovskij L. V. Algoritm korrekcii difrakcii vtorigo poryadka v spektrometre s vognutoj difrakcionnoj reshetoj [Algorithm of second-order diffraction correction in the spectrometer with a concave diffraction grating]. *Zhurnal Prikladnoji Spektroskopii [Journal of Applied Spectroscopy]*, 2019, vol. 86, no. 4, pp. 620–627 (in Russian).
6. Cikman I. M., Belyaev Yu. V., Popkov A. P., Kakshinskij F. A. Energeticheskaya kalibrovka opticheskikh s'emochnyh sistem distancionnogo zondirovaniya [Energy calibration of optical imaging systems for remote sensing]. *Metrologiya i priborostroenie [Metrology and Instrumentation]*, 2012, no. 3(58), pp. 13–20 (in Russian).
7. Kacker R. *Guidelines for Radiometric Calibration of Electro-Optical Instruments for Remote Sensing*. National Institute of Standards and Technology, 2015, 131 p.
8. Ferrero A., Campos J., Pons A. Low-uncertainty absolute radiometric calibration of a CCD. *Metrologia*, 2006, vol. 43, no. 2, pp. 17–21.
9. Knyazev M. G., Bondarenko A. V., Dokuchaev I. V. Raschet porogovyh znachenij potoka izlucheniya i osveshchennosti dlya PZS matric KODAK KAI-1003M, KODAR KAI-1020, PHILIPS FTF3020M [Calculation of threshold values of radiation flux and illumination for CCD matrices KODAK KAI-1003M, KODAR KAI-1020, PHILIPS FTF3020M]. *Cifrovaya obrabotka signalov [Digital Signal Processing]*, 2006, no. 3, pp. 49–56 (in Russian).
10. Lim Jae S. *Two-Dimensional Signal and Image Processing*. Prentice Hall PTR, 1989, 694 p.

Информация об авторах

Литвинович Глеб Святославович, младший научный сотрудник, Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета.

E-mail: litvinovichgs@yandex.by

Бручковский Илья Игоревич, научный сотрудник, Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета.

E-mail: bruchkovsky2010@yandex.by

Information about the authors

Hleb S. Litvinovich, Junior Researcher, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University.

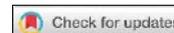
E-mail: litvinovichgs@yandex.by

Ilya I. Bruchkovski, Researcher, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University.

E-mail: bruchkovsky2010@yandex.by

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION TECHNOLOGIES



УДК [004.4 + 004.9]-047.58
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-84-95>

Оригинальная статья
Original Paper

Оценка ожидаемой надежности прикладных программных средств для компьютерных информационных систем

С. М. Боровиков[✉], В. О. Казючиц, В. В. Хорошко, С. С. Дик, К. И. Клинов

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь

[✉]E-mail: bsm@bsuir.by

Аннотация. Надежность компьютерной информационной системы во многом определяется надежностью разрабатываемого прикладного программного средства. В качестве показателя надежности прикладного программного средства рассматривается интенсивность отказов его компьютерной программы. Для определения ожидаемой надежности прикладного программного средства, планируемого к разработке (до написания кода компьютерной программы), предлагается модель, в которой используются некоторые параметры будущей компьютерной программы, данные о влиянии на ее надежность различных факторов и предполагаемое в дальнейшем тестирование компьютерной программы. Модель учитывает отрасль применения программного средства и быстродействие процессора компьютера. Анализируется процесс получения параметров модели. С помощью предложенной модели можно определить прогнозную интенсивность отказов планируемой к разработке прикладной компьютерной программы, а далее и надежность компьютерной информационной системы в целом. При необходимости могут быть разработаны организационно-технические мероприятия по обеспечению требуемого уровня надежности компьютерной информационной системы.

Ключевые слова: интенсивность отказов компьютерной программы, модель надежности, ранние этапы разработки, прогнозируемая плотность ошибок, ожидаемое число ошибок

Благодарность. Работа проводилась в рамках договора № Ф20МВ-021 на выполнение научно-исследовательской работы в соответствии с решением научного совета Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (протокол № 1 от 22.04.2020).

Для цитирования. Оценка ожидаемой надежности прикладных программных средств для компьютерных информационных систем / С. М. Боровиков [и др.] // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 84–95. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-84-95>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Assessment of expected reliability of applied software for computer-based information systems

Sergei M. Borovikov[✉], Vladislav O. Kaziuchyts, Vitaliy V. Khoroshko, Sergei S. Dick, Konstantin I. Klinov

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
st. P. Brovki, 6, 220013, Minsk, Belarus*

[✉]E-mail: bsm@bsuir.by

Abstract. The reliability of computer-based information systems is largely determined by the reliability of the developed application software. The failure rate of its computer program is considered as an indicator of the reliability of the application software. To determine the expected reliability of the application software planned for the development (until writing the code of a program), the model is proposed that uses some parameters of the future computer program, data on the influence of various factors on its reliability, and further testing of the program. The model takes into account the field of software application and computer processor performance. The process of model parameters obtaining is analyzed. It is possible by use of proposed model to determine the predicted failure rate of the planned application computer program, and then the reliability of the computer-based information system as a whole. If necessary, the measures can be developed to ensure the required level of reliability of the computer-based information system.

Keywords: failure rate of computer program, reliability model, early stages of development, predicted error density, expected number of errors

Acknowledgements. This work was carried out in the framework of contract no. F20MV-021 for the implementation of research work in accordance with the decision of the Scientific Council of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (protocol no. 1of 04.22.2020).

For citation. Borovikov S. M., Kaziuchyts V. O., Khoroshko V. V., Dick S. S., Klinov K. I. Assessment of expected reliability of applied software for computer-based information systems. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 84–95 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-84-95>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. В компьютерных информационных системах можно выделить три основные части:

- аппаратные средства ЭВМ и оборудование телекоммуникационных сетей;
- программное обеспечение;
- технический персонал и пользователи.

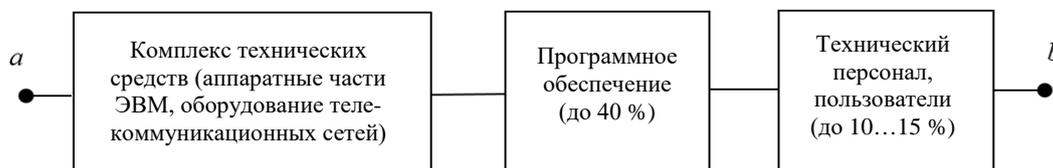
Аппаратные средства ЭВМ включают устройства ввода (клавиатуру, сканер и т. д.), устройство обработки данных (центральный процессор), устройства хранения информации (модули оперативной памяти, жесткие диски и т. д) и вывода (принтеры, экраны мониторов и др.). Телекоммуникационная связь позволяет организациям связывать компьютерные системы в эффективные сети.

Программное обеспечение включает совокупность системных и прикладных компьютерных программ и определяет команды, которые выполняют аппаратные средства. Прикладные программы, в свою очередь, определяют команды компьютеру, которые следует выполнять в ответ на действия человека, работающего за компьютером.

Технический персонал компьютерных информационных систем включает всех, кто программирует и обслуживает компьютерную информационную систему, следит за работоспособностью ее аппаратных средств и оборудования телекоммуникационных сетей. Пользователи – это люди, которые применяют компьютерную информационную систему для получения информации или решения других задач.

Структурная схема надежности (ССН) компьютерной информационной системы, в которой отсутствует избыточность, изображена на рисунке. Эта схема является моделью надежности компьютерной информационной системы. Если хотя бы одна из частей системы неработоспособна, то при переходе из точки *a* в точку *b* на схеме отсутствует замкнутый путь. Отсутствие

замкнутого пути означает, что отказ любой из указанных частей приводит к отказу системы в целом. Это символизируется разрывом цепи на ССН компьютерной информационной системы. Функциональные части системы на схеме обозначены прямоугольниками, в которые записан примерный вклад соответствующей функциональной части в ненадежность компьютерной информационной системы [1, 2].



Структурная схема надежности компьютерной информационной системы

При оценке ожидаемой надежности проектируемых компьютерных информационных систем важно учесть надежность всех трех из составных функциональных частей.

Актуальность разработки. Методы оценки надежности комплекса технических средств достаточно хорошо разработаны. Для ознакомления с подходами и методиками расчета надежности аппаратных частей ЭВМ и оборудования телекоммуникационных сетей можно обратиться к зарубежным источникам [3–5], российскому справочнику [6] или отечественным работам [7, 8]. Достигнут определенный уровень в разработке подходов к оценке надежности технического персонала и пользователей при их взаимодействии с комплексом технических средств и программным обеспечением. С методологией и описанием этих подходов можно ознакомиться в зарубежной [9, 10] и российской [11, 12] литературе.

В настоящее время проведены серьезные исследования в области оценки ожидаемой надежности прикладных компьютерных программ, входящих в состав программного обеспечения компьютерных информационных систем, однако предлагаемые модели для оценки надежности компьютерных программ носят ограниченный характер. Под моделью надежности компьютерной программы понимается, как правило, математическая модель, построенная для оценки зависимости надежности программного обеспечения от некоторых определенных параметров. Значения этих параметров либо предполагаются известными, либо могут быть измерены в ходе наблюдений или экспериментального исследования процесса функционирования компьютерных программ. С начала 1970-х гг. было создано более 200 моделей, но вопрос о том, как количественно оценить надежность компьютерных программ, остается в основном нерешенным. Не существует отдельной модели, которая могла бы использоваться во всех ситуациях. Ни одна модель не является полной или даже представительной [13].

Большинство моделей надежности (оценочные и измерительные) исходят из того, что имеются определенные данные о результатах тестирования разработанной компьютерной программы после устранения в ней ошибок, вызванных нарушениями правил языка программирования [1, 14–16]. Прогнозирующие модели надежности, такие как модель Холстеда и модель Мотли – Брукса, основаны на экспертной оценке характеристик создаваемой компьютерной программы: размера, количества операторов, количества и типов переменных (операндов), характеристик интерфейсов и др. [1]. Эти модели позволяют прогнозировать ожидаемый уровень надежности планируемых к разработке компьютерных программ. Однако на практике в большинстве случаев возникает проблема с определением характеристик будущей прикладной компьютерной программы. Обычно перед разработкой программного средства для компьютерной информационной системы удается относительно четко указать функциональное назначение и область применения программного средства и спрогнозировать примерный объем реализующей его прикладной компьютерной программы в строках программного кода. Актуальным является вопрос, как оценить надежность прикладных компьютерных программ в таких случаях.

Подход к оценке ожидаемой надежности программных средств. Согласно ГОСТ 27.205–1997 «Надежность в технике. Проектная оценка надежности сложных систем с учетом технического и программного обеспечения и оперативного персонала. Основные положения» об ожидаемой надежности разрабатываемой компьютерной программы (программного средства) будем су-

дить по интенсивности проявления скрытых ошибок, оставшихся в компьютерной программе после ее разработки и тестирования. Такую интенсивность (обозначим ее через λ) будем рассматривать в качестве интенсивности отказов компьютерной программы.

Большинство моделей надежности компьютерных программ исходят из того, что интенсивность отказов λ прямо пропорциональна числу оставшихся в программе ошибок [1, 16]:

$$\lambda \approx C_{\text{п}} \cdot N_{\text{ош}} = C_{\text{п}} \cdot F \cdot L, \quad (1)$$

где $C_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально; $N_{\text{ош}}$ – число ошибок, оставшихся в компьютерной программе; F – плотность ошибок в программе (среднее число ошибок, приходящихся на строку кода: $F = N_{\text{ош}} / L$); L – объем компьютерной программы в исполняемых строках программного кода.

В работе [17] эксплуатационная интенсивность отказов $\lambda_{\text{экс}}$ компьютерной программы в соответствии с выражением (1) представлена в виде равенства

$$\lambda_{\text{экс}} = C_{\text{п}} F_0 L = K_{\text{пр}} F_0 = K_{\text{пр}} \frac{N_0}{L}, \quad (2)$$

где F_0 – плотность ошибок компьютерной программы после написания ее кода и устранения нарушений правил языка программирования; N_0 – число ошибок (до выполнения тестирования); $K_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования, показывающий, как начальное число ошибок N_0 (или, что то же самое, плотность ошибок F_0) трансформируется в эксплуатационную интенсивность отказов $\lambda_{\text{экс}}$.

На основе экспериментальных данных, приводимых в работе [17], для компьютерных программ различных областей применения получены значения коэффициента преобразования $K_{\text{пр}}$ (табл. 1). Эти значения рассчитаны на основе выражения (2) как $K_{\text{пр}} = \lambda_{\text{экс}} / F_0$. Например, среднее значение коэффициента $K_{\text{пр}} = 0,1 / 0,0094 \approx 10,6$.

Таблица 1

Экспериментальные данные о надежности компьютерных программ

Область применения компьютерной программы	Среднее число исполняемых строк кода, приходящееся на одну программу L	Средняя плотность ошибок F_0 для одной программы, ошибка/строка кода	Средняя эксплуатационная интенсивность отказов $\lambda_{\text{экс}}$, 1/ч	Значение $K_{\text{пр}}$, строка кода/ч
Авиация	77 231,0	0,013	0,08	6,28
Мониторинг и обеспечение безопасности	85 420,5	0,009	0,0109	1,2
Телекоммуникации, мобильные электронные устройства	17 650,4	0,008	0,108	13,8
Управление производственными процессами	70 045,0	0,002	0,0076	3,8
Автоматизированные системы управления (в различных областях и сферах деятельности людей)	214 618,9	0,009	0,198	23
Инструменты разработки программ, моделирование, испытательные стенды, обучение	32 239,2	0,014	0,236*	16,9
Среднее	100 597,2	0,0094	0,1	10,6

* – значение получено на основе интенсивности отказов, соответствующей этапу тестирования.

Приведенные в табл. 1 коэффициенты $K_{пр}$ соответствуют случаю выполнения программ на компьютере с 32-разрядным процессором и быстродействием 10 млн операций в секунду (10 million instructions per second) [17].

Для компьютерных программ определенной области деятельности людей значение $K_{пр}$ считают примерно постоянным независимо от этапа разработки или использования прикладной программы. Изменение значений интенсивности отказов компьютерной программы происходит из-за изменения числа оставшихся ошибок $N_{ош}$ в программе или изменения плотности ошибок F .

Объем прикладных программ, разрабатываемых для компьютерных информационных систем, включает от ста тысяч до миллионов строк кода, и поэтому невыявленные на этапе тестирования ошибки в программах всегда существуют. Механизм преобразования между невыявленными ошибками $N_{ош}$ и интенсивностью отказов программы λ основан на том, что оператор, имеющий скрытые ошибки, не приведет к отказу программы ни при каких обстоятельствах, пока он не будет выполнен, т. е. до тех пор, пока не повлияет на содержимое памяти или на управление компьютером.

Известно [17], что на вероятность возникновения отказа программы при ее использовании по функциональному назначению влияют три внешние характеристики среды выполнения программы:

- быстродействие процессора (производительность компьютера);
- степень изменчивости входных данных и состояний управления компьютером;
- рабочая нагрузка, которую эксплуатационная среда будет оказывать на компьютерную программу.

Модель определения ожидаемой интенсивности отказов планируемой к разработке компьютерной программы. Для количественной оценки ожидаемой начальной интенсивности отказов компьютерной программы λ_0 используем модель, аналогичную выражению (2). Как показали экспериментальные данные [17], для рассматриваемых компьютерных программ при суммарной продолжительности их тестирования, составляющей примерно 40 % общего времени, отводимого на разработку, и использовании общепринятых методов тестирования интенсивность отказов компьютерных программ за счет выполнения тестирования уменьшалась примерно в 50 раз относительно их начальной интенсивности отказов λ_0 , т. е. $\lambda_0 / \lambda_{экс} \approx 50$. Таким образом, можно записать равенство

$$\lambda_0 = 50 K_{пр} \frac{N_0}{L} = 50 K_{пр} F_0. \quad (3)$$

С другой стороны, интенсивность отказов компьютерной программы до начала тестирования с учетом быстродействия процессора компьютера может быть определена по модели Му-са [1]:

$$\lambda_0 = C V N_0 = 3600 C \frac{0,7R}{B} N_0 = 2520 C \frac{R}{B} N_0 = 2520 C V_{пик} N_0, \quad (4)$$

где C – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом проявления ошибок компьютерной программы; V – средняя скорость выполнения команд компьютерной программы, представляющая собой возможное число прогонов компьютерной программы в течение одного часа; R – пиковое быстродействие процессора, указываемое производителем в технической документации, размерность «операций в секунду»; B – количество команд (операторов) в компьютерной программе; множитель 3600 – коэффициент перевода быстродействия процессора в размерность «операций в час»; множитель 0,7 – средний коэффициент, учитывающий реальное быстродействие процессора относительно пикового значения R ; $V_{пик}$ – пиковая скорость выполнения команд компьютерной программы (скорость для пикового быстродействия процессора R), определяемая отношением $V_{пик} = R/B$.

Примерное значение числа команд B можно определить следующим образом:

$$B = E_L L,$$

где E_L – коэффициент расширения кода (увеличения числа команд компьютерной программы относительно числа строк кода).

Согласно работе [18] будем считать, что одна строка кода компьютерной программы транслируется в 10 машинных команд, т. е. $E_L = 10$.

С помощью выражений (3), (4) и с учетом значений коэффициентов преобразования $K_{пр}$, приведенных в табл. 1, определены средние значения коэффициента проявления ошибок C для компьютерных программ различных областей применения (табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициентов для компьютерных программ различных областей применения

Область применения компьютерной программы	Коэффициент C , 1/ошибка	Коэффициент K_{Σ}	Значение A , ошибка / строка кода
1. Авиация	$1,246 \cdot 10^{-7}$	5,23	0,0128
2. Мониторинг и обеспечение безопасности	$0,238 \cdot 10^{-7}$	1,00	0,0092
3. Телекоммуникации, мобильные устройства	$2,738 \cdot 10^{-7}$	11,50	0,0078
4. Управление производственными процессами	$0,754 \cdot 10^{-7}$	3,17	0,0018
5. Автоматизированные системы управления	$4,563 \cdot 10^{-7}$	19,20	0,0085
6. Разработка программ, моделирование, обучение	$3,353 \cdot 10^{-7}$	14,10	0,0123
Среднее	$2,103 \cdot 10^{-7}$	8,83	0,0087

Представим коэффициент C в виде произведения

$$C = C_B \cdot K_{вх} \cdot K_n = C_B \cdot K_{\Sigma}, \quad (5)$$

а величины, входящие в выражение (5), обозначим следующим образом: C_B – базовое значение коэффициента проявления ошибок программы; $K_{вх}$ – коэффициент увеличения интенсивности отказов, обусловленный изменчивостью входных данных; K_n – коэффициент увеличения интенсивности отказов, обусловленный рабочей нагрузкой на программу; K_{Σ} – суммарный коэффициент увеличения интенсивности отказов, обусловленный совместным действием изменчивости входных данных и рабочей нагрузки на компьютерную программу.

В качестве базового значения коэффициента проявления ошибок C_B будем рассматривать коэффициент C для компьютерных программ, предназначенных для мониторинга и обеспечения безопасности. Пользуясь табл. 2 (строка 2), можно записать: $C_B = 0,238 \cdot 10^{-7}$ 1/ошибка. Для программ этого назначения суммарный коэффициент увеличения интенсивности отказов принят равным $K_{\Sigma} = 1,0$. В табл. 2 (столбец 3) приведены рассчитанные значения коэффициента K_{Σ} для компьютерных программ других областей применения.

Будем предполагать, что интенсивность отказов компьютерной программы после выполнения ее тестирования уменьшается в Q раз относительно начальной интенсивности отказов λ_0 . С учетом выражения (1) величина Q также показывает, во сколько раз за счет тестирования уменьшится число оставшихся ошибок в компьютерной программе относительно начального их числа (до выполнения тестирования), поэтому величину Q будем называть коэффициентом эффективности тестирования компьютерной программы. Используя выражения (4) и (5) и принимая во внимание значение коэффициента $C_B = 0,238 \cdot 10^{-7}$ 1/ошибка, модель определения ожи-

даемой интенсивности отказов компьютерной программы, прошедшей тестирование ($\lambda_{\text{экс}}$), может быть представлена в виде

$$\lambda_{\text{экс}}^{(i)} = \frac{1}{Q} (2520 C^{(i)} V_{\text{пик}} N_0^{(i)}) = \frac{60}{Q} K_{\Sigma}^{(i)} V_{\text{пик}} F_0^{(i)} L \cdot 10^{-6} (\text{ч}^{-1}), \quad (6)$$

где верхний индекс i указывает на то, что соответствующие характеристики относятся к компьютерным программам i -й области применения.

Определение параметров модели надежности компьютерной программы. Значение параметра F_0 модели (6) может быть найдено с помощью работы [19], в которой прогнозируемую плотность ошибок F предлагается определять в соответствии с моделью RL-92-52 [17] как произведение

$$F = A \cdot D \cdot S, \quad (7)$$

где A – средняя (базовая) плотность ошибок для компьютерных программ, используемых в данной отрасли или области применения (см. табл. 2); D – метрика, учитывающая производственную среду разработки программного обеспечения: особенность организации, разрабатывающей компьютерную программу; характеристику группы программистов, их квалификацию; S – метрика, учитывающая характеристики планируемой к разработке компьютерной программы.

Метрику D из выражения (7) предлагается определять в виде произведения двух коэффициентов:

$$D = K_{\text{орг}} \cdot K_{\text{кв.прог}},$$

где $K_{\text{орг}}$ – коэффициент, характеризующий особенность организации, которая разрабатывает компьютерную программу; $K_{\text{кв.прог}}$ – коэффициент, учитывающий квалификацию и опыт программистов.

В качестве рекомендуемых значений коэффициента $K_{\text{орг}}$ могут быть взяты данные, приводимые в работе [17], о метрике, учитывающей среду разработки программного обеспечения. Если характеристики группы программистов (организации) заметно отличаются от указанных в [17], можно дать экспертную оценку значению коэффициента $K_{\text{орг}}$ с учетом рекомендованного в этой работе условия

$$0,5 \leq K_{\text{орг}} \leq 2.$$

Для определения коэффициента $K_{\text{кв.прог}}$ предлагается пользоваться данными табл. 3, полученными методом экспертной оценки на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники [19].

Таблица 3
Результаты экспертной оценки

Квалификация и опыт программиста	Значение $K_{\text{кв.прог}}$
Студент, освоивший программирование на уровне программы учебной дисциплины высшего технического учебного заведения	2,0
Младший программист (Junior Developer)	1,3
Программист (Middle Developer)	1,0
Ведущий программист (Senior Developer)	0,7

Для определения метрики S из выражения (7) предлагается уточненная модель вида

$$S = K_{\text{слож}} \cdot K_{\text{С.Р}} \cdot K_{\text{нов}} \cdot K_{\text{мод}}, \quad (8)$$

где $K_{\text{слож}}$ – коэффициент, учитывающий категорию сложности компьютерной программы; $K_{\text{С.Р}}$ – коэффициент, учитывающий используемые средства разработки компьютерной программы; $K_{\text{нов}}$ – коэффициент, учитывающий степень новизны компьютерной программы; $K_{\text{мод}}$ – коэффициент, характеризующий степень использования стандартных модулей в компьютерной программе.

В табл. 4 в качестве примера выбора поправочных коэффициентов модели (8) показано, как выбирать значения коэффициента $K_{\text{С.Р}}$, учитывающего используемые средства разработки компьютерной программы, и коэффициента $K_{\text{мод}}$, учитывающего степень применения стандартных модулей в разрабатываемой компьютерной программе. Значения коэффициентов могут быть получены с помощью постановления Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь № 91 от 27.06.2007 «Об утверждении укрупненных норм затрат труда на разработку программного обеспечения» с учетом гипотезы о том, что число возможных ошибок в компьютерной программе прямо пропорционально затратам труда на ее разработку.

Таблица 4
 Выбор значения коэффициента $K_{\text{С.Р}}$ в зависимости от операционной среды

Средства разработки программного обеспечения	IBM-PC, Windows	Функционирование программного обеспечения в сетях	
		локальных	глобальных
Языки высокого уровня (Си++, Паскаль)	1,0	1,2	1,3
Языки 4GL (Visual Basic, Delphi)	0,8	0,95	1,1
Системы программирования на основе СУБД типа Foxpro	0,45	0,55	0,65
Системы программирования на основе СУБД типа Oracle, SQLServer	0,4	0,5	0,6
Объектно-ориентированные технологии (COM/DCOM, CORBA)	0,55	0,6	0,7
Прочие CASE-средства	0,19	0,22	0,25

В табл. 5 указываются значения коэффициента $K_{\text{мод}}$, учитывающего степень использования стандартных модулей в разрабатываемой компьютерной программе.

Таблица 5
 Выбор значения коэффициента $K_{\text{мод}}$

Степень охвата реализуемых функций компьютерной программы стандартными модулями, %	Значение $K_{\text{мод}}$
От 60 и выше	0,55
От 40 до 60	0,65
От 20 до 40	0,77
До 20	0,90
Не используются стандартные модули	1,0

Аналогично, используя указанное выше постановление, могут быть получены значения коэффициентов, которые принимают во внимание сложность ($K_{\text{слож}}$) и степень новизны ($K_{\text{нов}}$) разрабатываемой компьютерной программы.

Некоторые рекомендации по применению модели оценки надежности прикладных компьютерных программ. Для использования модели необходимо прежде всего уточнить область (отрасль) применения компьютерной программы. Это позволит более обоснованно выбрать значение базовой плотности ошибок в компьютерной программе (величину A , используемую в модели определения плотности ошибок F). Рекомендуется воспользоваться данными последнего столбца табл. 2. Если сложно сориентироваться с выбором области применения компьютерной программы, можно выбрать строку «среднее» в табл. 2. Далее, принимая во внимание функциональное назначение компьютерной программы, необходимо уточнить язык программирования и определить прогнозируемое число исполняемых строк программного кода L .

Необходимо также уточнить быстродействие процессора R , входящего в состав компьютера, на котором предполагается выполнять разрабатываемую программу, и оценить прогнозируемое число команд компьютерной программы B , а также значение пиковой скорости (V) их выполнения.

Важно с учетом языка программирования и особенностей компьютерной программы (числа и размера циклов, объема тела циклов, числа условных переходов, особенностей интерфейса и т. д.) оценить значение коэффициента расширения программного кода E_L . Согласно работе [18] в случае неопределенности можно считать, что одна строка кода компьютерной программы транслируется в 10 машинных команд ($E_L = 10$).

При получении метрики S , входящей в модель (7), следует обратить особое внимание на выбор значений коэффициентов, характеризующих разрабатываемую компьютерную программу. Выбор значений коэффициентов $K_{\text{с.р}}$ и $K_{\text{мод}}$ был описан выше. Для определения коэффициентов $K_{\text{слож}}$ и $K_{\text{нов}}$ можно использовать постановление Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь № 91 от 27.06.2007 «Об утверждении укрупненных норм затрат труда на разработку программного обеспечения» или обратиться к работе [20].

Значение коэффициента эффективности тестирования Q может быть получено экспертным методом в зависимости от предполагаемой продолжительности и технологии тестирования, а также опыта и квалификации тестируемых. Согласно работе [17] при использовании общепринятых методов тестирования продолжительностью не менее 40 % общего времени, отводимого на разработку компьютерной программы, может быть принято $Q \approx 50$.

Заключение. Полученная модель надежности дает возможность приближенно оценить ожидаемую надежность планируемой к разработке компьютерной программы. Во многих случаях такой ориентировочный расчет полезен, так как позволяет на раннем этапе разработки компьютерной программы получить представление о ее ожидаемой надежности и, следовательно, оценить надежность компьютерной информационной системы. В случае несоответствия проектной надежности компьютерной информационной системы требованиям технического задания могут быть разработаны мероприятия по повышению уровня надежности компьютерной программы, что приведет к увеличению надежности системы в целом.

Список использованных источников

1. Шубинский, И. Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа / И. Б. Шубинский. – М. : Надежность, 2012. – 296 с.
2. Чуканов, В. О. Методы обеспечения аппаратно-программной надежности вычислительных систем [Электронный ресурс] / В. О. Чуканов, В. В. Гуров, Е. В. Прокопьева. – 2014. – Режим доступа: <http://www.mcst.ru/metody-obespecheniya-apparatnoprogrammnoj-nadezhnosti-vychislitelnykh-sistem>. – Дата доступа: 21.04.2020.
3. Reliability Prediction Models. Notice 1: HDBK-217Plus™ / W. Denson [et al.]. – 2nd ed. – Washington : Quanterion Solutions Incorporated, 2015. – 186 p.

4. Gullo, L. J. The Revitalization of MIL-HDBK-217 [Electronic resource] / L. J. Gullo. – 2008. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/229021234_The_Revitalization_of_MIL-HDBK-217. – Date of access: 20.04.2020.
5. A comparative overview of electronic devices reliability prediction methods-applications and trends / F. O. Ehiagwina [et al.] // *Majlesi J. of Telecommunication Devices*. – 2016. – Vol. 5, no. 4. – P. 129–137.
6. Прытков, С. Ф. Надежность электрорадиоизделий : справ. / С. Ф. Прытков, В. М. Горбачева, А. А. Борисов. – М. : ФГУП «22 ЦНИИИ МО РФ», 2008. – 641 с.
7. Разработка методики прогнозирования надежности электронных устройств для системы АРИОН / С. М. Боровиков [и др.] // *Доклады БГУИР*. – 2011. – № 4(58). – С. 93–100.
8. Боровиков, С. М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств : учеб. пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с.
9. A Technique for Human Error Analysis. Technical Basis and Methodology Description (NUREG/CR-6350, BNL-NUREG-52467) / S. Cooper [et al.]. – Washington : U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1996. – 114 p.
10. Hollnagel, E. Human Reliability Analysis: Context and Control / E. Hollnagel. – London : Academic Press, 1993. – 336 p.
11. Бодров, В. А. Психология и надежность: человек в системах управления техникой / В. А. Бодров, В. Я. Орлов. – М. : Ин-т психологии РАН, 1998. – 288 с.
12. Щепланов, В. Ю. Надежность деятельности человека в автоматизированных системах и ее количественная оценка / В. Ю. Щепланов, А. Ф. Бобров // *Психологический журнал*. – 1990. – № 3. – С. 36–40.
13. Sridevi, E. Software reliability – an overview / E. Sridevi, B. Aruna, P. Sowjanya // *Intern. J. of Computer Science and Technology*. – 2012. – Vol. 3, iss. 1. – P. 471–473.
14. Lyu, M. R. Handbook of Software Reliability Engineering / M. R. Lyu. – N. Y. : McGraw-Hill, 1996. – 850 p.
15. Prasad, C. M. Overview of software reliability models / C. M. Prasad, L. Flowrence, C. V. Srikrishna // *Intern. J. of Engineering and Management Research*. – 2013. – Vol. 3, iss. 5. – P. 11–15.
16. Karanta, I. Methods and Problems of Software Reliability Estimation: VTT Working Papers 63 / I. Karanta. – Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 2006. – 57 p.
17. Software Reliability, Measurement, and Testing Guidebook for Software Reliability Measurement and Testing [Electronic resource] / J. A. McCall [et al.]. – 1992. – Mode of access: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a256164.pdf>. – Date of access: 20.04.2020.
18. Чуканов, В. О. Надежность программного обеспечения и аппаратных средств систем передачи данных атомных электростанций : учеб. пособие / В. О. Чуканов. – М. : МИФИ, 2008. – 168 с.
19. Модель прогнозирования надежности планируемых к разработке прикладных компьютерных программ / С. М. Боровиков [и др.] // *Интернаука*. – 2020. – № 12(141). – Ч. 1. – С. 68–72.
20. Боровиков, С. М. Метод оценки ожидаемой надежности прикладных компьютерных программ систем медицинской электроники / С. М. Боровиков, С. С. Дик // *Доклады БГУИР*. – 2018. – № 7(117). – С. 112–117.

References

1. Shubinsky I. B. Funktsionalnaya nadezhnost informatsionnykh sistem. Metody analiza. *Functional Reliability of Information Systems. Analysis Methods*. Moscow, Nadezhnost, 2012, 296 p. (in Russian).
2. Chukanov V. O., Gurov V. V., Prokop'eva E. V. Metody obespecheniya apparatno-programmnoj nadyozhnosti vychislitel'nykh system. *Methods for Ensuring the Hardware and Software Reliability of Computing Systems*, 2014. Available at: <http://www.mcst.ru/metody-obespecheniya-apparatnoprogrammnoj-nadezhnosti-vychislitelnykh-sistem> (accessed 21.04.2020).
3. Denson W., Nicholls D., Lein P., Wisnewski J. Reliability Prediction Models. Notice 1: HDBK-217Plus™. 2nd ed., Washington, Quanterion Solutions Incorporated, 2015, 186 p.
4. Gullo L. J. *The Revitalization of MIL-HDBK-217*, 2008. Available at: https://www.researchgate.net/publication/229021234_The_Revitalization_of_MIL-HDBK-217 (accessed 20.04.2020).
5. Ehiagwina F. O., Adewunmi T. O., Seluwa E. O., Kehinde O. O., Abubakar N. S. A comparative overview of electronic devices reliability prediction methods-applications and trends. *Majlesi Journal of Telecommunication Devices*, 2016, Vol. 5, no. 4, pp. 129–137.

6. Prytkov S. F., Gorbacheva V. M., Borisov A. A. Nadyozhnost elektroradioizdely. *Reliability of Radio and Electronic products*. Moscow, Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatие "22 Central'nyj nauchno-issledovatel'skij ispytatel'nyj institut Ministerstva oborony Rossijskoj Federacii", 2008, 641 p. (in Russian).
7. Borovikov S. M., Shnejderov E. N., Matyushkov V. E., Cyrel'chuk I. N. Razrabotka metodiki prognozirovaniya nadyozhnosti elektronnykh ustroystv dlya sistemy ARION [Development of a method for predicting the reliability of electronic devices for the ARION system]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]*, 2011, no. 4(58), pp. 93–100 (in Russian).
8. Borovikov S. M., Cyrel'chuk I. N., Troyan F. D. Raschyot pokazateley nadyozhnosti radioelektronnykh sredstv. *Calculation of Reliability Indicators of Electronic Equipment*. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2010, 68 p. (in Russian).
9. Cooper S. E., Ramey-Smith A. M., Wreathall J., Parry G. W., Bley D. C., ..., Barriere M. T. *A Technique for Human Error Analysis. Technical Basis and Methodology Description (NUREG/CR-6350, BNL-NUREG-52467)*. Washington, U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1996, 114 p.
10. Hollnagel E. *Human Reliability Analysis: Context and Control*. London, Academic Press, 1993, 336 p.
11. Bodrov V. A., Orlov V. Ya. Psikhologiya i nadezhnost: chelovek v sistemakh upravleniya tekhnikoy. *Psychology and Reliability: Man in Control Systems of Technique*. Moscow, Institut psikhologii Rossijskoj akademii nauk, 1998, 288 p. (in Russian).
12. Shcheblanov V. Yu., Bobrov A. F. Nadezhnost deyatelnosti cheloveka v avtomatizirovannykh sistemakh i ee kolichestvennaya otsenka [Reliability of human activity in automated systems and its quantitative assessment]. *Psikhologicheskij zhurnal [Psychological Journal]*, 1990, no. 3, pp. 36–40 (in Russian).
13. Sridevi E., Aruna B., Sowjanya P. Software reliability – an overview. *International Journal of Computer Science and Technology*, 2012, vol. 3, iss. 1, pp. 471–473.
14. Lyu M. R. *Handbook of Software Reliability Engineering*. New York, McGraw-Hill, 1996, 850 p.
15. Prasad C. M., Flowrence L., Srikrishna C. V. Overview of software reliability models. *International Journal of Engineering and Management Research*, 2013, Vol. 3, iss. 5, pp. 11–15.
16. Karanta I. *Methods and Problems of Software Reliability Estimation: VTT Working Papers 63*. Espoo, VTT Technical Research Centre of Finland, 2006, 57 p.
17. McCall J. A., Randel W., Dunham J., Lauterbach L. *Software Reliability, Measurement, and Testing Guidebook for Software Reliability Measurement and Testing*, 1992. Available at: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a256164.pdf> (accessed 20.04.2020).
18. Chukanov V. O. Nadyozhnost programmnoho obespecheniya i apparatnykh sredstv sistem peredachi dannykh atomnykh elektrostantsy. *Reliability of Software and Hardware for Data Transmission Systems of Nuclear Power Plant*. Moscow, Moskovskij inzhenerno-fizicheskij institut, 2008, 168 p. (in Russian).
19. Borovikov S. M., Dik S. S., Le Van Tam, Klinov K. I. Model prognozirovaniya nadyozhnosti planiruyemykh k razrabotke prikladnykh kompyuternykh programm [A model for predicting the reliability of software applications planned for development]. *Internauka [Internauka]*, 2020, no. 12(141), part 1, pp. 68–72 (in Russian).
20. Borovikov S. M., Dik S. S. Metod otsenki ozhidayemoy nadezhnosti prikladnykh kompyuternykh programm sistem meditsinskoj elektroniki [Method for assessing the expected reliability of applied computer programs of medical electronics systems]. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]*, 2018, no. 7(117), pp. 112–117 (in Russian).

Информация об авторах

Боровиков Сергей Максимович, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: bsm@bsuir.by

Казючич Владислав Олегович, магистр технических наук, аспирант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.
E-mail: vladkaz@bsuir.by

Information about the authors

Sergei M. Borovikov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Information and Computer Systems Design, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: bsm@bsuir.by

Vladislav O. Kaziuchyts, M. Sci. (Eng.), Postgraduate Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: vladkaz@bsuir.by

Хорошко Виталий Викторович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

E-mail: khoroshko@bsuir.by

Дик Сергей Сергеевич, магистр технических наук, аспирант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

E-mail: sdick@bsuir.by

Клинов Константин Игоревич, студент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

E-mail: kost9klinov@gmail.com

Vitaliy V. Khoroshko, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Information and Computer Systems Design, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

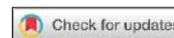
E-mail: khoroshko@bsuir.by

Sergei S. Dick, M. Sci. (Eng.), Postgraduate Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

E-mail: sdick@bsuir.by

Konstantin I. Klinov, Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

E-mail: kost9klinov@gmail.com



УДК 519.85, 004.021, 519.178
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-96-104>

Оригинальная статья
Original Paper

Один из подходов к организации современного образовательного процесса

А. Г. Савенко[✉], Ю. А. Скудняков

*Институт информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники,
ул. Козлова, 28, Минск, 220037, Беларусь
[✉]E-mail: savenko@bsuir.by*

Аннотация. Рассматривается новый подход, который заключается в создании и использовании ротационно-гибридной модели организации современного образовательного процесса, представляющей интеграцию образовательных, информационно-коммуникационных, тестирующих, управленческих, ротационных и других технологий. Предлагаются наглядная и математическая модели, структурная схема информационно-образовательной системы, алгоритм процесса ротации обучаемых, а также подход к построению оптимального пути определения максимального усвоения дисциплин обучающимися в каждом наборе изучаемых дисциплин и формирования их наиболее приемлемого подмножества. Приводится программно-алгоритмическая реализация ротационно-гибридной модели в виде универсального электронного средства обучения.

Математической основой ротационно-гибридной модели является теория множеств с использованием графовых моделей, которые выгодно отличаются от другого математического аппарата наглядностью и матричной формой представления, легко обрабатываемой на компьютере. Эффективность применения ротационно-гибридной модели и ее алгоритмической реализации проиллюстрирована с помощью разработанного электронного средства обучения, внедренного в учебный процесс на кафедре информационных систем и технологий Института информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ключевые слова: ротационная модель, гибридная модель, обучающе-тестирующий ресурс, модульный принцип, электронное средство обучения, оптимизация образовательного процесса

Для цитирования. Савенко, А. Г. Один из подходов к организации современного образовательного процесса / А. Г. Савенко, Ю. А. Скудняков // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 96–104. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-96-104>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 30.12.2020
Подписана в печать | Accepted 12.01.2021
Опубликована | Published 26.03.2021

One of the approaches to the organization of the modern educational process

Andrei G. Savenko[✉], Yuri A. Skudnyakov

*Institute of Information Technologies of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics,
st. Kozlova, 28, Minsk, 220037, Belarus
✉E-mail: savenko@bsuir.by*

Abstract. This paper proposes a new approach to the creation and use of rotational-hybrid model of organizing a modern educational process representing the integration of educational, information communication, testing, management, rotational and other technologies. A visual and mathematical model, an diagram of information and educational system, an algorithm for the rotation of trainees are presented. An approach is proposed for constructing the optimal way to determine the maximum assimilation of disciplines by students in each set of studied disciplines and the formation of its most acceptable subset. The program-algorithmic implementation of the rotational-hybrid model in the form of a universal teaching-testing electronic learning tool is shown.

The mathematical basis of the rotational-hybrid model is set theory using graph models, which compare favorably with other mathematical apparatus in visibility and a matrix form of representation that can be easily processed on a computer. The effectiveness of using the developed rotational-hybrid model and its algorithmic implementation is illustrated with the help of developed teaching-testing electronic teaching tool, introduced into educational process at the Department of Information Systems and Technologies of the Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Keywords: rotational model, hybrid model, teaching and testing resource, modular principle, electronic learning tool, optimization of the educational process

For citation. Savenko A. G., Skudnyakov Yu. A. One of the approaches to the organization of the modern educational process. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 96–104 (in Russian). [https://doi.org/ 10.37661/1816-0301-2021-18-1-96-104](https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-96-104)

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Основными особенностями XXI в. являются, с одной стороны, беспрецедентный, постоянно ускоряющийся рост объема информации, а с другой – высокий уровень развития компьютерной техники, информационных и телекоммуникационных технологий, наличие мощной информационной инфраструктуры и, как следствие, их интенсивное использование гражданами, бизнесом и органами государственной власти. На рубеже веков именно информационные технологии стали общим инструментом взаимодействия всех компонентов, определяющих развитие национальной экономики.

В новых социально-экономических условиях знания, квалификация и умение работать с информацией являются одной из основных ценностей и в то же время – стратегическим ресурсом общества, сопоставимым по значению с природными, людскими и финансовыми ресурсами. В связи с этим образование становится все более значимым институтом современного общества, при этом существенно изменяются предъявляемые к нему требования. Поскольку развитие информационных технологий порождает среду, для которой характерны стремительные и непрерывные изменения, возникает необходимость непрерывного обучения, т. е. обучения в течение всей жизни. Институтом ЮНЕСКО по информационным технологиям в образовании достаточно подробно изложены особенности формирования государственной политики по применению современных информационных технологий.

Использование электронного средства обучения (ЭСО) позволяет обеспечить экономию материальных, человеческих и временных ресурсов. В процессе прохождения компьютерного тестирования благодаря четкому, заранее встроенному алгоритму в программе исключается возможность случайной ошибки при обработке ответов. Наконец, возможно сохранение данных, полученных в результате тестирования, в отдельном файле, доступ к которому может быть как ограниченным, так и неограниченным.

Основной задачей систем электронного обучения является эффективная передача знаний целевой аудитории вне зависимости от того, насколько она подготовлена и способна усваивать необходимую информацию.

Кроме того, эффективность современного образовательного процесса во многом зависит от качества принимаемых решений для разработки и применения самых передовых методов, моделей, алгоритмов и различных инновационных технологий, учитывающих множество внешних и внутренних факторов.

К настоящему времени для подготовки высококвалифицированных, конкурентоспособных специалистов в различных сферах человеческой деятельности разработано и используется множество высокоэффективных образовательно-педагогических технологий, которые, дополняя друг друга, позволяют достигать требуемого качества образовательного процесса [1–5]. Вместе с тем следует отметить, что в общем случае наличие этих технологий является необходимым, но не достаточным условием для всесторонней и глубокой подготовки современного специалиста и формирования его как гармоничной личности.

В процессе полноценной подготовки высококвалифицированного специалиста необходимо использовать интеграцию всех эффективных и перспективных технологий: образовательно-педагогических, информационно-коммуникационных [6,7], тестирующих, управленческих, ротационных и др. Такая интеграция возможна путем создания и использования ротационно-гибридной модели (РГМ), представляющей собой совокупность оптимально сочетающихся и взаимодействующих современных технологий.

Целью исследования является разработка РГМ и ее программно-алгоритмическая реализация для использования в практике современного образовательного процесса.

Математическое описание ротационно-гибридной модели. РГМ как совокупность различных современных технологий является динамически адаптивной системой с развивающимися в соответствии с изменяющимися требованиями современного общества компонентами. На рис. 1 показана упрощенная схема РГМ, где $O = \{O_p, p = \overline{1, n}\}, |O| = n$ – множество обучаемых; $ID = \{ID_l, l = \overline{1, r}\}, |ID| = r$ – множество изучаемых дисциплин, а также условно представлены следующие технологии:

$СОПТ = \{ОПТ_i, i = \overline{1, m}\}, |СОПТ| = m$ – множество современных образовательно-педагогических технологий;

$СИКТ = \{ИКТ_j, j = \overline{1, k}\}, |СИКТ| = k$ – множество современных информационно-коммуникационных технологий (ИКТ);

$СТТ = \{ТТ_c, c = \overline{1, h}\}, |СТТ| = h$ – множество современных технологий тестирования знаний обучаемых;

$СРТ = \{РТ_\mu, \mu = \overline{1, b}\}, |СРТ| = b$ – множество современных ротационных технологий;

СМК – система менеджмента качества;

$СТПР = \{ТПР_\gamma, \gamma = \overline{1, e}\}, |СТПР| = e$ – множество современных технологий принятия решения;

$СТУ = \{ТУ_\alpha, \alpha = \overline{1, \lambda}\}, |СТУ| = \lambda$ – множество современных технологий управления образовательным процессом.

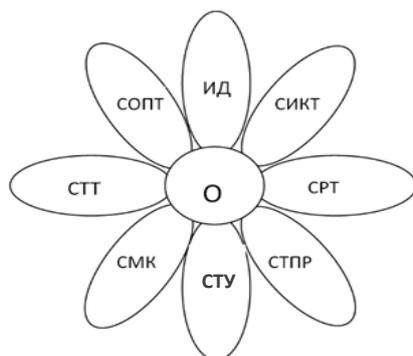


Рис. 1. Представление РГМ

Системный подход и разумное сочетание указанных современных технологий позволит оптимизировать образовательный процесс и усовершенствовать подготовку специалистов в учреждениях образования.

Исходя из вышеизложенного, можно предложить структуру информационно-образовательной системы (ИОС), использующей данную РГМ (рис. 2). Блок входной информации представляет собой объем и уровень знаний, умений и навыков обучаемых, их социокультурные показатели качества. Далее входная информация поступает в блок, обеспечивающий выполнение информационно-образовательного процесса (ИОП) с помощью РГМ. С учетом результатов тестирования уровня знаний каждого O_p при помощи подключения СРТ осуществляется процесс ротации обучаемых с целью изучения наиболее приемлемых для эффективного усвоения подмножеств из ИД, причем эти подмножества могут быть пересекающимися: $ИД_1 \cap ИД_2 \cap \dots \cap ИД_{r-1} \cap ИД_r$.

При завершении процесса ротации с целью максимального усвоения изучаемого материала каждым обучаемым осуществляется ИОП, результатом функционирования которого является выходная информация, содержащая информационно-образовательный и социокультурный ресурс каждого обучаемого. После окончания обучения в учреждении образования специалисты направляются в организации и на предприятия, являющиеся заказчиками специалистов. По истечении определенного срока работы специалиста заказчик через систему менеджмента качества и администрацию учреждения образования запрашивает или рекомендует изменение ИОП и РГМ с учетом своих потребностей, что дает возможность гибко реагировать на изменения требований современного общества.

Проведение процесса ротации позволяет в определенной степени выяснить способности обучаемого к обучению в той или иной сфере знаний. Результат проведения ротации – это закрепление обучающегося, при условии его желания, в той сфере человеческой деятельности, в которой у него наблюдаются относительно максимальные способности.

Тем самым в процессе образовательного процесса создаются достаточно благоприятные условия для подготовки высококвалифицированного специалиста, что позволит получить максимально желаемый результат в деятельности как самого обучающегося (будущего специалиста), так и коллектива организации, где он будет трудиться.

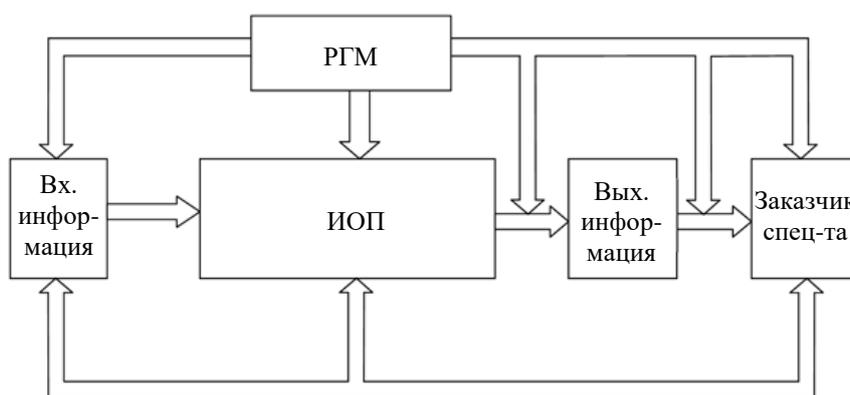


Рис. 2. Структура информационно-образовательной системы

Математические формулировки и обозначения процесса ротации: O – обучающиеся; $Y_1 = \{y_i, i = \overline{1, n}\}, |Y_1| = n$; $Y_2 = \{y'_j, j = \overline{1, m}\}, |Y_2| = m$; ...; $Y_p = \{y^*_l, l = \overline{1, k}\}, |Y_p| = k$ – p -подмножества ребер графа, устанавливающие информационные отношения между O и p -подмножествами изучаемых дисциплин:

$$ИД_1 = \{D_i, i = \overline{1, n}\}, |ИД_1| = n; \quad ИД_2 = \{D'_j, j = \overline{1, m}\}, |ИД_2| = m; \dots;$$

$$ИД_p = \{D^*_l, l = \overline{1, k}\}, |ИД_p| = k.$$

На рис. 3 процесс ротации представлен в виде графовой модели.

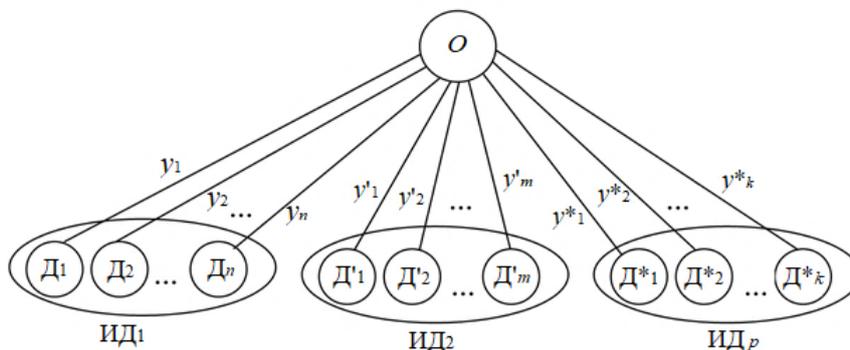


Рис. 3. Графовая модель процесса ротации обучаемых

Процесс ротации обучаемых. Приведем алгоритм процесса ротации:

Шаг 1. Обучаемые изучают последовательно все дисциплины ИД₁.

Шаг 2. Осуществляется тестирование знаний обучаемых по результату выполнения шага 1.

Шаги 3, 4, ..., (p-1), p. Выполняются аналогично предыдущим двум.

Шаг (p+1). В результате выполнения всех p шагов определяется подмножество ИД _{i} , которое максимально эффективно усвоено обучаемым.

На рис. 4 изображена блок-схема алгоритма ротации обучаемых, определяющая для каждого из них предпочтительную сферу обучения S_e , где e – номер S_e , p – максимальное значение e , УЗО – уровень знаний обучающегося.

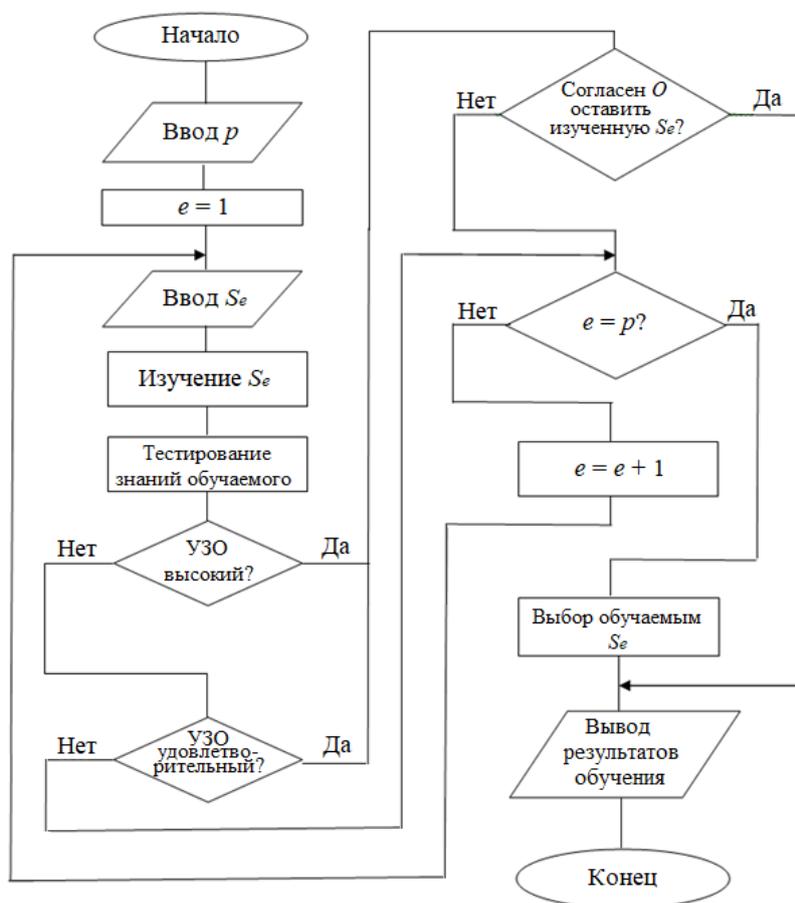


Рис. 4. Блок-схема алгоритма ротации обучаемых

Возможна ситуация, когда ряд дисциплин изучен обучаемым недостаточно. В этом случае можно применить методы парных или групповых перестановок D_j из разных ИД $_i$. Потенциально такие действия могут привести к равномерности уровней усвоения D_j обучающимися O .

Использование описанной выше РГМ позволяет получить в будущем весомый выигрыш в учебной деятельности обучаемого. Для эффективной реализации РГМ необходимо применять современные технологии принятия решений [8, 9], учитывающие различные факторы и образовательные модели, а также использующие новейшие достижения в области современных информационных технологий. Если возникнет задача большой размерности, то ее решение при реализации РГМ потребует применения таких методов, которые легко поддаются алгоритмизации и программному выполнению.

Дерево построения оптимального пути решения задачи. Для оптимального поиска требуемого ИД $_i$ с максимальным усвоением всех D_j , входящих в данные подмножества, предлагается дерево построения оптимального пути решения поставленной задачи (рис. 5).

Реализация экспоненциального алгоритма сложностью $f(p!)$ требует весьма значительного времени. С помощью полиномиального алгоритма поставленная задача определения максимально усвоенного D_j решается значительно быстрее. Оптимальный путь на рис. 5 показан в виде последовательности дуг дерева построения (стрелок), содержащих максимально усвоенные D_j (по одной или, возможно, нескольким максимально усвоенным обучаемым D_i в каждом ИД $_i$). Здесь F_d , $d = \overline{1, p}$, – целевые функции, определяющие одну или несколько максимально усвоенных D_j в каждом ИД $_i$; $O_{дс}$ – оценки результата тестирования знаний обучающегося; $O_{д2}$, $O_{д(m-1)}$, ..., $O_{д*k}$ – максимальные оценки, полученные обучаемым по результатам тестирования.

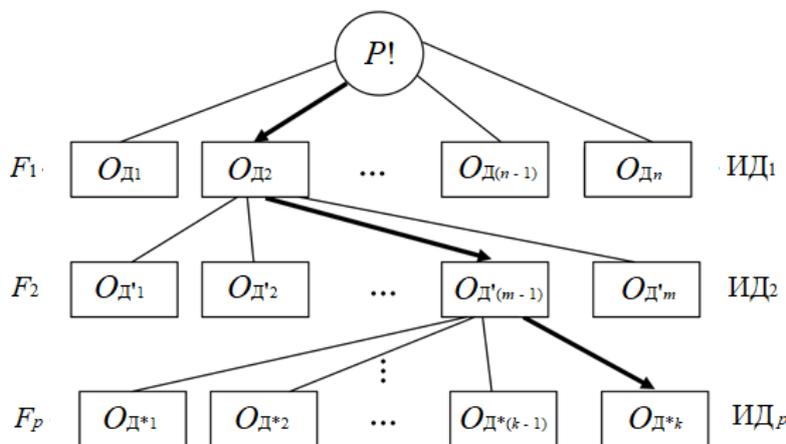


Рис. 5. Дерево построения оптимального пути решения задачи определения ИД $_i$ с максимально усвоенными D_j ($\max D_j$)

Программно-алгоритмическая реализация ротационно-гибридной модели. По предложенным моделям и алгоритмам было разработано универсальное ЭСО, позволяющее реализовывать образовательный процесс как в традиционной, так и в дистанционной формах. Ресурс имеет четыре уровня доступа: администратора ресурса, преподавателей, обучаемых (студентов) и администрации (деканата).

Уровень доступа администратора позволяет управлять всем ресурсом, за исключением контента обучения: настройки прав доступа, верификации доступа, управления потоками обучаемых и назначения изучаемых дисциплин.

Уровень доступа преподавателей позволяет использовать конструктор дисциплин (добавлять преподаваемые дисциплины и наполнять их необходимым учебным контентом, добавлять, редактировать и проверять тесты), отслеживать результаты успеваемости студентов, вести с ними онлайн-консультации, размещать объявления.

Обучаемые имеют доступ к изучаемым дисциплинам и материалам по ним, могут проходить тестирование, задавать вопросы преподавателям в онлайн-чате, читать размещенные объявления.

Пользователи уровня администрации (деканата) имеют возможность отслеживать успеваемость обучаемых, размещать необходимую информацию в виде объявлений и общаться с обучаемыми.

С методической точки зрения процесс изучения дисциплин построен по модульному принципу. Обучаемый изучает каждую дисциплину последовательно модуль за модулем. После изучения модуля обучаемому предлагается пройти контрольное тестирование. В случае его успешного прохождения обучаемый может приступить к изучению следующего модуля дисциплины (рис. 6).

После изучения всех модулей дисциплины обучаемый проходит по ним итоговый тест. Для выполнения самоконтроля обучаемого перед прохождением контрольных тестов по модулям и итогового теста реализована возможность прохождения пробного теста.

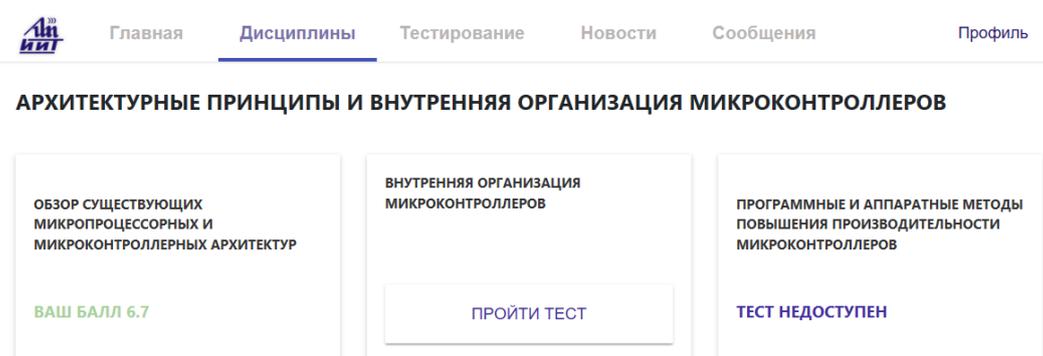


Рис. 6. Модульная организация изучения дисциплины

Разработанный ресурс имеет современный лаконичный и эргономичный дизайн. Преподаватели самостоятельно могут добавлять и редактировать дисциплины, модули в них, обучающий контент модулей, контрольные и пробные тесты по каждому модулю, а также итоговый тест по дисциплине. Учебный материал в соответствии с разработанной моделью может быть представлен в любом виде: от текстово-графического представления до видеофайлов и файлов для скачивания.

Предусмотрено добавление закрытых и открытых тестов. При добавлении закрытого теста преподавателю необходимо отметить правильные варианты ответа. Как для открытого, так и для закрытого тестов преподаватель должен установить минимальный проходной балл, при наборе которого тест считается успешно выполненным. После прохождения закрытого теста обучаемому доступен его результат с отображением вопросов, на которые были даны верные и неверные ответы (рис. 7) для анализа и принятия дальнейшего решения.

Ваш балл 6.7

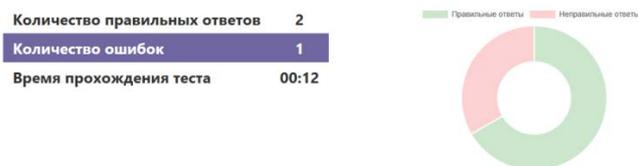


Рис. 7. Результат прохождения закрытого теста

Ответы обучаемого на задания открытого текста отображаются в личном кабинете преподавателя для проверки их правильности. После проверки теста преподавателем результат прохождения теста отображается в личном кабинете обучаемого. Преподавателю, обучаемым и администрации доступна статистика прохождения тестов по конкретному модулю дисциплины по каждому обучаемому. Статистика включает время прохождения теста, количество попыток прохождения теста, количество верных и неверных ответов и минимальный проходной балл.

Заключение. В результате проведенных исследований была представлена графовая модель процесса ротации обучающегося и разработан алгоритм реализации графовой модели процесса ротации, предложена соответствующая модели структура информационно-образовательной системы. Для определения оптимального состава изучаемых дисциплин каждому обучающемуся рекомендуется использовать разумное сочетание современных образовательных, инновационных и информационно-коммуникационных технологий, образующих РГМ.

Предложена древовидная модель с построением минимального пути для оптимального определения максимального усвоения дисциплин обучающимся в каждом их наборе и формирования наиболее приемлемого подмножества изучаемых дисциплин. Представленная РГМ реализована в виде универсального ЭСО, позволяющего осуществлять образовательный процесс, в том числе в дистанционной форме.

В настоящей работе рассмотрен новый подход, заключающийся в создании и использовании РГМ, базирующейся на существующих технологиях. Эффективность этих технологий доказана практикой образовательного процесса. Имеются потенциальные возможности совершенствования полученных результатов с учетом тенденций развития современного общества. РГМ в составе ЭСО внедрена в образовательный процесс на кафедре информационных систем и технологий Института информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Список использованных источников

1. Беляева, О. А. Педагогические технологии в профессиональной школе : учеб.-метод. пособие / О. А. Беляева. – 5-е изд. – Минск : РИПО, 2013. – 60 с.
2. Ильин, М. В. Изучаем педагогику : учеб. пособие / М. В. Ильин. – Минск : РИПО, 2002. – 126 с.
3. Калицкий, Э. М. Разработка средств контроля учебной деятельности : метод. рекомендации / Э. М. Калицкий, М. В. Ильин, Н. Н. Сикорская. – Минск : РИПО, 2016. – 52 с.
4. Селевко, Г. К. Педагогические технологии на основе дидактического и методического усовершенствования учебно-воспитательного процесса / Г. К. Селевко. – М. : Народное образование, 2005. – 288 с.
5. Шамова, Т. И. Управление образовательным процессом в адаптивной школе / Т. И. Шамова, Т. М. Давыденко. – М. : Центр «Педагогический поиск», 2001. – 384 с.
6. Скудняков, Ю. А. Формально-логическое обеспечение компьютеризации современного процесса обучения / Ю. А. Скудняков // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития : материалы VI Междунар. науч.-метод. конф., Минск, 28–29 нояб. 2012 г. – Минск : БГУИР, 2012. – С. 281–282.
7. Скудняков, Ю. А. Современные формы образовательного процесса / Ю. А. Скудняков, Н. Н. Гурский // Информационные технологии в технических и социально-экономических системах : материалы науч.-техн. конф., Минск, 22 апр. 2015 г. – Минск : РИВШ, 2015. – С. 71–76.
8. Фатхутдинов, Р. А. Управленческие решения : учеб. / Р. А. Фатхутдинов. – М. : Инфра-М, 2007. – 352 с.
9. Скудняков, Ю. А. Выбор информационного ресурса и оценка качества его изучения в системе дистанционного обучения / Ю. А. Скудняков, А. Г. Савенко, А. В. Матвеев // Дистанционное обучение – образовательная среда XXI века : материалы X Междунар. науч.-метод. конф., Минск, 7–8 дек. 2017 г. – Минск : БГУИР, 2017. – С. 83.

References

1. Belyaeva O. A. *Pedagogicheskie tehnologii v professionalnoj shkole. Pedagogical Technologies in a Vocational School.* Minsk, Respublikanskij institut professional'nogo obrazovanija, 2013, 60 p. (in Russian).
2. Il'in M. V. *Izuchaem pedagogiku. Studying Pedagogy.* Minsk, Respublikanskij institut professional'nogo obrazovanija, 2002, 126 p. (in Russian).

3. Kalitskij E. M., Il'in M. V., Sikorskaya N. N. Razrabotka sredstv kontrolya uchebnoj deyatel'nosti. *Development of monitoring tools for educational activities*. Minsk, Respublikanskij institut professional'nogo obrazovaniya, 2016, 52 p. (in Russian).
4. Selevko G. K. Pedagogicheskie tehnologii na osnove didakticheskogo i metodicheskogo usovershenstvovaniya uchebno-vospitatel'nogo protsesssa. *Pedagogical Technologies Based on Didactic and Methodological Improvement of the Educational Process*. Moscow, Narodnoe obrazovanie, 2005, 288 p. (in Russian).
5. Shamova T. I., Davydenko T. M. Upravlenie obrazovatel'nym protsessom v adaptivnoj shkole. *Management of the Educational Process in an Adaptive School*. Moscow, Tsentr "Pedagogicheskij poisk", 2001, 384 p. (in Russian).
6. Skudnyakov Yu. A. Formal'no-logicheskoe obespechenie komp'uterizatsii sovremennogo protsesssa obucheniya [Formal and logical support of computerization of the modern learning process]. Vyshee tehnikeskoe obrazovanie: problem i puti razvitiya : materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferentsii, Minsk, 28–29 nojabrja 2012 g. [*Engineering Education: Challenges and Developments: Materials of the VI International Scientific and Methodological Conference, Minsk, 28–29 November 2012*]. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2012, pp. 281–282 (in Russian).
7. Skudnyakov Yu. A., Gurskij N. N. Sovremennye formy obrazovatel'nogo protsesssa [Modern forms of the educational process]. Informatsionnye tehnologii v tehnikeskikh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemah : materialy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Minsk, 22 aprelja 2015 g. [*Information Technologies in Technical and Socio-Economic Systems: Materials of the Scientific and Technical Conference, Minsk, 22 April 2015*]. Minsk, Respublikanskij institut vysshej shkoly, 2015, pp. 71–76 (in Russian).
8. Fathutdinov R. A. Upravlencheskie resheniya. *Management Decisions*. Moscow, Infra-M, 2007, 352 p. (in Russian).
9. Skudnyakov Yu. A., Savenko A. G., Matveev A. V. Vybor informatsionnogo resursa i otsenka kachestva ego izucheniya v sisteme distantsionnogo obucheniya [Choosing an information resource and assessing the quality of its study in the distance learning system]. Distantsionnoe obuchenie – obrazovatel'naya sreda XXI veka : materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferentsii, Minsk, 7–8 dekabrja 2017 g. [*Distance Learning – Educational Environment of the XXI Century: Materials of the X International Scientific and Methodological Conference, Minsk, 7–8 December 2017*]. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2017, p. 83 (in Russian).

Информация об авторах

Савенко Андрей Геннадьевич, аспирант, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий, факультет компьютерных технологий, Институт информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
E-mail: savenko@bsuir.by

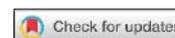
Скудняков Юрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий, факультет компьютерных технологий, Институт информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
E-mail: juri_alex@tut.by

Information about the authors

Andrei G. Savenko, Postgraduate Student, Senior Lecturer, Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Computer Technologies, Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: savenko@bsuir.by

Yuri A. Skudnyakov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Computer Technologies, Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
E-mail: juri_alex@tut.by

БИОИНФОРМАТИКА BIOINFORMATICS



УДК 004.6
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-105-122>

Оригинальная статья
Original Paper

Комплексный анализ данных при исследовании сложных биомолекулярных систем

Н. Н. Яцков[✉], В. В. Апанасович

Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Беларусь
[✉]E-mail: yatskou@bsu.by

Аннотация. Развитие биомолекулярных технологий напрямую связано с разработкой эффективных методов и алгоритмов обработки большого объема информации, получаемой с помощью современного высокопроизводительного экспериментального оборудования. В числе приоритетных задач – разработка перспективных инструментов анализа и интерпретации биофизической информации с использованием методов анализа больших данных и компьютерных моделей.

Предложен комплексный подход к обработке больших наборов данных на основе методов интеллектуального анализа данных и имитационного моделирования, позволяющий определять параметры биофизических и оптических процессов, происходящих в сложных биомолекулярных системах. Идея комплексного подхода состоит в использовании имитационного моделирования биофизических процессов, протекающих в объекте исследования, сравнении отобранных методами снижения размерности смоделированных и наиболее информативных экспериментальных данных, определении характеристик исследуемых процессов с применением алгоритмов интеллектуального анализа данных.

Рассмотрено применение разработанного подхода для исследования биомолекулярных систем в экспериментах флуоресцентной спектроскопии. Эффективность алгоритмов подхода проверена в ходе анализа смоделированных и экспериментальных данных, представляющих системы молекул и белков. Применение комплексного анализа повышает эффективность исследования биофизических систем в ходе анализа больших данных.

Ключевые слова: биомолекулярная система, биофизические процессы, имитационное моделирование, интеллектуальный анализ данных, флуоресцентная спектроскопия с временным разрешением, флуоресцентная флукуационная спектроскопия

Для цитирования. Яцков, Н. Н. Комплексный анализ данных при исследовании сложных биомолекулярных систем / Н. Н. Яцков, В. В. Апанасович // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 105–122. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-105-122>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 04.11.2020
Подписана в печать | Accepted 05.01.2021
Опубликована | Published 26.03.2021

Data analysis in complex biomolecular systems

Mikalai M. Yatskou[✉], Vladimir V. Apanasovich

Belarusian State University,
av. Nezaliezhnasti, 4, 220030, Minsk, Belarus
[✉]E-mail: yatskou@bsu.by

Abstract. The biomolecular technology progress is directly related to the development of effective methods and algorithms for processing a large amount of information obtained by modern high-throughput experimental equipment. The priority task is the development of promising computational tools for the analysis and interpretation of biophysical information using the methods of big data and computer models.

An integrated approach to processing large datasets, which is based on the methods of data analysis and simulation modelling, is proposed. This approach allows to determine the parameters of biophysical and optical processes occurring in complex biomolecular systems. The idea of an integrated approach is to use simulation modelling of biophysical processes occurring in the object of study, comparing simulated and most relevant experimental data selected by dimension reduction methods, determining the characteristics of the investigated processes using data analysis algorithms.

The application of the developed approach to the study of bimolecular systems in fluorescence spectroscopy experiments is considered. The effectiveness of the algorithms of the approach was verified by analyzing of simulated and experimental data representing the systems of molecules and proteins. The use of complex analysis increases the efficiency of the study of biophysical systems during the analysis of big data.

Keywords: biomolecular system, biophysical processes, simulation modelling, data analysis, time-resolved fluorescence spectroscopy, fluorescence fluctuation spectroscopy

For citation. Yatskou M. M., Apanasovich V. V. Data analysis in complex biomolecular systems. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 105–122 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-105-122>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Стремительное развитие компьютерных технологий, вычислительных систем, экспериментального оборудования и облачных хранилищ информации дало толчок активному внедрению технологий интеллектуального анализа данных (ИАД, от англ. data mining) и имитационного моделирования [1–6]. Появление методов ИАД связано с необходимостью обработки информации, накапливаемой в современных хранилищах, и поиска новых знаний или закономерностей, не поддающихся обнаружению стандартными методами статистического анализа или экспертным путем [7–11]. Использование методов имитационного моделирования [12, 13] в ходе анализа больших данных открывает новые возможности перед аналитиками, исследователями и инженерами в области высокотехнологичных междисциплинарных исследований (биоинформатики [14], биомедицины [15], фармацевтики [16], пищевой промышленности [17], биофотоники [18], энергетики [19], аэрокосмических систем [20]), так как обуславливает низкую стоимость проведения вычислительных экспериментов в сравнении с реальными экспериментами при относительно высокой скорости вычислений (с учетом применения высокопроизводительных распределенных вычислений), позволяет моделировать систему практически любой сложности и проводить вычислительные эксперименты, труднодостижимые на практике. В числе основных задач следует отметить разработку перспективных методов анализа, интерпретации и хранения биофизической информации, создание инфраструктуры для приема, обработки и распространения результатов экспериментальных исследований.

Классический анализ больших наборов биофизических данных заключается в отдельной обработке каждого набора данных с использованием аналитических моделей (например, в ходе анализа данных флуоресцентной спектроскопии [21, 22]) и имеет ряд ограничений: трудно применим, когда аналитической модели не существует или вывод аналитического решения затруднен ввиду возрастающей сложности системы; не учитывает стохастичность моделируемой системы, что особенно важно в ходе решения задач анализа больших данных, связанных с «проклятием размерности»; теряет точность в оценке параметров моделей в условиях высоко-

го экспериментального шума, что характеризуется появлением локальных минимумов на поверхности целевой функции; необходимы значительные временные и вычислительные ресурсы для выполнения процедур моделирования и поиска параметров моделей; возникает сложность выбора начальных приближений в процедурах оценки параметров. Полным или частичным путем устранения перечисленных выше ограничений является применение алгоритмов интеллектуального анализа данных и имитационного моделирования. Использование методов интеллектуального анализа данных вместе с алгоритмами имитационного моделирования требует создания нового подхода для решения задач комплексного анализа биофизической информации в современных экспериментах и сверхбольших хранилищах данных [23–25].

В работе предлагается комплексный подход на основе методов интеллектуального анализа данных и имитационного моделирования для исследования биомолекулярных систем. Особенностью подхода является применение алгоритмов имитационного моделирования для воспроизведения процессов в исследуемых системах, что устраняет недостатки классического подхода и позволяет повысить точность оценки исследуемых характеристик биофизических процессов; углубить знания о физике и механизмах исследуемых процессов; создать новые инструменты прогнозирования, когда адекватных аналитических моделей не существует или вывод аналитических решений затруднен ввиду возрастающей сложности системы, представляемой большими данными. Интеграция алгоритмов ИАД способствует более точному определению закономерностей, получаемых в результате анализа больших экспериментальных данных, которые невозможно определить классическими методами статистического анализа, основанными на использовании аппроксимационных моделей, не учитывающих физику процессов.

Методология. Предполагается, что через серию экспериментов, порождающих наборы больших данных, исследуется некоторый биофизический объект, сущностные признаки, или характеристики, которого, например набор биофизических параметров A , должны быть определены в ходе анализа данных. В комплексном подходе к наборам многомерных данных применяются алгоритмы интеллектуального анализа с целью выделения наиболее информативных или существенных данных для последующего глубокого изучения и нахождения оценок параметров A с использованием имитационных моделей. Рассмотрим основные компоненты комплексного подхода.

Данные. Данные в биофизических экспериментальных исследованиях можно условно разделить на три большие группы: данные в текстовом виде, содержащие, например, закодированные последовательности нуклеотидов; данные описательного или категориального типа, например аннотации биологических элементов; численные данные, представляющие, например, оценку экспрессии генов [26, 27]. Указанные группы данных можно успешно преобразовать в единый набор или табличный вид с использованием процедур предварительной обработки данных или специальных преобразований, в частности алгоритмов векторизации символьных последовательностей [28, 29].

Пусть имеются N наблюдений, примеров или измерений $H_E = \{E_1, E_2, \dots, E_N\}$ объекта исследования E , размещенные в базе данных или получаемые в реальном физическом эксперименте. Рассмотрим формализацию проведения эксперимента по исследованию изучаемого объекта (рис. 1).



Рис. 1. Схема исследования объекта в физическом эксперименте

Будем предполагать, что эксперимент объединяет набор датчиков для регистрации некоторых свойств наблюдений объекта. Регистрируемые свойства будем далее называть признаками, атрибутами или переменными. Признаки могут быть двух видов. Первые (обозначим их X)

представляют собой независимые измерения, в том числе и воздействия извне, задаваемые исследователем, который планирует эксперимент (сюда можно отнести и время как сигнал, привязку наблюдения). Вторые (обозначим их Y) представляют собой измерения в зависимости от выбранных значений признаков первой группы. Независимые измерения X принято называть признаками объектов, а зависимые Y – целевыми переменными, определяющими решения задач анализа данных [30]. В результате измерения свойств наблюдений регистрируется набор данных (X, Y) , объединяющий K независимых и R зависимых признаков наблюдений:

$$\eta(X, Y) \neq 0, \quad (1)$$

где η – некая мера взаимосвязи X и Y , например ковариация.

Измерения над объектами формируют векторы признаков X_1, X_2, \dots, X_K и матрицу входных данных X . Измерения над объектами при фиксированных значениях X_1, X_2, \dots, X_K формируют векторы целевых признаков или выходных характеристик Y_1, Y_2, \dots, Y_R и матрицу выходных данных Y . Таким образом, наблюдения H_E характеризуются наборами $H_X = \{X_1, X_2, \dots, X_K\}$ результатов измерений свойств объекта и наборами $H_Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_R\}$ результатов измерений свойств объекта при фиксированных значениях H_X . Структура данных объекта рассматривается в терминах заданных признаков X и зависимых переменных Y .

Данные (X, Y) , получаемые из реального эксперимента, представим в виде таблицы, содержащей регистрируемые значения свойств объекта исследования.

Набор многомерных данных, регистрируемый в некотором физическом эксперименте и представляющий наблюдения или измерения H_E объекта исследования E

H_E	X				Y			
	X_1	X_2	...	X_K	Y_1	Y_2	...	Y_R
E_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1K}	y_{11}	y_{12}	...	y_{1R}
E_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2K}	y_{21}	y_{22}	...	y_{2R}
...
E_N	x_{N1}	x_{N2}	...	x_{NK}	y_{N1}	y_{N2}	...	y_{NR}

Модель взаимосвязи в данных может быть представлена в виде выражения

$$Y = \Xi(X), \quad (2)$$

где Ξ – набор операторов соответствий, переводящий независимые признаки X в зависимые переменные Y .

Интеллектуальный анализ данных. Рассмотрим постановку задачи анализа данных. Общая задача анализа данных состоит в нахождении функциональных преобразований Π (оценок соответствий Ξ) и их параметров Θ , преобразующих исходный набор признаков X в теоретический набор зависимых характеристик

$$Y^T = \Pi(X, \Theta), \quad (3)$$

таких, чтобы выполнялось условие минимальности отличия наблюдаемых выходных характеристик Y от теоретических Y^T .

Под моделями интеллектуального анализа данных будем понимать математические модели, обеспечивающие решение задач (2) и (3), т. е. функциональные преобразования (для параметрических моделей) $\mathcal{M} = \{\Pi(X, \Theta) \mid \Theta \in D_\Theta\}$, где $\Pi: X \times \Theta \rightarrow Y$, D_Θ – множество допустимых значений параметров Θ , или пространство параметров. Отметим, что модельные параметры Θ в общем случае не совпадают с физическими параметрами A .

На практике такие модели строятся исходя из имеющихся известных экспериментальных данных, представляющих так называемые экспертно-размеченные, эталонные или обучающие данные. Особенность моделей ИАД состоит в отсутствии рассмотрения физических основ про-

теkania процессов в исследуемом объекте или, как метко отмечено в [31], «в решении задачи, не проникая в суть предмета». Модель строится по так называемым прецедентам – имеющимся примерам, на основе оценок поведения которых планируется предсказание поведения объекта в будущем. Наиболее популярными моделями ИАД являются кластерные алгоритмы, деревья решений, ассоциативные правила, математические функции (аналитические модели), нейронные сети [30].

В качестве методов интеллектуального анализа данных будем рассматривать вычислительные алгоритмы μ нахождения оценок неизвестных параметров Θ моделей ИАД, т. е. метод – это отображение $\mu: X \times Y \rightarrow \mathcal{M}$, которое произвольной конечной выборке данных (X, Y) ставит в соответствие некоторый алгоритм определения параметров Θ , таких, чтобы выполнялось условие минимальности отличия наблюдаемых выходных характеристик Y от теоретических Y^T . Наиболее популярными методами ИАД являются статистический анализ (регрессионный и дисперсионный анализ, снижение размерности данных), классификация и прогнозирование (искусственные нейронные сети, деревья решений, k -ближайшие соседи, байесовские сети), кластерный анализ, оптимизация, поиск ассоциативных правил и визуализация данных [30].

Схема интеллектуального анализа данных эксперимента изображена на рис. 2. Общую задачу анализа данных можно разделить на составляющие, формирующие основу интеллектуального анализа данных. К основным задачам ИАД относятся классификация, регрессия, кластерный анализ, снижение размера и размерности данных, поиск ассоциативных правил и визуализация [30].

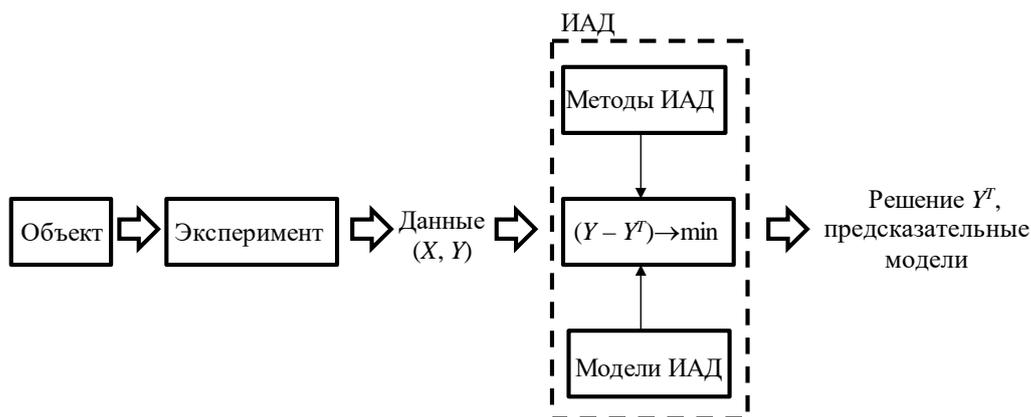


Рис. 2. Схема исследования объекта в эксперименте с использованием интеллектуального анализа данных

Важной особенностью моделей ИАД является то, что с их помощью можно построить предсказательную модель и получить точное решение задачи. Часто этого достаточно, например, для классификации изображений клеток раковых опухолей или многоэкспоненциального сглаживания кинетических кривых затухания флуоресценции [32–34]. Недостатком данного подхода является невозможность воспроизведения детального описания физических процессов, протекающих в объекте исследования. Для устранения указанного недостатка необходимо использовать физические модели, например, на основе имитационного моделирования.

Имитационное моделирование. Основу имитационного моделирования составляют методы Монте-Карло [35–37], которые являются стохастическими способами моделирования и основываются на использовании случайных чисел и статистических вероятностей для решения прикладных задач. Традиционно методы Монте-Карло находят приложения в двух направлениях: при проверке достоверности приближенных решений, полученных в результате аналитических вычислений, т. е. для подтверждения разработанных теорий численным экспериментом [22, 38]; для сравнения смоделированных и экспериментальных данных с последующей более глубокой интерпретацией данных в терминах имитационных моделей [39, 40]. В представленной работе рассматривается второе направление приложений методов имитационного моделирования.

В ходе моделирования объект исследования E может быть рассмотрен как биофизический процесс (например, перенос энергии электронного возбуждения в молекулярной системе или полимеризация белка актина в клетке) либо биомолекулярная система (молекулы, клетки или группы клеток). Пусть объект E описывается математической (аналитической или имитационной) моделью M (рис. 3).

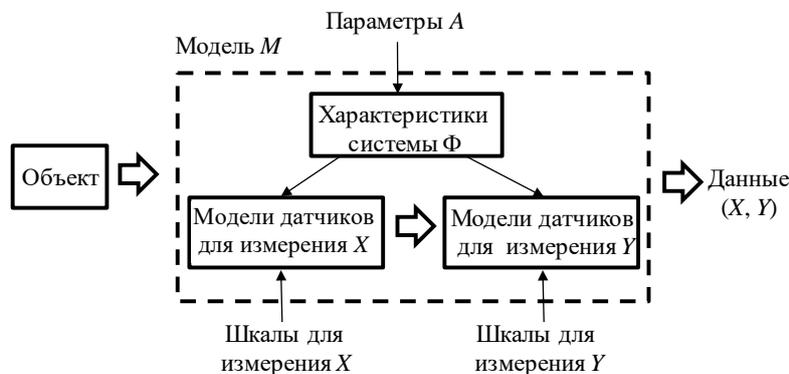


Рис. 3. Схема математической модели объекта исследования

При построении математической модели необходимо учесть шкалы измерений признаков свойств объекта X и характеристики состояний системы Φ (системы уравнений или моделирующих алгоритмов, описывающих поведение объекта) при заданных значениях физических параметров модели A . Характеристики состояний системы Φ представлены матрицей признаков X , в том числе компонентов откликов системы или выходных сигналов Y . Тогда математическую модель объекта можно представить в виде выражения

$$M = \{X, \Phi, A, F\}, \quad (4)$$

где F – оператор функциональных преобразований

$$Y = F(X, A). \quad (5)$$

Математическая модель описывает реальные процессы, протекающие в исследуемом объекте. Она может быть представлена в виде «белого ящика», так как учитывает физику протекающих процессов в объекте наблюдения. Набор данных для последующего анализа представляет собой таблицу характеристик состояний системы X и выходные сигналы Y . На начальный момент исследования внутренняя структура и взаимосвязи между компонентами объекта E известны. Задача состоит в том, чтобы уточнить функциональные зависимости F и оценить параметры модели A . Следует отметить, что модели «черного ящика» \mathcal{M} [31, 41] в виде моделей ИАД представляют собой аналитические аппроксимационные модели ($F = \Pi$, параметры Θ), не учитывающие физику исследуемого процесса.

Комплексный подход к анализу больших данных. В работе предлагается использовать методы интеллектуального анализа больших данных и имитационного моделирования для исследования биомолекулярных систем и решения задач оптимизации биофизических экспериментов, особенностью которых является применение алгоритмов имитационного моделирования для воспроизведения биофизических процессов в исследуемых системах. Идея комплексного подхода состоит в изучении объекта исследования с применением имитационного моделирования биофизических процессов, протекающих в объекте исследования; сравнении смоделированных и наиболее информативных экспериментальных данных, отобранных методами по снижению размерности данных; определении параметров физических процессов с использованием алгоритмов оптимизации.

Схема исследования объекта (некоторого биофизического процесса или биомолекулярного соединения) с использованием разработанного комплексного подхода изображена на рис. 4.

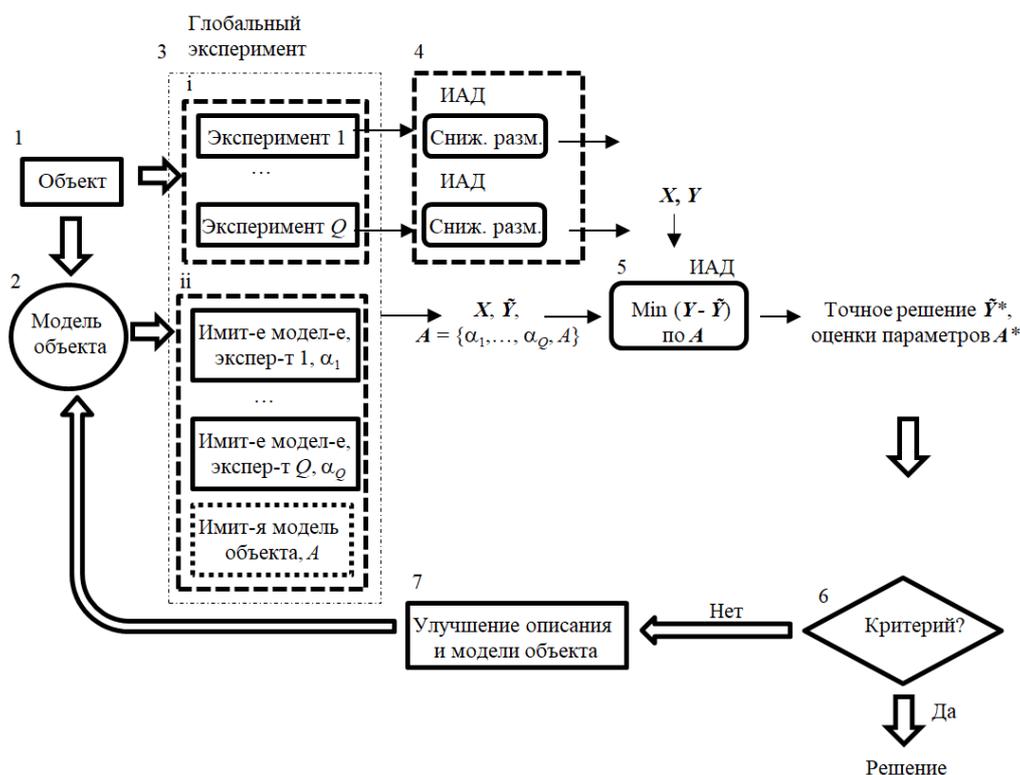


Рис. 4. Схема исследования объекта с использованием разработанного комплексного подхода

Исследование объекта (блок 1) проводится посредством рассмотрения физической модели объекта (блок 2) и серии из Q реальных и смоделированных экспериментов, формирующих глобальный эксперимент (блок 3). В блоке 4 происходит преобразование данных отдельных экспериментов с целью сведения к единому формату и устранения неоднородностей различных искажений, связанных с конкретными экспериментами. Осуществляются фильтрация, нормировка, векторизация или специальные преобразования данных, например логарифмическая трансформация данных с целью снижения эффекта влияния аномальных значений или выбросов [30, 31]. Наборы преобразованных данных из различных экспериментов собираются в сводный, или объединенный, набор данных (X, Y) (блок 5) для последующей обработки с помощью методов интеллектуального анализа данных и имитационного моделирования. Параметры отдельных экспериментов $\alpha_1, \dots, \alpha_Q$ и модели объекта A собираются в единый набор A и затем уточняются в ходе последующего анализа объединенных данных. Анализ отдельных экспериментов может быть осуществлен независимо или комплексно. Достоинством комплексного анализа является объединение данных (выборок) из различных экспериментов в один большой набор, что обеспечивает обобщение и увеличение статистической мощности результатов и, как следствие, повышение точности последующего анализа. В ходе комплексного анализа некоторые параметры A фиксируются (являются глобальными для проводимых экспериментов), ограничиваются (в случае зависимых экспериментов) или остаются свободными для точной оценки с помощью методов оптимизации. С помощью методов интеллектуального анализа данных производится их сжатие с целью исключения неинформативных, избыточных данных или шума и выделяются существенные информативные данные. Методами оптимизации производится оценка свободных или настраиваемых параметров A^* глобальной имитационной модели объекта, построенной на основе моделей отдельных экспериментов. Если достигается желаемая точность соответствия экспериментальных и смоделированных данных, которая определяется по заданному статистическому критерию в блоке 6, то процесс анализа завершается и предоставляется решение (оцененный набор параметров и точная математическая модель объекта, способная давать прогноз поведения объекта в пределах заданной точности). В противном случае

в блоке 7 осуществляется улучшение описания объекта, включающее углубление детализации формализации поведения объекта; сбор новых данных; изменение моделей; проведение дополнительных экспериментов; изменение параметров объекта, среды или окружения и переход к блоку 2 для выполнения следующей итерации анализа данных. Представленная схема является общим подходом, конкретная реализация определяется типом решаемой задачи и должна быть сконструирована с учетом специфики проводимого эксперимента.

В комплексном подходе следует использовать различные методы и алгоритмы, двигаясь от простых моделей к сложным, выполняя постепенное усложнение моделей и увеличивая степень детализации рассматриваемых процессов. При работе с большими данными необходимо выбирать адекватный уровень детализации математической модели, соответствующий желаемой глубине исследования объекта, объему наборов данных и мощности имеющихся в наличии вычислительных ресурсов.

Анализ ошибок. При проведении компьютерного моделирования важным является подтверждение адекватности имитационных моделей, надежности, достоверности и воспроизводимости полученных результатов, а также достижение желаемой точности моделирования. В предположении, что подобраны оптимальные параметры модели, можно рассматривать три ступени подтверждения ее адекватности, т. е. модель должна соответствовать следующим требованиям [12, 13, 22, 25]:

1) быть физической, базироваться на рассмотрении физики процессов «из первых принципов», что включает подбор наиболее точных законов описания вероятностей распределений для рассматриваемых случайных величин и процессов;

2) подтверждаться аналитическим описанием или экспериментом в определенных контрольных условиях, проверкой различных балансных уравнений, внутренними техническими проверочными тестами алгоритмов. В литературных источниках данное требование часто именуется верификацией моделей;

3) подтверждаться экспериментально, например обеспечивать минимальную ошибку при сравнении с экспериментальными данными по некоторому заранее установленному статистическому критерию. При условии выполнения первого и второго требования критерий позволяет оценить валидность или адекватность моделей. Возможны следующие результаты проверки:

а) значение критерия неприемлемо для подтверждения статистической значимости модели. Следовательно, модель не подтверждена экспериментальными данными и предполагается неадекватной. Неадекватность может быть следствием неоптимального подбора параметров модели или же неточности модели. Неадекватность следует устранять уточнением параметров модели, расширением формализации моделируемых процессов, переходом на более глубокий уровень детализации рассмотрения или же полной заменой модели, добиваясь улучшения значения критерия;

б) критерий принимает оптимальные значения для большого набора моделей, что соответствует ограниченности выбранного критерия или избыточности моделей (например, в задачах анализа кривых затухания флуоресценции – это большое число экспонент, полином высокой степени, многослойная нейронная сеть, имитационная модель с учетом моделирования незначимых процессов, не влияющих на выходную характеристику);

в) критерий экстремально или излишне точно стремится к наилучшему значению, что соответствует переобучению модели. Ситуация характерна для переобучения регрессионной модели при аппроксимации экспериментального шума в данных – модель теряет важное свойство обобщения.

Оценка наиболее достоверной модели производится с помощью алгоритмов перекрестной, или бутстрэп (от англ. bootstrap), проверки [42, 43].

Примеры биофизических систем для исследования в ходе комплексного анализа данных. Рассмотрим возможности применения комплексного подхода к анализу больших данных на примерах систем молекул, биополимеров, белков и клеток, изучаемых методами прикладной спектроскопии и представляющих группы данных, связанные с процессами переноса энергии электронного возбуждения на уровне молекул и их соединений, с генными процессами на

уровне молекул ДНК (РНК) и с процессами полимеризации белков на уровне клеток. Перечисленные системы и процессы изучаются при построении молекулярных фотонных антенных систем и при диагностике онкологических заболеваний, их объединяет такая область экспериментальных исследований, как прикладная флуоресцентная спектроскопия. В ходе проводимых экспериментов исследуется флуоресценция молекулярных соединений или люминесцентных красителей, маркирующих молекулы образцов. Образцы подвергаются лазерному излучению на длине волны возбуждения молекул или красителей, затем регистрируется интенсивность испускаемой флуоресценции. По интенсивности испускаемой флуоресценции исследуются процессы и молекулярные системы. Общим в исследовании объектов указанных систем является область экспериментальных методов получения данных; формализация описания объектов и их наблюдений; алгоритмы анализа и моделирования; математические модели, используемые для описания биофизических процессов; формализм представления данных (см. таблицу). В статье будем придерживаться следующей схемы описания системы: объект исследования – наблюдения или измерения объекта – признаки – постановка решаемой задачи в терминах комплексного подхода. Рассмотрим подробнее примеры биофизических систем.

Молекулы. Объектом исследования является процесс переноса энергии в искусственно созданных молекулярных системах [44, 45]. Измерения объекта – это оптические спектры и кривые затухания флуоресценции, регистрируемые для исследуемых молекулярных соединений при заданных экспериментальных условиях. Признаки – длины волн поглощения (испускания), временные отсчеты регистрации фотонов на детекторе, физико-химические параметры, характеризующие экспериментальные образцы (концентрация молекул, тип раствора, температура, день измерения и пр.). Зависимая переменная – интенсивность флуоресценции в заданные моменты времени при определенных значениях длин волн возбуждения и испускаемой. Решается задача регрессии, нахождения модели и ее параметров, удовлетворительно описывающих кинетические кривые затухания флуоресценции. Производится имитационное моделирование процессов переноса энергии электронного возбуждения в молекулярных системах. В комплексном подходе осуществляется группировка кривых затухания флуоресценции, нахождение медоидов кластеров кривых затуханий, анализ кривых с использованием имитационных моделей, результатом которых являются оцененные параметры процессов переноса энергии. Различные кластеры кривых затуханий связываются с молекулярными соединениями на основе оцененных параметров. В случае наличия малого набора кривых затуханий флуоресценции комплексный подход сводится к отдельному анализу кривых затуханий с использованием имитационных моделей по схеме подхода на основе имитационного моделирования [46].

Биополимеры молекул ДНК (РНК). Объектом исследования являются биофункции и регуляторные механизмы, определяющие свойства молекул ДНК и РНК при производстве белков в клетках [47–49]. Регистрируются нуклеотидные последовательности молекул в результате проведения экспериментов геномного секвенирования с использованием люминесцирующих маркеров [50, 51]. Решаются такие задачи, как определение кодирующих и не кодирующих белков молекул РНК, нуклеотидных фрагментов открытых рамок считывания (ОРС) и возможных альтернативных транскриптов РНК онкогенов [52–54].

В задачах определения вида РНК и фрагментов ОРС наблюдениями объекта являются молекулы РНК и ОРС-кандидаты, признаками – параметры, полученные путем векторизации нуклеотидных последовательностей, зависимыми переменными – метки типов РНК и наиболее вероятных ОРС. При использовании имитационного моделирования воспроизводятся молекулярные процессы, кодирующие тот или иной белок. Комплексный анализ позволяет определить виды молекул и открытые рамки считывания в кодирующих РНК.

В изучении механизмов формирования транскриптов РНК онкогенов в результате альтернативного сплайсинга наблюдениями объекта являются транскрипты вариантов альтернативного сплайсинга, представленные метками экзонов. Признаки – экзоны генов, участвующие в формировании того или иного варианта сплайсинга. Зависимая переменная – вероятности событий альтернативного сплайсинга. Моделируется процесс появления событий альтернативного сплайсинга. В ходе комплексного анализа необходимо предсказать наиболее вероятный альтернативный транскрипт РНК.

Гены. Объектом исследования являются гены и их взаимосвязь (генные сети), определяющая ту или иную функцию организма [48, 49]. Измерения объекта – величины экспрессии генов, полученные в результате экспериментов с биочипами ДНК или генного секвенирования [50, 51, 55]. Признаки – условия или проводимые эксперименты по измерению экспрессии генов. Зависимая переменная – уровень дифференциальной экспрессии гена, маркеры наличия или отсутствия заболевания, типа или стадии заболевания. Производится имитационное моделирование процессов генной регуляции в клетке. Решается задача определения модели классификации и ее параметров, как можно более точно описывающих изменение экспрессии генов.

Белки. Объектом исследования являются процессы диффузии и агрегации белков в различных окружениях (например, белков, вовлеченных в формирование раковых клеток [56, 57]). В экспериментах флуоресцентной флукуационной спектроскопии регистрируется интенсивность флуоресценции молекулярных комплексов, что позволяет оценить размер белкового комплекса [58]. Наблюдения объекта – гистограммы числа фотоотчетов (ГЧФ) измерений флукуаций интенсивности флуоресценции для окрашенных белков на заданном временном интервале регистрации. Признаки – каналы гистограмм, представленные частотами появления числа фотонов в течение некоторого короткого интервала времени. Зависимая переменная – маркер вида белка или молекулярного комплекса. Производится имитационное моделирование процессов диффузии и агрегации белков. В комплексном подходе осуществляется группировка ГЧФ, нахождение медоидов кластеров ГЧФ и анализ ГЧФ с использованием имитационных моделей, результатом которых являются оцененные параметры процессов диффузии и агрегации белков.

В экспериментах флуоресцентной спектроскопии в клетках (*in vitro* и *in vivo*) анализ флуоресценции позволяет оценить параметры реакций ассоциации и диссоциации (или в общем случае полимеризации) к молекулярным комплексам белков [59, 60]. Наблюдения – кинетические кривые нарастания и восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания белков. Признаки – время наступления регистрируемых событий флуоресценции окрашенного белка. Зависимая переменная – флуоресценция белка, регистрируемая в указанные моменты времени. Решается задача регрессии, а именно нахождения модели полимеризации белков и ее параметров, удовлетворительно описывающих интенсивность флуоресценции. Производится имитационное моделирование процессов полимеризации белка в клетке. В комплексном подходе выполняется обработка кривых флуоресценции, нахождение медоидов кластеров данных и их анализ с использованием имитационных моделей, результатом которых являются оцененные параметры процессов полимеризации белков.

Клетки. Объектом исследования является раковое заболевание, определяемое по характеристикам микрообъектов клеток на люминесцентном изображении [61, 62]. Наблюдения объекта – выделенные (сегментированные) на изображении клетки (контуры ядер или цитоплазм клеток), подверженные или не подверженные заболеванию. Признаки (свойства сегментированных микрообъектов на изображении) – характеристики клетки, полученные в результате сегментации контуров клеток (размер, цвет, ориентация и пр. [32]). Зависимая переменная – маркер типа клетки (раковая (нераковая)) или стадия заболевания. Решается задача классификации клеток на раковые (нераковые) или определения стадии заболевания. Имитационное моделирование воспроизводит стадии заболевания с заданными параметрами. В комплексном подходе производится моделирование стадий онкозаболевания, определяются профили параметров, соответствующих раковым (нераковым) клеткам, микрообъекты изображений классифицируются к тому или иному виду клеток, подверженных определенной стадии заболевания. Имитационное моделирование может и не использоваться, если заданы экспертные решения в виде размеченных изображений раковых клеток.

Применение комплексного подхода к анализу молекулярных систем. Рассмотрим два примера, подтверждающие принципиальную применимость разработанного комплексного подхода к анализу систем молекул и белков, исследуемых в экспериментах флуоресцентной спектроскопии.

Флуоресцентная спектроскопия с временным разрешением. Эффективность алгоритмов разработанного подхода проверена в ходе анализа систем флуорофоров при различных параметрах проведения вычислительного эксперимента. Исследуются наборы смоделированных

данных спектроскопии визуализации времени жизни флуоресценции, представляющие три системы флуорофоров и характеризующиеся одно-, двух- и стрэтч-экспоненциальными (stretched) законами испускания флуоресценции [63, 64]. Применение алгоритмов разработанного метода к анализу наборов данных позволило точно определить времена жизни флуоресценции флуорофоров. Точность оцененных параметров комплексным анализом выше, чем в случае применения классического подхода на основе отдельной обработки каждого набора данных с использованием аналитических моделей затухания флуоресценции (рис. 5, а). Разработанный метод требует существенно меньшего времени и количества вычислений теоретической модели, позволяет быстрее и более точно определять параметры биофизических и оптических процессов в молекулярных соединениях в сравнении с классическим методом. Использование имитационных моделей оптико-физических процессов дает возможность значительно увеличить эффективность оценки параметров в случае анализа сложных молекулярных систем, таких как фотонные антенны на основе пленок металлопорфиринов или кристаллов цеолитов [65, 66], когда неизвестны параметры среды молекулярного окружения и механизмы переноса энергии электронного возбуждения, необходимые для создания точных аналитических моделей.

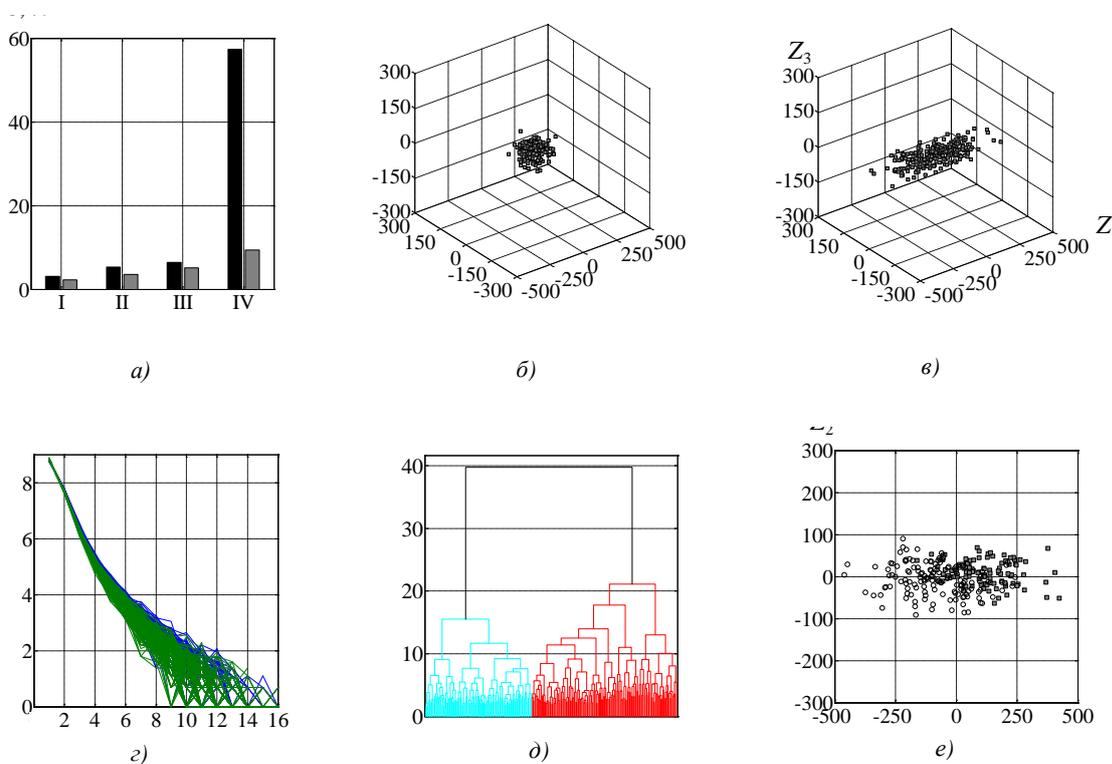


Рис. 5. Примеры применения комплексного подхода к анализу молекулярных соединений в экспериментах флуоресцентной спектроскопии с временным разрешением (а) и флуоресцентной флуктуационной спектроскопией (б–е): а) ошибка ε оценки точности восстановления параметров смоделированных кривых затухания флуоресценции систем флуорофоров, характеризующихся одно- (I и II), двух- (III) и стрэтч-экспоненциальным (IV) законами испускания флуоресценции, с использованием классического (черный цвет) и разработанного (серый цвет) методов.

Цифровые обозначения оси абсцисс: I – параметры моделирования: времена жизни $\tau_1 = 2$ и $\tau_2 = 4$ нс, количество кривых 200, среднее квадратическое отклонение параметров $\sigma = 0,1$; II – параметры моделирования: $\tau_1 = 1,4$ и $\tau_2 = 2$ нс, количество кривых 200, $\sigma = 0,1$; III – параметры моделирования: $\tau_1 = 0,5$ и $\tau_2 = 2$ нс, их вклады $p_1 = 0,2, p_2 = 0,8$ и $p_1 = 0,8, p_2 = 0,2$ соответственно для двух наборов кривых затуханий, количество кривых 200, $\sigma = 0,1$; IV – параметры моделирования: времена жизни донора $\tau_D = 2$, концентрация акцепторов $q = 1$ и $0,2$ для двух наборов кривых затуханий, количество кривых 200, $\sigma = 0,1$;

б) и в) ГЧФ мономерных и димерных форм белка GFP в координатах наиболее информативных компонент Z_1, Z_2 и Z_3 , вычисленных в результате применения метода главных компонент [30]; г) ГЧФ в логарифмической шкале в пространстве исходных признаков $X_1, X_2, \dots, X_{16}, f_j$ – частоты появления числа фотонов в течение некоторого короткого интервала времени; д) дендрограммы ГЧФ, d – мера сходства кластеров; е) ГЧФ в пространстве двух первых главных компонент Z_1 и Z_2 . На рис. г)–е) цветом и символами обозначены мономерные и димерные формы белков

Флуоресцентная флукуационная спектроскопия. Эффективность алгоритмов анализа, разработанных в рамках реализации предложенного подхода, подтверждена на смоделированных и экспериментальных ГЧФ измерений флукуаций интенсивности флуоресценции белка GFP [67, 68]. В ходе анализа экспериментальных данных смеси белков GFP в лизате клеток установлено наличие двух форм белков, соответствующих мономерным и димерным формам белка (рис. 5, б–е). Мономеры белка GFP образуют сферический кластер данных в пространстве первых двух главных компонент (рис. 5, б), в то время как для смеси белков наблюдается вытянутое эллипсоидальное облако, сформированное кластерами мономерной и димерной форм соединений (рис. 5, в). Отметим, что точное разделение мономерных и димерных форм белка трудно выполнимо при использовании классических методов анализа, подразумевающих отдельный анализ ГЧФ. Дальнейшая оценка параметров белковых комплексов может быть произведена в ходе анализа медоидов полученных кластеров ГЧФ с использованием алгоритмов классического анализа или имитационного моделирования.

Заключение. В работе предложен комплексный подход к обработке больших наборов данных на основе методов интеллектуального анализа и имитационного моделирования для исследования биомолекулярных систем и решения задач оптимизации биофизических экспериментов, особенностью которого является применение алгоритмов имитационного моделирования для воспроизведения биофизических процессов в исследуемых системах и интеллектуального анализа данных для определения наиболее информативных данных. Комплексный подход позволяет повысить точность оценки исследуемых характеристик биофизических процессов в сравнении с классическим подходом на основе отдельной обработки каждого набора данных, углубить знания о физике и сути исследуемых процессов, создать новые инструменты прогнозирования, когда аналитических моделей не существует или вывод аналитических решений затруднен ввиду возрастающей сложности системы, представляемой большими данными.

Рассмотрены возможности применения комплексного подхода к анализу больших данных на примерах обработки систем молекул, биополимеров, белков и клеток, изучаемых методами прикладной спектроскопии. Приведено описание базовых элементов комплексного анализа биофизических систем: объекта исследования, его наблюдений, регистрируемых независимых и зависимых переменных, процессов имитационного моделирования, постановки решаемой задачи в терминах комплексного подхода.

Эффективность алгоритмов предложенного метода проверена в ходе анализа смоделированных и экспериментальных данных, представляющих системы молекул и белков, которые исследуются в экспериментах флуоресцентной спектроскопии. Разработанный метод анализа в сравнении с классическим позволяет быстрее и более точно определить параметры биофизических и оптических процессов в молекулярных соединениях. Применение комплексного анализа повышает эффективность исследования биофизических систем в ходе анализа больших данных при использовании имеющихся в наличии вычислительных ресурсов.

Список использованных источников

1. Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA'2020) : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 апр. 2020 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол. : В. В. Скакун (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2020. – 299 с.
2. Квантовая электроника : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–22 нояб. 2019 г. / редкол. : М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск : РИВШ, 2019. – 320 с.
3. Информационные технологии и системы (ИТС 2019) : материалы Междунар. науч. конф., БГУИР, Минск, 30 окт. 2019 г. / редкол. : Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск : БГУИР, 2019. – 305 с.
4. Chen, J. Integrations between autonomous systems and modern computing techniques: a mini review / J. Chen, M. Abbod, J.-S. Shieh // *Sensors*. – September 2019. – Vol. 19, iss. 18. – P. 3897.
5. Klinger, C. M. Small genomes and big data: adaptation of plastid genomics to the high-throughput era / C. M. Klinger, E. Richardson // *Biomolecules*. – July 2019. – Vol. 9, iss. 8. – P. 299.
6. The potential use of big data in oncology / S. M. Willems [et al.] // *Oral Oncology*. – 2019. – Vol. 98. – P. 8–12.
7. Bramer, M. *Principles of Data Mining* / M. Bramer. – 2nd ed. – London : Springer, 2013. – 440 p.
8. Aggarwal, C. C. *Data Mining: The Textbook* / C. C. Aggarwal. – Gewerbestrasse : Springer, 2015. – 734 p.

9. Hastie, T. The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference, and Prediction / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. – 2nd ed. – N. Y. : Springer, 2009. – 739 p.
10. Machine learning approaches for the estimation of biological aging: the road ahead for population studies / A. Gialluisi [et al.] // *Frontiers in Medicine*. – July 2019. – Vol. 6. – P. 146.
11. Jiang, P. Big data approaches for modeling response and resistance to cancer drugs / P. Jiang, W. R. Sellers, X. S. Liu // *Annual Review of Biomedical Data Science*. – July 2018. – Vol. 1. – P. 1–27.
12. Duran, J. M. Computer Simulations in Science and Engineering / J. M. Duran. – Springer International Publishing, 2018. – 209 p.
13. Zeigler, B. P. Theory of Modeling and Simulation / B. P. Zeigler, A. Muzy, E. Kofman. – 3rd ed. – Academic Press, 2018. – 692 p.
14. Toward computational modelling on immune system function / F. Pappalardo [et al.] // *BMC Bioinformatics*. – December 2019. – Vol. 20, suppl. 6. – P. 622.
15. Computational models of epileptiform activity / F. Wendling [et al.] // *J. of Neuroscience Methods*. – 2016. – Vol. 260. – P. 233–251.
16. Physiologically based pharmacokinetic (PBPK) modeling and simulation approaches: a systematic review of published models, applications, and model verification / J. E. Sager [et al.] // *Drug Metabolism and Disposition*. – 2015. – Vol. 43. – P. 1823–1837.
17. Modelling the effect of compliance with nordic nutrition recommendations on cardiovascular disease and cancer mortality in the nordic countries / S. Saha [et al.] // *Nutrients*. – June 2019. – Vol. 11, no. 6. – P. 1434.
18. Periyasamy, V. Advances in Monte Carlo simulation for light propagation in tissue / V. Periyasamy, M. Pramanik // *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. – 2017. – Vol. 10. – P. 122–135.
19. Subramanian, A. S. R. Modeling and simulation of energy systems: a review / A. S. R. Subramanian, T. Gundersen, T. A. Adams // *Processes*. – November 2018. – Vol. 6, iss. 12. – P. 238.
20. Modeling and simulation as support for development of human health space exploration projects / A. G. Bruzzone [et al.] // *Proc. of the 9th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, EUROSIM 2016, the 57th SIMS Conf. on Simulation and Modelling SIMS 2016, Oulu, Finland, 12–16 Sept. 2016*. – Oulu, 2016. – P. 1109–1115.
21. Fluorescence Spectroscopy and Microscopy: Methods and Protocols. *Methods in Molecular Biology* / eds. Y. Engelborghs, A. J. W. G. Visser. – Heidelberg : Springer Science+Business Media, LLC, 2014. – 816 p.
22. Yatskou, M. Computer Simulation of Energy Relaxation and Transport in Organized Porphyrin Systems / M. Yatskou. – The Netherlands, Wageningen : Ponsen & Looijen Printing Establishment, 2001. – 176 p.
23. Комплексный анализ данных при исследовании сложных биомолекулярных систем / Н. Н. Яцков, В. В. Апанасович // *Квантовая электроника : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–22 нояб. 2019 г.* – Минск : РИВШ, 2019. – С. 282–283.
24. Исследование биофизических систем с использованием алгоритмов интеллектуального анализа данных и имитационного моделирования / Н. Н. Яцков, В. В. Апанасович // *Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA'2020) : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 апр. 2020 г.* – Минск : БГУ, 2020. – С. 120–123.
25. Tang, J. Simulation and Computational Red Teaming for Problem Solving / J. Tang, G. Leu, H. A. Abbass. – New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2020. – 464 p.
26. Design and evaluation of actichip, a thematic microarray for the study of the actin cytoskeleton / J. Muller [et al.] // *BMC Genomics*. – Aug. 2007. – Vol. 8. – P. 294.
27. Advanced spot quality analysis in two-colour microarray experiments / M. Yatskou [et al.] // *BMC Research Notes*. – Sept. 2008. – Vol. 1. – P. 80.
28. Al-Ajlan, A. Feature selection for gene prediction in metagenomic fragments / A. Al-Ajlan, A. El Allali // *BioData Mining*. – 2018. – Vol. 11. – P. 9.
29. Разработка алгоритмов и программных средств классификации кодирующих и не кодирующих нуклеотидных последовательностей / В. П. Закирова [и др.] // *Информатика*. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 111–120.
30. Яцков, Н. Н. Интеллектуальный анализ данных : пособие / Н. Н. Яцков. – Минск : БГУ, 2014. – 151 с.
31. Шакла, Н. Машинное обучение и TensorFlow / Н. Шакла. – СПб. : Питер, 2019. – 336 с.
32. Исследование методов классификации для анализа сегментированных объектов на люминесцентных изображениях раковых клеток / Е. В. Лисица [и др.] // *Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки*. – 2020. – № 4. – С. 15–22.
33. Изучение структуры Zn-порфиринов методами флуоресцентной спектроскопии / В. В. Апанасович [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 1999. – Т. 66, № 4. – С. 549–552.
34. Excitation energy migration in a photonic dye-zeolite antenna: computational techniques / M. Meyer [et al.] // *J. of Computational Methods in Science and Engineering*. – 2003. – Vol. 3. – P. 395–402.
35. Dimov, I. T. Monte Carlo Methods for Applied Scientists / I. T. Dimov. – Singapore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. – 2008. – 291 p.

36. Rubinstein, R. Y. *Simulation and the Monte Carlo Method* / R. Y. Rubinstein, D. P. Kroese. – 3rd ed. – New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2017. – 414 p.
37. Binder, K. *Monte Carlo Simulation in Statistical Physics* / K. Binder, D. W. Heermann. – 6th ed. – Springer International Publishing, 2019. – 258 p.
38. A mathematical model of actin filament turnover for fitting FRAP data / A. A. Halavatyi [et al.] // *European Biophysical J.* – 2010 – Vol. 39, no. 4. – P. 669–677.
39. Aranasovich, V. V. Data analysis in time-resolved fluorescence spectroscopy using computer simulation / V. V. Aranasovich, E. G. Novikov, N. N. Yatskov // *Proc. of SPIE.* – 1997. – Vol. 2980. – P. 495–502.
40. Анализ кинетики затухания флуоресценции сложных молекулярных систем с использованием метода Монте-Карло / В. В. Апанасович, Е. Г. Новиков, Н. Н. Яцков // *Журнал прикладной спектроскопии.* – 2000. – Т. 67, № 5. – С. 612–618.
41. Вьюгин, В. В. Математические основы машинного обучения и прогнозирования / В. В. Вьюгин. – М. : МЦНМО, 2014. – 304 с.
42. Kohavi, R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection / R. Kohavi // *Proc. of the 14th Intern. Joint Conf. on Artificial Intelligence IJCAI'95, Montreal, Canada, 20–25 Aug. 1995.* – Montreal, 1995. – Vol. 2. – P. 1137–1143.
43. *Encyclopedia of Database Systems* / Eds. L. Liu, M. T. Ozs. – USA : Springer Science+Business Media, LLC, 2009. – 4355 p.
44. Lakowicz, J. R. *Principles of Fluorescence Spectroscopy* / J. R. Lakowicz. – 3rd ed. – N. Y. : Springer, 2006. – 954 p.
45. A study of energy transfer processes in zinc-porphyrin films using Monte Carlo simulation of fluorescence decay / M. M. Yatskou [et al.] // *Chemical Physics Letters.* – 2001. – Vol. 345, no. 1, 2. – P. 141–150.
46. Non-isotropic excitation energy transport in organized molecular systems: Monte Carlo simulation-based analysis of time-resolved fluorescence / M. M. Yatskou [et al.] // *J. of Physical Chemistry A.* – 2001. – Vol. 105, no. 41. – P. 9498–9508.
47. *Molecular Cell Biology* / ed. H. Lodish [et al.]. – 5th ed. – USA : W. H. Freeman Hardcover, 2003. – 973 p.
48. *Molecular Biology of the Gene* / J. D. Watson [et al.]. – 6th ed. – USA : Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2007. – 880 p.
49. Льюин, Б. Гены / Б. Льюин ; пер. с 9-го англ. изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 896 с.
50. Shendure, J. Next-generation DNA sequencing / J. Shendure, H. Ji // *Nature Biotechnology.* – 2008. – Vol. 26, no. 10. – P. 1135–1145.
51. Metzker, M. L. Sequencing technologies – the next generation / M. L. Metzker // *Nature Reviews Genetics.* – 2010. – Vol. 11, no. 1. – P. 31–46.
52. Классификация последовательностей РНК с помощью сверточных нейронных сетей / И. В. Климук [и др.] // *Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2020) : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23–24 апр. 2020 г.* – Минск : БГУ, 2020. – С. 142–146.
53. Яцков, Н. Н. Автоматическое определение открытых рамок считывания в молекулах РНК человека с использованием алгоритмов векторизации и классификации / Н. Н. Яцков, В. В. Скакун, В. В. Гринев // *Информационные технологии и системы (ИТС 2019) : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 30 окт. 2019 г.* – Минск : БГУИР, 2019. – С. 292–293.
54. Яцков, Н. Н. Вычислительный подход и программный пакет RNAexploreR для группировки молекул РНК генов человека по их экзонным признакам / Н. Н. Яцков, В. В. Скакун, В. В. Гринев // *Информатика.* – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 7–24.
55. Bumgarner, R. Overview of DNA microarrays: types, applications, and their future / R. Bumgarner // *Current Protocols in Molecular Biology.* – Jan. 2013. – Vol. 101, iss. 1. – P. 22.1.1–22.1.11.
56. Giganti, A. The actin cytoskeleton as a therapeutic target: state of the art and future directions / A. Giganti, E. Friederich // *Progress in Cell Cycle Research.* – 2003. – Vol. 5. – P. 511–525.
57. Pollard, T. D. Actin and actin-binding proteins / T. D. Pollard // *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology.* – Aug. 2016. – Vol. 8, no 8. – P. a018226.
58. Kitamura, A. State-of-the-art fluorescence fluctuation-based spectroscopic techniques for the study of protein aggregation / A. Kitamura, M. Kinjo // *Intern. J. of Molecular Sciences.* – Mar. 2018. – Vol. 19, iss. 4. – P. 964.
59. An integrative simulation model linking major biochemical reactions of actin-polymerization to structural properties of actin filaments / A. A. Halavatyi [et al.] // *Biophysical Chemistry.* – 2009 – Vol. 140. – P. 24–34.
60. Quantitative kinetic study of the actin-bundling protein I-plastin and of its impact on actin turn-over / Z. Al Tanoury [et al.] // *Public Library of Science (PLoS) One.* – 2010. – Vol. 5, no. 2. – P. 669–677.
61. Имитационная модель трехканальных люминесцентных изображений популяций раковых клеток / Е. В. Лисица [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии.* – 2014. – Т. 81, № 6. – С. 907–913.
62. Алгоритм автоматической сегментации границ ядер раковых клеток на трехканальных люминесцентных изображениях / Е. В. Лисица [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии.* – 2015. – Т. 82, № 4. – С. 598–607.

63. Яцков, Н. Н. Метод исследования флуоресценции молекулярных соединений с использованием алгоритмов интеллектуального анализа данных / Н. Н. Яцков, В. В. Скакун, В. В. Апанасович // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы Пятой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16–17 мая 2019 г. – Минск: Ин-т прикл. физ. проблем им. А. Н. Севченко БГУ, 2019. – С. 125–127.

64. Яцков, Н. Н. Метод обработки кинетических кривых затухания флуоресценции с использованием алгоритмов интеллектуального анализа данных / Н. Н. Яцков, В. В. Скакун, В. В. Апанасович // Журнал прикладной спектроскопии. – 2020. – Т. 87, № 2. – С. 311–322.

65. Электронные спектры и кинетика поляризации флуоресценции тонких пленок Zn-порфиринов / Н. Н. Яцков [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2003. – Т. 70, № 3. – С. 335–339.

66. Excitation energy migration in a photonic dye-zeolite antenna / M. Yatskou [et al.] // *European J. of Chemical Physics and Physical Chemistry*. – 2003. – Vol. 4(6). – P. 567–587.

67. Яцков, Н. Н. Метод комплексного анализа спектров флуоресценции молекулярных соединений / Н. Н. Яцков, В. В. Скакун, В. В. Апанасович // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы Пятой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16–17 мая 2019 г. – Минск: Ин-т прикл. физ. проблем им. А. Н. Севченко БГУ, 2019. – С. 122–124.

68. Комплексный анализ флуктуаций интенсивности флуоресценции молекулярных соединений / Н. Н. Яцков [и др.]. // Журнал прикладной спектроскопии. – 2020. – Т. 87, № 4. – С. 628–636.

References

1. Skakun V. V., Yatskou M. M., Lutkovski V. M., Lisitsa Y. V., Eismont I. S. (eds.). *Kompyuternye tehnologii i analiz dannyh (CTDA'2020) : materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Minsk, 23–24 aprelya 2020 [Computer Technologies and Data Analysis (CTDA'2020)] : Proceedings of the II International Scientific Conference, Minsk, 23–24 April 2020*. Minsk, Beloruskij gosudarstvennyj universitet, 2020, 299 p. (in Russian).

2. Kugeiko M. M., Afonenko A. A., Barkova A. V. *Kvantovaya elektronika : materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 18–22 noyabrya 2019 [Quantum Electronics: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference, Minsk, 18–22 November 2019]*. Minsk, Respublikanskij institut vysshej shkoly, 2019, 320 p. (in Russian).

3. Shilin L. U., Kukin D. P., Ivaniuk A. A., Markov A. V., Golenkov V. V., ..., Gurinovich A. B. (eds.). *Informacionnye tehnologii i sistemy (ITS 2019): materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Minsk, 30 oktjabrja 2019 [Information Technologies and Systems 2019 (ITS 2019): Proceedings of the International Scientific Conference, Minsk, 30 October 2019]*. Minsk, Beloruskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2019, 305 p. (in Russian).

4. Chen J., Abbod M., Shieh J.-S. Integrations between autonomous systems and modern computing techniques: a mini review. *Sensors*, September 2019, vol. 19, iss. 18, pp. 3897. <https://doi.org/10.3390/s19183897>

5. Klinger C. M., Richardson E. Small genomes and big data: adaptation of plastid genomics to the high-throughput era. *Biomolecules*, July 2019, vol. 9, iss. 8, pp. 299. <https://doi.org/10.3390/biom9080299>

6. Willems S. M., Abeln S., Feenstra K. A., de Bree R., van der Poel E. F., ..., van den Brekel M. W. M. The potential use of big data in oncology. *Oral Oncology*, 2019, vol. 98, pp. 8–12.

7. Bramer M. *Principles of Data Mining*. 2nd ed. London, Springer, 2013, 440 p.

8. Aggarwal C. C. *Data Mining: The Textbook*. Gewerbestrasse, Springer, 2015, 734 p.

9. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd ed. New York, Springer, 2009, 739 p.

10. Gialluisi A., Di Castelnuovo A., Donati M. B., de Gaetano G., Iacoviello L., the Moli-sani Study Investigators. Machine learning approaches for the estimation of biological aging: the road ahead for population studies. *Frontiers in Medicine*, July 2019, vol. 6, pp. 146. <https://doi.org/10.3389/fmed.2019.00146>

11. Jiang P., Sellers W. R., Liu X. S. Big data approaches for modeling response and resistance to cancer drugs. *Annual Review of Biomedical Data Science*, July 2018, vol. 1, pp. 1–27. <https://doi.org/10.1146/annurev-biodatasci-080917-013350>

12. Duran J. M. *Computer Simulations in Science and Engineering*. Springer International Publishing, 2018, 209 p.

13. Zeigler B. P., Muzy A., Kofman E. *Theory of Modeling and Simulation*. 3rd ed. Academic Press, 2018, 692 p.

14. Pappalardo F., Pennisi M., Reche P. A., Russo G. Toward computational modelling on immune system function. *BMC Bioinformatics*, December 2019, vol. 20, suppl. 6, pp. 622. <https://doi.org/10.1186/s12859-020-03897-5>

15. Wendling F., Benquet P., Bartolomei F., Jirsa V. Computational models of epileptiform activity. *Journal of Neuroscience Methods*, 2016, vol. 260, pp. 233–251.

16. Sager J. E., Yu J., Ragueneau-Majlessi I., Isoherranen N. Physiologically based pharmacokinetic (PBPK) modeling and simulation approaches: a systematic review of published models, applications, and model verification. *Drug Metabolism and Disposition*, 2015, vol. 43, pp. 1823–1837.
17. Saha S., Nordström J., Mattisson I., Nilsson P. M., Gerdtham U.-G. Modelling the effect of compliance with nordic nutrition recommendations on cardiovascular disease and cancer mortality in the nordic countries. *Nutrients*, June 2019, vol. 11, no. 6, pp. 1434. <https://doi.org/10.3390/nu11061434>
18. Periyasamy V., Pramanik M. Advances in Monte Carlo simulation for light propagation in tissue. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2017, vol. 10, pp. 122–135.
19. Subramanian A. S. R., Gundersen T., Adams T. A. Modeling and simulation of energy systems: a review. *Processes*, November 2018, vol. 6, iss. 12, pp. 238. <https://doi.org/10.3390/pr6120238>
20. Bruzzone A. G., Massei M., Mürino G., Di Matteo R., Agresta M., Maglione G. L. Modeling and simulation as support for development of human health space exploration projects. *Proceedings of the 9th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, EUROSIM 2016, the 57th SIMS Conference on Simulation and Modelling SIMS 2016, Oulu, Finland, 12–16 September 2016*. Oulu, 2016, pp. 1109–1115.
21. Engelborghs Y., Visser A. J. W. G. (eds.). *Fluorescence Spectroscopy and Microscopy: Methods and Protocols. Methods in Molecular Biology*. Heidelberg, Springer Science + Business Media, LLC, 2014, 816 p.
22. Yatskou M. *Computer Simulation of Energy Relaxation and Transport in Organized Porphyrin Systems*. The Netherlands, Wageningen, Ponsen & Looijen Printing Establishment, 2001, 176 p.
23. Yatskou M. M., Apanasovich V. V. Kompleksnyj analiz dannyh pri issledovanii slozhnyh biomolekulyarnykh sistem [Data analysis of complex biomolecular systems]. Kvantovaya elektronika : materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 18–22 noyabrya 2019 [*Quantum Electronics: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference, Minsk, 18–22 November 2019*]. Minsk, Respublikanskij institut vysshej shkoly, 2019, pp. 282–283 (in Russian).
24. Yatskou M. M., Apanasovich V. V. Issledovanie biofizicheskikh sistem s ispolzovaniem algoritmov intellektualnogo analiza dannyh i imitacionnogo modelirovaniya [Investigation of biophysical systems using data mining and simulation modeling algorithms]. Kompyuternye tehnologii i analiz dannyh (CTDA'2020) : materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Minsk, 23–24 aprelya 2020 [*Computer Technologies and Data Analysis (CTDA'2020) : Proceedings of the II International Scientific Conference, Minsk, 23–24 April 2020*]. Minsk, Belorusckij gosudarstvennyj universitet, 2020, pp. 120–123 (in Russian).
25. Tang J., Leu G., Abbass H. A. *Simulation and Computational Red Teaming for Problem Solving*. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2020, 464 p.
26. Muller J., Mehlen A., Vetter G., Yatskou M., Muller A., ..., Vallar L. Design and evaluation of actichip, a thematic microarray for the study of the actin cytoskeleton. *BMC Genomics*, August 2007, vol. 8, pp. 294. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-8-294>
27. Yatskou M., Novikov E., Vetter G., Muller A., Barillot E., ..., Friederich E. Advanced spot quality analysis in two-colour microarray experiments. *BMC Research Notes*, September 2008, vol. 1, pp. 80. <https://doi.org/10.1186/1756-0500-1-80>
28. Al-Ajlan A., El Allali A. Feature selection for gene prediction in metagenomic fragments. *BioData Mining*, 2018, vol. 11, pp. 9. <https://doi.org/10.1186/s13040-018-0170-z>
29. Zakirava V. R., Syrovkash D. A., Hileuski S. V., Nazarov P. V., Yatskou M. M. Razrabotka algoritmov i programmnykh sredstv klassifikacii kodiruyushih i nekdiruyushih nukleotidnykh posledovatel'nostej [Development of algorithms and software for classification of nucleotide sequences]. Informatika [*Informatics*], 2019, vol. 16, no. 2, pp. 111–120 (in Russian).
30. Yatskou M. M. Intellektualnyj analiz dannyh. *Data Mining*. Minsk, Belorusckij gosudarstvennyj universitet, 2014, 151 p. (in Russian).
31. Shukla N. Mashinnoe obuchenie i TensorFlow. *Machine Learning with TensorFlow*. Saint Petersburg, Piter, 2019, 336 p. (in Russian).
32. Lisitsa Y. V., Yatskou M. M., Skakun V. V., Apanasovich V. V. Issledovanie metodov klassifikacii dlya analiza segmentirovannykh obektov na lyuminescentnykh izobrazheniyah rakovykh kletok [Classification methods for the analysis of segmented objects on fluorescent images of cancer cells]. Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamentalnye nauki [*Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences*], 2020, no. 4, pp. 15–22 (in Russian).
33. Apanasovich V. V., Novikov E. G., Yatskov N. N., Koehorst R. B. M., Schaafsma T. J., van Hoek A. Study of the Zn-porphyrin structure by fluorescence spectroscopy methods. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1999, vol. 66, no. 4, pp. 549–552.
34. Meyer M., Yatskou M., Pfenninger M., Huber S., Calzaferri G., ..., Apanasovich V. Excitation energy migration in a photonic dye-zeolite antenna: computational techniques. *Journal of Computational Methods in Science and Engineering*, 2003, vol. 3, pp. 395–402.

35. Dimov I. T. *Monte Carlo Methods for Applied Scientists*. Singapore, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008, 291 p.
36. Rubinstein R. Y., Kroese D. P. *Simulation and the Monte Carlo Method*. 3rd ed. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2017, 414 p.
37. Binder K., Heermann D. W. *Monte Carlo Simulation in Statistical Physics*. 6th ed. Springer International Publishing, 2019, 258 p.
38. Halavatyi A. A., Nazarov P. V., Al Tanoury Z., Apanasovich V. V., Yatskou M. M., Friederich E. A mathematical model of actin filament turnover for fitting FRAP data. *European Biophysical Journal*, 2010, vol. 39, no. 4, pp. 669–677.
39. Apanasovich V. V., Novikov E. G., Yatskov N. N. Data analysis in time-resolved fluorescence spectroscopy using computer simulation. *Proceedings of SPIE*, 1997, vol. 2980, pp. 495–502.
40. Apanasovich V. V., Novikov E. G., Yatskov N. N. Analiz kinetiki zatushanija fluorescencii slozhnyh molekularnyh sistem s ispolzovaniem metoda Monte-Karlo [Analysis of the decay kinetics of fluorescence of complex molecular systems using Monte Carlo method]. *Zhurnal prikladnoj spektroskopii [Journal of Applied Spectroscopy]*, 2000, vol. 67, no. 5, pp. 612–618 (in Russian).
41. Vyugin V. V. *Matematicheskie osnovy mashinnogo obucheniya i prognozirovaniya. Mathematical Foundations of Machine Learning and Forecasting*. Moscow, Moskovskij centr nepreryvnogo matematicheskogo obrazovanija, 2014, 304 p. (in Russian).
42. Kohavi R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence IJCAI'95, Montreal, Canada, 20–25 August 1995*. Montreal, 1995, vol. 2, pp. 1137–1143.
43. Liu L., Ozsu M. T. (eds.). *Encyclopedia of Database Systems*. USA, Springer Science+Business Media, LLC, 2009, 4355 p.
44. Lakowicz J. R. *Principles of Fluorescence Spectroscopy*. 3rd ed. New York, Springer, 2006, 954 p.
45. Yatskou M. M., Donker H., Koehorst R. B. M., van Hoek A., Schaafsma T. J. A study of energy transfer processes in zinc-porphyrin films using Monte Carlo simulation of fluorescence decay. *Chemical Physics Letters*, 2001, vol. 345, no. 1, 2, pp. 141–150.
46. Yatskou M. M., Donker H., Novikov E. G., Koehorst R. B. M., van Hoek A., ..., Schaafsma T. J. Non-isotropic excitation energy transport in organized molecular systems: Monte Carlo simulation-based analysis of time-resolved fluorescence. *Journal of Physical Chemistry A*, 2001, vol. 105, no. 41, pp. 9498–9508.
47. Lodish H., Berk A., Matsudaira P., Kaiser C. A., Krieger M., ..., Darnell J. (eds.). *Molecular Cell Biology*. 5th ed. USA, W. H. Freeman Hardcover, 2003, 973 p.
48. Watson J. D., Baker T. A., Bell S. P., Gann A., Levine M., Losick R. *Molecular Biology of the Gene*. 6th ed. USA, Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2007, 880 p.
49. Lewin B. *Genes*. 7 ed. Oxford University Press, 1999, 990 p.
50. Shendure J., Ji H. Next-generation DNA sequencing. *Nature Biotechnology*, 2008, vol. 26, no. 10, pp. 1135–1145.
51. Metzker M. L. Sequencing technologies – the next generation. *Nature Reviews Genetics*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 31–46.
52. Klimuk I. V., Grinev V. V., Skakun V. V., Yatskou M. M. Klassifikaciya posledovatelnoej RNK s pomoshyu svertochnykh nejronnyh setej [RNA sequences classification with convolutional neural networks]. *Kompyuternye tehnologii i analiz dannyh (CTDA'2020) : materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Minsk, 23–24 aprelya 2020 [Computer Technologies and Data Analysis (CTDA'2020) : Proceedings of the II International Scientific Conference, Minsk, 23–24 April 2020]*. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet, 2020, pp. 142–146 (in Russian).
53. Yatskou M. M., Skakun V. V., Grinev V. V. Avtomaticheskoe opredelenie otkrytyh ramok schityvaniya v molekulah RNK cheloveka s ispolzovaniem algoritmov vektorizacii i klassifikacii [Automatic detection of the open reading frames in human RNA molecules using vectorization and classification algorithms]. *Informacionnye tehnologii i sistemy (ITS 2019) : materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Minsk, 30 oktjabrja 2019 [Information Technologies and Systems 2019 (ITS 2019): Proceedings of the International Scientific Conference, Minsk, 30 October 2019]*. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2019, pp. 292–293 (in Russian).
54. Yatskou M. M., Skakun V. V., Grinev V. V. Vychislitelnyj podhod i programmnyj paket RNAexploreR dlya gruppировки molekul RNK genov cheloveka po ih ekzonnym priznakam [A computational approach and software package RNAexploreR for grouping RNA molecules of human genes by exon features]. *Informatika [Informatics]*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 7–24 (in Russian).
55. Bumgarner R. Overview of DNA microarrays: types, applications, and their future. *Current Protocols in Molecular Biology*, January 2013, vol. 101, iss. 1, pp. 22.1.1–22.1.11. <https://doi.org/10.1002/0471142727.mb2201s101>.
56. Giganti A., Friederich E. The actin cytoskeleton as a therapeutic target: state of the art and future directions. *Progress in Cell Cycle Research*, 2003, vol. 5, pp. 511–525.

57. Pollard T. D. Actin and actin-binding proteins. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, August 2016, vol. 8, no 8, p. a018226. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a018226>
58. Kitamura A., Kinjo M. State-of-the-art fluorescence fluctuation-based spectroscopic techniques for the study of protein aggregation. *International Journal of Molecular Sciences*, March 2018, vol. 19, iss. 4, p. 964. <https://doi.org/10.3390/ijms19040964>
59. Halavatyi A. A., Nazarov P. V., Medves S., Van Troys M., Ampe C., ..., Friederich E. An integrative simulation model linking major biochemical reactions of actin-polymerization to structural properties of actin filaments. *Biophysical Chemistry*, 2009, vol. 140, pp. 24–34.
60. Tanoury Z. Al, Schaffner-Reckinger E., Halavatyi A., Hoffmann C., Moes M., ..., Friederich E. Quantitative kinetic study of the actin-bundling protein I-plastin and of its impact on actin turn-over. *Public Library of Science (PLOS) One*, 2010, vol. 5, no. 2, pp. 669–677.
61. Lisitsa Y. V., Yatskou M. M., Apanasovich V. V., Apanasovich T. V., Shytsik M. M. Imitacionnaja model' trehkanal'nyh ljuminescentnyh izobrazhenij populjacij rakovyh kletok [Simulation model for three-channel luminescent images of cancer cell populations]. *Zhurnal prikladnoj spektroskopii [Journal of Applied Spectroscopy]*, 2014, vol. 81, no. 6, pp. 907–913 (in Russian).
62. Lisitsa Y. V., Yatskou M. M., Apanasovich V. V., Apanasovich T. V. Algoritm avtomaticheskoy segmentacii granic jader rakovyh kletok na trehkanal'nyh ljuminescentnyh izobrazhenijah [Algorithm for automatic segmentation of nuclear boundaries in cancer cells in three-channel luminescent images]. *Zhurnal prikladnoj spektroskopii [Journal of Applied Spectroscopy]*, 2015, vol. 82, no. 4, pp. 598–607 (in Russian).
63. Yatskou M. M., Skakun V. V., Apanasovich V. V. Metod issledovaniya fluorescencii molekulyarnyh soedinenij s ispolzovaniem algoritmov intellektualnogo analiza dannyh [Method for investigating the fluorescence of molecular compounds using data mining algorithms]. *Prikladnye problemy optiki, informatiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya: materialy Pyatoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Minsk, 16–17 maya 2019 [Applied Problems of Optics, Informatics, Radiophysics and Condensed Matter Physics: Proceedings of the Fifth International Scientific and Practical Conference, Minsk, 16–17 May 2019]*. Minsk, Inctitut prikladnyh fizicheskikh problem im. A. N. Sevchenko Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta, 2019, pp. 125–127 (in Russian).
64. Yatskou M. M., Skakun V. V., Apanasovich V. V. Metod obrabotki kineticheskikh krivyh zatuhanija fluorescencii s ispolzovaniem algoritmov intellektual'nogo analiza dannyh [Method for processing fluorescence decay kinetic curves using data mining algorithms]. *Zhurnal prikladnoj spektroskopii [Journal of Applied Spectroscopy]*, 2020, vol. 87, no. 2, pp. 311–322 (in Russian).
65. Yatskov N. N., Apanasovich V. V., Koehorst R. B. M., van Hoek A., Schaafsma T. J. Jelektronnye spektry i kinetika poljarizacii fluorescencii tonkih plenok Zn-porfirinov [Electronic spectra and fluorescence polarization kinetics of thin Zn-porphyrine films]. *Zhurnal prikladnoj spektroskopii [Journal of Applied Spectroscopy]*, 2003, vol. 70, no. 3, pp. 335–339 (in Russian).
66. Yatskou M. M., Meyer M., Huber S., Pfenniger M., Calzaferri G. Excitation energy migration in a photonic dye-zeolite antenna. *European Journal of Chemical Physics and Physical Chemistry*, 2003, vol. 4, no. 6, pp. 567–587.
67. Yatskou M. M., Skakun V. V., Apanasovich V. V. Metod kompleksnogo analiza spektrov fluktuacii fluorescencii molekulyarnyh soedinenij [Method for complex analysis of fluorescence fluctuation spectra of molecular compounds]. *Prikladnye problemy optiki, informatiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya: materialy Pyatoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Minsk, 16–17 maya 2019 [Applied Problems of Optics, Informatics, Radiophysics and Condensed Matter Physics: Proceedings of the Fifth International Scientific and Practical Conference, Minsk, 16–17 May 2019]*. Minsk, Inctitut prikladnyh fizicheskikh problem im. A. N. Sevchenko Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta, 2019, pp. 122–124 (in Russian).
68. Yatskou M. M., Skakun V. V., Nederveen-Schippers L., Kortholt A., Apanasovich V. V. Kompleksnyj analiz fluktuacij intensivnosti fluorescencii molekulyarnyh soedinenij [Complex analysis of fluorescence intensity fluctuations of molecular compounds]. *Zhurnal prikladnoj spektroskopii [Journal of Applied Spectroscopy]*, 2020, vol. 87, no. 4, pp. 628–636 (in Russian).

Информация об авторах

Яцков Николай Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры системного анализа и компьютерного моделирования, факультет радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет.
E-mail: yatskou@bsu.by

Апанасович Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет.
E-mail: apanasovichv@gmail.com

Information about the authors

Mikalai M. Yatskou, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Systems Analysis and Computer Modelling, Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University.
E-mail: yatskou@bsu.by

Vladimir V. Apanasovich, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Belarusian State University.
E-mail: apanasovichv@gmail.com

Правила для авторов

Редакция журнала «Информатика» просит авторов руководствоваться приведенными ниже правилами.

I. Статьи принимаются в редакцию через электронную систему подачи по адресу <http://inf.grid.by> в формате файлов текстовых редакторов Microsoft Word. Объем оригинальной статьи – от 8 до 16 стр., включая рисунки, таблицы и достаточное количество наиболее актуальных ссылок; объем обзорной статьи – от 16 до 32 стр., включая все основные ссылки. Текст набирается с переносами, шрифт Times New Roman 11 пт, интервал между строками – одинарный, абзацный отступ 0,5 см, поля по 2,5 см со всех сторон.

Материал статьи должен быть четко структурированным: Введение; основные разделы, в которых изложены цели и задачи, методы, результаты; Заключение (выводы).

II. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на публикацию (сопроводительное письмо за подписью руководителя или выписку из заседания ученого совета, отдела или кафедры, акт экспертизы).

III. Статьи в обязательном порядке должны включать аннотацию, ключевые слова, список литературы, информацию об авторах на русском и английском языках.

На титульной странице располагаются следующие метаданные:

1. Индекс по универсальной десятичной классификации (УДК); на русском и английском языках тип статьи (оригинальная или обзорная), название статьи, инициалы и фамилии всех авторов, полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием почтового адреса, при наличии указывается ученая степень и ORCID, e-mail ответственного лица.

2. Аннотация (Abstract) объемом 150–250 слов в оригинальной статье должна быть структурирована отдельными подразделами: Цели, Методы, Результаты, Заключение, а также максимально характеризовать содержательную часть рукописи. Сюда не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.

3. Ключевые слова (Keywords) – наиболее значимые слова или словосочетания по теме работы, отражающие специфику темы, объекты и результаты исследования; перечень ключевых слов должен содержать 5–10 слов.

4. В разделе Благодарности (Acknowledgements) указываются все источники финансирования исследования, а также благодарности людям, которые участвовали в работе над статьей.

5. Автор обязан уведомить редакцию о реальном или потенциальном конфликте интересов, включив информацию в раздел Конфликт интересов (Conflict of interest).

6. Формулы, рисунки, таблицы в статье нумеруются в соответствии с порядком их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки и таблицы в тексте обязательны. Рисунки должны быть выполнены с хорошим разрешением в масштабе, позволяющем четко различать надписи и обозначения. Цветные иллюстрации печатаются только в том случае, когда это необходимо для понимания излагаемого материала. Подрисуночные подписи с расшифровкой всех позиций, представленных на рисунке, и названия таблиц набираются шрифтом гарнитуры основного текста размером 9 пт. Перевод подрисуночной подписи и пояснений к рисунку, а также перевод названия таблицы, заголовки строк или столбцов располагаются курсивом после русскоязычной версии.

7. Набор формул выполняется в формульном редакторе Microsoft Equation или Math Type. Прямым шрифтом набираются: греческие и русские буквы; математические символы (\sin , \lg , ∞); символы химических элементов (C, Cl, CH₃); цифры (римские и арабские); индексы (верхние и нижние), являющиеся сокращениями слов. Курсивом набираются латинские буквы, символы физических величин (в том числе и в индексе).

8. Список использованной литературы оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.5–2008). Номер литературной ссылки в тексте дается порядковым номером в квадратных скобках. Ссылаться на неопубликованные работы не допускается.

10. Отдельно оформляется References со следующей структурой: авторы (транслитерация), транслитерированное название монографии, *Перевод названия монографии на английский язык*. Выходные данные с обозначениями на английском языке. От транслитераций названий статей можно отказаться.

Ссылки на учебно-методическую литературу, ГОСТы, авторефераты, статистические отчеты в список не включаются, а оформляются в виде сносок (с подробными рекомендациями можно ознакомиться на сайте журнала в разделе Правила для авторов).

11. В разделе Информация об авторах (Information about the authors) приводятся ФИО авторов полностью, ученая степень, звание, должность, название организации, ORCID (при наличии).

IV. Все поступающие в редакцию рукописи проходят предварительную проверку на соответствие Правилам для авторов. Статья может быть возвращена автору на доработку с просьбой устранить недостатки или дополнить информацию. После проверки на соответствие правилам статья направляется рецензенту с указанием сроков рецензирования.

V. При наличии замечаний рецензента автору предоставляется определенное время на доработку рукописи. Статьи, направляемые на доработку, должны быть возвращены в исправленном виде с ответами на все замечания. Окончательное решение о публикации или отклонении рукописи принимается редколлегией журнала. При положительном заключении рецензента статья передается редактору для подготовки к печати. Редакция оставляет за собой право на редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

VI. Редакция журнала предоставляет возможность первоочередного опубликования статей, представленных лицами, которые осуществляют послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство) в год завершения обучения.

VII. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, уже опубликованных ранее или принятых к публикации другими изданиями.

ИНДЕКСЫ

00827

для индивидуальных
подписчиков

008272

для предприятий
и организаций