МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

Юго-Западного государственного университета

Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение

Научный журнал

Том 10 № 1 / 2020

Proceedings

of the Southwest State University

Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering

Scientific Journal

Vol. 10 № 1 / 2020

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya:. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie)

Научный рецензируемый журнал

Основан в 2011 г.

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как информационные и интеллектуальные системы, мехатроника и робототехника, распознавание и обработка изображений, системный анализ и принятие решений, моделирование в медицинских и технических системах, приборы и методы контроля природной среды.

В журнале публикуются оригинальные работы, обзорные статьи, рецензии и обсуждения, соответствующие тематике издания.

Публикация статей в журнале для авторов бесплатна.

Целевая аудитория: научные работники, профессорско-преподавательский состав образовательных учреждений, экспертное сообщество, молодые ученые, аспиранты, заинтересованные представители широкой общественности.

Журнал придерживается политики открытого доступа. Полнотекстовые версии статей доступны на сайте журнала, научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

Журнал включен в перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук, кандидата наук по следующим научным специальностям:

Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки) – 05.11.01.

Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки) – 05.11.13.

Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки) – 05.11.17

Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки) – 05.12.13.

Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) – 05.13.01.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Емельянов Сергей Геннадьевич, д-р техн.наук, профессор, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, ректор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Томакова Римма Александровна, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р. М. Алгулиев, д-р техн. наук, профессор;
Ю. С. Бехтин, д-р техн. наук, профессор;
А. А. Бурмака, д-р техн. наук, профессор;
В. Н. Гридин, д-р техн. наук, профессор;
А. Л. Жизняков, д-р техн. наук, профессор;
Ж. Т. Жусубалиев, д-р техн. наук, профессор;
С. А. Зинкин, д-р техн. наук, доцент;
Зо Зо Тун, канд. техн. наук, профессор;
И. В. Зотов, д-р техн. наук, профессор;
Н. А. Кореневский, д-р техн. наук, профессор;
Е. Н. Коровин, д-р техн. наук, профессор;
А. Н. Пылькин, д-р техн. наук, профессор;
Риад Таха Аль-Касасбех, д-р техн. наук, профессор;
В. Г. Рубанов, д-р техн. наук, профессор;
С. П. Серегин, д-р мед. наук, профессор;
А. С. Сизов, д-р техн. наук, профессор;
В. С. Титов, д-р техн.наук, профессор,
заслуженный деятель науки России;
С. А. Филист, д-р техн. наук, профессор;
А. В. Филонович, д-р техн. наук, профессор;
А. А. Ханова, д-р техн. наук, доцент

Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
Адрес учредителя, издателя и редакции:
305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94
Телефон: +7(4712) 22-25-26,
Факс: +7(4712) 50-48-00.
E-mail: rio_kursk@mail.ru

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:
Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(ПИ №ФС77-42691 от 16.11.10).

ISSN 2223-1528 (Print)

Сайт журнала: https://swsu.ru/izvestiya/seriestechniq/

© Юго-Западный государственный университет, 2020

creative commons Материалы журнала доступны
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:
Полиграфический центр
Юго-Западного государственного
университета, 305040, г.Курск,
ул. 50 лет Октября, 94

Подписка и распространение:
журнал распространяется
по подписке.
Подписной индекс журнала 44291
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: четыре раза в год

Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен А. Е. Серебряковой

Подписано в печать 25.02.20. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Усл.печ.л. 20,2.
Тираж 1000 экз. Заказ 12.

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering

Peer-reviewed scientific journal
Published since 2011

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as information and intelligent systems; mechatronics, robotics; image recognition and processing; system analysis and decision making; simulation in medical and technical systems; devices and methods for monitoring the natural environment.

The journal publishes scientific articles, critical reviews, reports and discussions in the above mentioned areas.

All papers are published free of charge.

Target readers are scientists, university professors and teachers, experts, young scholars, graduate and post-graduate students, stakeholders and interested public.

The Editorial Board of the journal pursues open access policy. Complete articles are available at the journal web-site and at eLIBRARY.RU .

The journal is included into the Register of the Top Scientific Journals of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation as a journal recommended for the publication of the findings made by the scientists working on a doctorial or candidate thesis in the following areas:

Devices and methods of measurement (by type of measurement) (technical Sciences) – 05.11.01.

Devices and methods of control of the natural environment, substances, materials and products (technical Sciences) – 05.11.13.

Devices, systems and medical devices (technical Sciences) – 05.11.17.

Telecommunication systems, networks and devices (technical Sciences) – 05.12.13.

System analysis, management and information processing (by industry) (technical Sciences) – 05.13.01.

EDITOR-IN-CHIEF

Sergei G. Emelianov, Dr. of Sci. (Engineering)**,** Correspondent Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, a Holder of the Russian Government Prize in the Field of Science and Engineering, Rector of the Southwest State University (Kursk, Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Rimma A. V. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL BOARD

R. M. Alguliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
Y. S. Bekhtin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. A. Burmaka, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);
V. N. Gridin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. L. Zhiznyakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
Zh. T. Zhusubaliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
S. A. Zinkin, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor;
Zo Zo Thun, Candidate of Engineering, Professor;
I. V. Zotov, Dr. of Sci. (Engineering);
N. A. Korenevsky, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
E. N. Korovin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. N. Pylkin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
Riad Taha Al-Kasasbeh, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
V. G. Rubanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
S. P. Seryogin, Doctor of Sci. (Medical), Professor;
A. S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
V. S. Titov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
S. A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. V. Filonovich, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. A. Khanova, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor

Founder and Publisher :
"Southwest State University"
Official address of the Founder, Publisher and Editorial Office:
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation
Phone: (+74712) 22-25-26,
Fax: (+74712) 50-48-00.
E-mail: rio_kursk@mail.ru

The Journal is officially registered by:
The Federal Supervising Authority in the Field of Communication, Information Technology and Mass media
(PI №FS77-42691 of 16.11.10).

ISSN 2223-1528 (Print)

Web-site: https://swsu.ru/izvestiya/seriestechniq/

© Southwest State University, 2020

Publications are available in accordance with the Creative Commons Attribution 4.0 License

Printing office:
Printing Center
of the Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str., 94,
Kursk 305040, Russian Federation

Subscription and distribution:
the journal is distributed by subscription.
Subscription index 44291
in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Frequency: four times a year

Free-of-control price.

Original lay-out design: A. E. Serebryakova

Signed for printing 25.02.20. Format 60x84/8.
Offset paper. Printer's sheets: 20,2.
Circulation 1000 copies. Order 12.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ.....8
Оригинальные статьи

Операционная система с ядром на основе виртуальной машины с уменьшенным набором команд.....8
Чаплыгин А. А., Малышев А. В.

Оценка потенциальной помехоустойчивости приёма цифровых сигналов, используемых в современных и перспективных системах радиорелейной и спутниковой связи…….21
Довбня В. Г., Коптев Д. С., Бабанин И. Г.

Основные направления повышения помехозащищенности радиоприёмных систем на основе пространственно-временной обработки сложных сигналов в антенном устройстве..... 36
Довбня В. Г., Коптев Д. С.

Программная реализация алгоритма разрешения коллизий в 2D-пространстве..... 51
Петрик Е. А., Харченко М. А., Лапина Т. И.

МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА..... 67
Оригинальные статьи

Тестирование алгоритмов детектирования размытых изображений 67
Алексеев А. В., Орлова Ю. А., Розалиев В. Л., Заболеева-Зотова А. В.

Анализ параллельной нейронной сети Adaboost для классификации больших наборов изображений..... 78
Гущин Р. И., Орлова Ю. А., Розалиев В. Л.

РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ..... 94
Оригинальные статьи

Современные направления развития систем диагностики и прогностики технического состояния перспективных летательных аппаратов..... 94
Коптев Д. С., Мухин И. Е.

Модели латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем..... 114
Киселев А. В., Шаталова О. В., Протасова З. У., Филист С. А., Стадниченко Н. С.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ..... 134
Оригинальные статьи

Ультразвуковая система контроля психофизиологического состояния машиниста поезда.....134
Кравчук Д. А.

Алгоритм аппроксимации многоэкстремальных функций для оценки результатов мониторинга гликемии..... 143
Истомина Т. В., Петрунина Е. В., Копылова Е. В.

Способ построения телекоммуникационной сети передачи данных с борта воздушного судна на наземный диспетчерский пункт..... 157
Томакова Р. А., Шевцов А. Н.

К сведению авторов..... 174

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS 8

Original articles

The Operating System with the Virtual Machine Based Kernel with Reduced Instruction Set 8
Chaplygin A. A., Malyshev A. V.

Assessment of Potential Interference of Receiving Digital Signals Used in Modern and Perspective Radio-Relay and Satellite Communication Systems 21
Dovbnya V. G., Koptev D. S., Babanin I. G.

Basic Directions of Increasing the Interference Protection of Radio Receiving Systems Based on Space-Temporal Processing of Complex Signals in Antenna Device 36
Dovbnya V. G., Koptev D. S.

Software Realization of the 2D-Collision Resolution Algorithm 51
Petrik E. A., Kharchenko M. A., Lapina T. I.

MECHATRONICS, ROBOTICS 67

Original articles

Testing Algorithms for Detecting Blurry Images 67
Alekseev A. V., Orlova Yu. A., Rozaliev V. L., Zaaboleeva-Zotova A. V.

Parallel Neural Network Analysis of Topics for Classifying Large Sets of Images 78
Guschin R. I., Orlova Y. A., Rozaliev V. L.

IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING 94

Original articles

Modern Directions for the Development of Diagnostic Systems and Forecasting the Technical Condition of Prospective Aircraft 94
Koptev D. S., Mukhin I. E.

Models of Latent Predictors in Intellectual Systems for Forecasting the State of Living Systems 114
Kiselev A. V., Shatalova O. V., Protasova Z. U., Filist S. A., Stadnichenko N. S.

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING 134

Original articles

Ultrasonic System for Monitoring the Psychophysiological State of the Train Driver 134
Kravchuk D. A.

Algorithm of Approximation of Multiextremal Functions for Evaluation of the Results Monitoring of Glycemia 143
Istomina T. V., Petrunina E. V., Kopylova E. V.

Method for Building a Telecommunications Network for Transmitting Data From an Aircraft to a Ground Control Station 157
Tomakova R. A., Shevtsov A. N.

Infirmation for Authors 174

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.4.6

Операционная система с ядром на основе виртуальной машины с уменьшенным набором команд

А. А. Чаплыгин[1] ✉, А. В. Малышев[1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Резюме

Цель исследований *заключается в разработке операционной системы на основе виртуальной машины с уменьшенной архитектурой команд (RISC). Предложена модель ядра операционной системы (ОС), включающего в себя только виртуальную машину, за счет чего значительно уменьшается размер ядра. Приведены этапы создания операционной системы, набор необходимых команд для функционирования виртуальной машины, обоснованы достоинства подобного подхода к созданию ОС. Результаты проведенных исследований могут использоваться при создании встроенных операционных систем.*

Методы. *Для получения нужной структуры ядра ОС использован итеративный метод проектирования динамических систем. На первой итерации получена модель виртуальной машины – модель вычислительного устройства и модель памяти. На второй итерации создан внесистемный загрузчик. На третьей итерации реализована связь ядра ОС и нижележащей архитектуры ЭВМ.*

Результаты. *В результате проектирования получена структура ядра ОС на основе виртуальной машины с уменьшенным набором команд. Такой набор команд упрощает создание трансляторов и компиляторов с языков высокого уровня, а также позволяет произвести оптимизацию выполнения приложений за счет более быстрой компиляции на лету (JIT).*

Заключение. *Полученная ОС может быть применена в различных встроенных системах. Небольшая и компактная структура ядра позволяет на ранних этапах тестирования устранить ошибки, в том числе ошибки безопасности. Структура виртуальной машины близка к регистровой архитектуре ЭВМ, что ускоряет компиляцию и увеличивает скорость работы программ.*

Ключевые слова: *операционные системы; сокращенный набор команд; принципы проектирования ОС; виртуальные машины; стадии проектирования.*

Конфликт интересов*: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Чаплыгин А. А., Малышев А. В., 2020

Для цитирования: Чаплыгин А. А., Малышев А. В. Операционная система с ядром на основе виртуальной машины с уменьшенным набором команд // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 8–20.

Поступила в редакцию 30.12.2020 *Подписана в печать 27.01.2020* *Опубликована 25.02.2020*

The Operating System with the Virtual Machine Based Kernel with Reduced Instruction Set

Aleksandr A. Chaplygin[1], Aleksandr V. Malyshev[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Abstract

Purpose of research *is to develop the operation system based on virtual machine with reduced instruction set. It is considered that the operation system kernel include only virtual machine, resulting in significant decreasing kernel code size. The stages of developing of operation system, needed instruction set of virtual machine are considered, the pros of this OS development model and applications of this OS type are considered. The results of research can be applied in embedded operating systems development.*

Methods. *The iterative method of dynamic system construction is used for creation of needed OS kernel structure. In the first iteration the model of virtual machine is constructed: the model of computer device and memory model. In the second iteration the system loader is constructed. In the third iteration the connection of OS kernel and computer hardware is constructed.*

Results. *The OS kernel structure based on virtual machine with reduced instruction set is produced. This instruction set simplifies the creation of compilers and interpreters for high level languages and also simplifies application run optimizations with using fast just in time compilation (JIT).*

Conclusion. *The designed OS can be used in various embedded systems. Tiny and compact kernel structure helps to discover and eliminate errors, including security errors, in the early testing stages. The structure of virtual machine is close to register architecture of modern computers, which accelerates compilation and increases run speed.*

Keywords: *operation systems; reduced instruction set; OS design principles; virtual machines; design stages.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Chaplygin A. A., Malyshev A. V. The Operating System with the Virtual Machine Based Kernel with Reduced Instruction Set. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(1): 8–20. (In Russ.)

Received 30.12.2020 *Accepted 27.01.2020* *Published 25.02.2020*

***

Введение

Операционные системы (ОС) являются наиболее сложным типом программного обеспечения [1]. Они развивались параллельно вместе с развитием аппаратного обеспечения. Вследствие

высокой сложности современного аппаратного обеспечения современные операционные системы состоят из многих миллионов строк исходного кода. Такой объем кода трудно проектировать и реализовывать, в исходном коде присутствует множество ошибок.

Чтобы уменьшить сложность ОС, предлагается подход, основанный на том, что ОС можно реализовывать не на реальной аппаратуре, сложной и во многих случаях избыточной вследствие исторических и других причин (обратная совместимость), а на компактной виртуальной машине, которую можно реализовать с помощью значительно меньшего по объему кода [2].

Целью исследований является создание модели операционной системы на основе компактной виртуальной машины с уменьшенным набором команд. Полученная операционная система будет мобильной и легко переносимой на различные аппаратные платформы.

В настоящее время существуют различные варианты архитектур операционных систем [3]. Классической и наиболее распространенной архитектурой для ядра ОС является монолитная архитектура [4], примерами ОС с монолитным ядром являются: Linux, OpenVMS, FreeBSD, NetBSD, Solaris. Следует отметить, что в монолитном ядре полностью располагается ОС, при этом ядро представляет собой высокий уровень абстракции над расположенным ниже оборудованием. Набор примитивных операций, называемых системными вызовами, реализует все функции ОС, такие как управление процессами, памятью, вводом-выводом. Часто имеется возможность добавлять драйверы устройств как модули ядра (в некоторых системах прямо во время работы). Ядро ОС представляет собой целый образ, реализованный на двоичном уровне. Модули также добавляются на двоичном уровне, а не на архитектурном уровне [5]. Такая модульность позволяет расширять возможности ОС. Тем не менее модули добавляют небольшие накладные расходы при вызовах. Принципиально изменить поведения ядра с помощью модулей невозможно. Как само ядро, так и модули работают в режиме ядра, что уменьшает безопасность кода в случае появления ошибок и уязвимостей.

Микроядерная архитектура ядра [6] используется в таких ОС, как Minix, Ameoba, QNX, AIX, Mac OS X, AmigaOS. Микроядро представляет собой программу, содержащую минимальный механизм, достаточный для того, чтобы реализовать операционную систему. Этот механизм включает в себя низкоуровневое управление адресным пространством, управление потоками и межпроцессное взаимодействие. Микроядро — единственная часть ОС, которая работает в привилегированном режиме (режиме ядра или супервизора). Все функции ОС (такие, как работа с устройствами, протоколами и файловыми системами) отсутствуют в микроядре и вместо этого работают как про-

цессы в режиме пользователя. В результате чего размер микроядра значительно меньше по сравнению с монолитным ядром. Это особенно заметно в случае большого числа поддерживаемых устройств, протоколов и файловых систем. Микроядерная архитектура позволяет уменьшить сложность при разработке и поддержке ОС [7], а снижение сложности ведет к уменьшению ошибок. Также при этом повышается безопасность ОС вследствие того, что большая часть ОС работает в ограниченном режиме пользователя. Ошибка и сбой одного из компонентов не приводят к остановке всей системы. Все компоненты ОС взаимодействуют друг с другом, посылая сообщения. Каждый компонент является сервером, выполняющим небольшой набор функций. Посылка сообщений может быть как синхронной, так и асинхронной. В случае наличия асинхронных сообщений производительность ОС становится меньше по сравнению с монолитной архитектурой. Поэтому чаще используют полностью синхронные сообщения с одновременным запросом и ответом, используя при этом регистры процессора. Базовый набор серверов для микроядра включает в себя работу с файловыми системами, видеоадаптером, сетевыми устройствами. При запуске системы все необходимые серверы стартуют автоматически, предоставляя функции пользовательским программам. Так как сервера работают в режиме пользователя, их можно в любой момент остановить, запустить и для этого не требуется перезагрузка системы. Такие возможности особенно важны при разработке ОС. Перезапуск серверов может реализовать стратегию восстановления ОС после сбоев.

Гибридная архитектура Windows NT, XNU [8] представляет собой сочетание монолитного ядра и микроядра. Структура гибридного ядра соответствует структуре ОС с микроядром, но эта структура реализуется как единое монолитное ядро. В отличие от микроядра все функции ОС работают в режиме ядра. Нет никаких преимуществ от работы сервисов в режиме пользователя, как это происходит в микроядерной архитектуре. Но в отличие от последней в гибридной архитектуре нет издержек производительности при передаче сообщений и переключений контекста между режимами пользователя и ядра. Таким образом, единственное преимущество гибридного ядра – это внутренняя архитектура, удобная для разработки и сопровождения.

Экзоядро – это ОС, разработанная в Массачусетском технологическом институте [9], дает возможность выполнять функции по защите и распределении ресурсов в меньшей мере, чем в микроядерной и монолитной архитектурах. Пользовательские приложения вызывают функции ядра как библиотечные вызовы, но при этом они взаимодействуют с аппаратурой в большей

степени, чем в других архитектурах. Ресурсами приложений являются адреса памяти, блоки диска и т. д. Ядро уведомляет приложение, что ресурс свободен и приложение имеет доступ к этому ресурсу. Это позволяет программисту выбирать нужный ему уровень абстракции при разработке программ в зависимости от требуемой производительности. Таким образом, экзоядро представляет собой компромисс между отсутствием ядра совсем и микроядром. Базовые ресурсы управляются ядром: страницы памяти, блоки диска и процессорное время, а пользовательские программы решают, каким образом нужно использовать эти ресурсы. Возможны промежуточные абстракции как библиотеки программ.

Следует заметить, что наибольшие сложности в разработке ОС возникают в результате необходимости разделения ресурсов ЭВМ между программами [10]. Поэтому современные ОС предоставляют различные способы распределения аппаратных ресурсов, таких как процессор, память и внешние устройства. В случае встроенных систем многие функции ОС слишком трудно реализовать с учетом ограничений. Это можно уменьшить, упростив ОС до небольшого количества модулей. Ядро ОС на основе виртуальной машины способно решить эти задачи. Таким образом, необходимо разработать компактную структуру ОС, используя виртуальную машину.

Материалы и методы

В качестве основы для ОС выбирается виртуальная машина (ВМ) [11] с уменьшенным набором команд. Уменьшенный набор команд приведен в таблице.

Таблица. Набор операций

Table. Instruction set

Команда	Назначение
ADDI o1,o2	Операция сложения
SUBI o1,o2	Операция вычитания
MULI o1,o2	Операция умножения
DIVI o1,o2	Операция деления
MOVL o1,o2	Операция копирования
CALLI o	Операция вызова
RETP	Операция возврата из процедуры
INT	Операция системного вызова

Окончание табл.

Команда	Назначение
RETI	Операция возврата из обработчика прерываний
STOP	Операция останова
PUSHI o	Операция загрузки значения в стек
POPI o	Операция выгрузки значения из стека
CMPI o1, o2	Операция сравнения
BR adr	Операция безусловного перехода
BRC con, adr	Операция условного переход

Операнды должны иметь следующие типы адресации: регистровая, непосредственная, косвенная, косвенная со смещением. Это позволяет сократить общее число инструкций машины.

Структура ОС показана на рисунке 1.

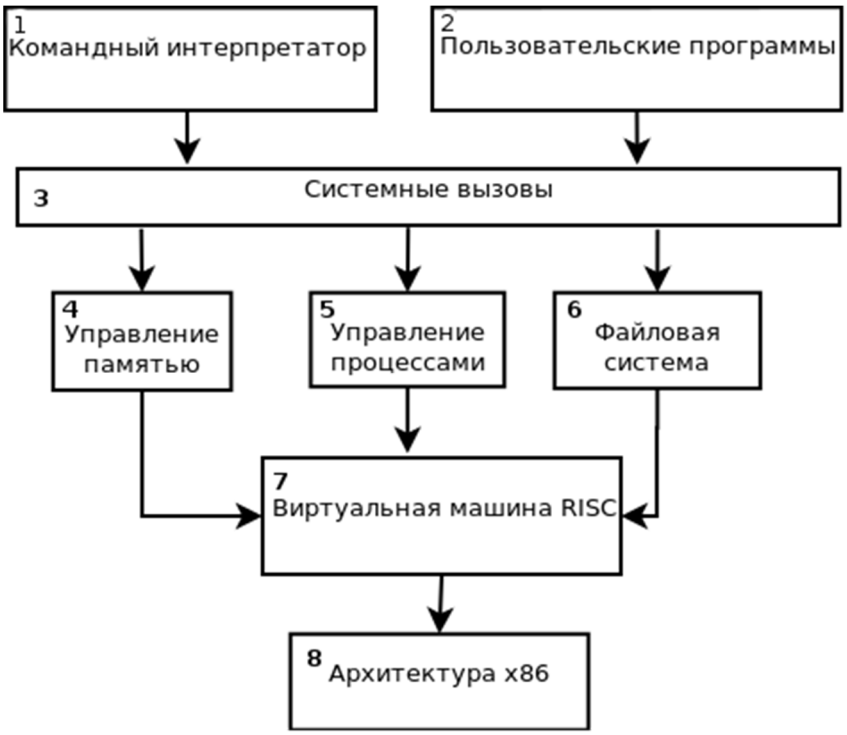

Рис. 1. Структура ОС

Fig. 1. OS structure

Программы (такие, как оболочка, – это блоки 1 и 2 на рис. 1) взаимодействуют с ОС с помощью системных вызовов (рис. 1, блок 3). Системные вызовы обеспечивают необходимые функции ОС. Ядро ОС представляет собой

транслированный байт-код инструкций для виртуальной машины (ВМ), который интерпретируется или выполняется. Так как компилируемая программа работает быстрей, чем интерпретируемая, то в данной машине используется компиляция на лету [12]. При этом регистры виртуальной машины отображаются в регистры процессора, а инструкции виртуальной машины превращаются в соответствующие инструкции процессора (например, x86).

Операционные системы обычно разрабатывают, начиная с нижних уровней [13]. На самом нижнем расположены уровни управления: памятью (рис. 1, блок 4), процессами (рис. 1, блок 5) и файловой системой (рис. 1, блок 6). Затем следует уровень виртуальной машины (рис. 1, блок 7) и нижний уровень архитектуры (рис. 1, блок 8). Верхний уровень операционной системы представляет собой уровень системных вызовов.

Структура ядра ОС показана на рисунке 2.

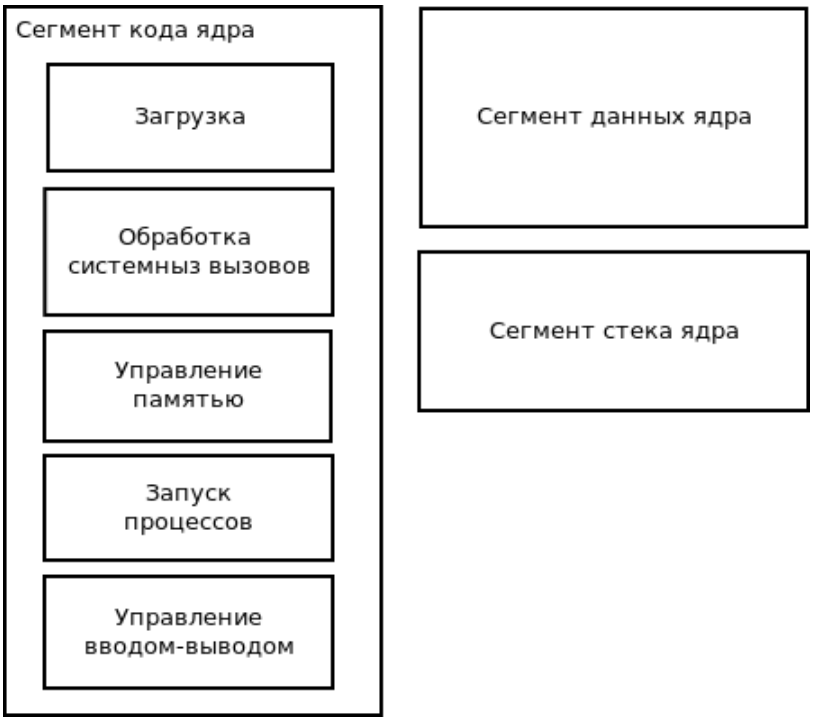

Рис. 2. Структура ядра ОС

Fig. 2. OS kernel structure

Ядро ОС состоит из сегмента кода, сегмента данных и сегмента стека. Данные ядра включают в себя строки сообщений ядра, сообщения об ошибках, таблицу системных вызовов с адресами обработчиков. Стек используется для хранения адресов возврата из подпрограмм. Код ядра включает несколько подсистем. Подсистема загрузки включает в себя инициализацию ядра, запуск

стартового процесса, такого как командный интерпретатор. Подсистема обработки системных вызовов обслуживает программные прерывания, поступающие от пользовательских программ. Она выполняет переход в режим ядра, выбирая необходимую подпрограмму для каждого из системных вызовов, используя таблицу адресов для системных вызовов. Подсистема управления памятью включает в себя примитивные операции с памятью. Основной операцией по работе с памятью является копирование блока памяти заданного размера из одного адреса в другой адрес. Подсистема управления процессами служит для запуска пользовательских процессов и восстановления состояния ОС после завершения процессов. Подсистема ввода-вывода управляет устройствами ввода-вывода, такими как дисковый накопитель. Для удобства программирования обращение к диску происходит не на уровне байтов, как в оперативной памяти, а на уровне блоков, имеющих размер от 512 байт.

Результаты и их обсуждение

После трансляции исходного кода ОС получился образ ядра, содержащий байт-код. На рисунке 3 показан шестнадцатеричный дамп байт-кода ядра.

```
00000000  4f 53 56 4d 00 00 3d 00  3d 00 72 01 40 00 5a 00  |OSVM..=.=.r.@.Z.|
00000010  4f 53 56 4d 20 73 74 61  72 74 69 6e 67 2e 2e 2e  |OSVM starting...|
00000020  0a 00 49 6e 76 61 6c 69  64 20 63 6f 6d 6d 61 6e  |..Invalid comman|
00000030  64 2e 2e 2e 0a 00 44 69  73 6b 20 65 72 72 6f 72  |d.....Disk error|
00000040  2e 2e 2e 0a 00 89 01 00  00 16 6b 00 12 02 12 03  |..........k.....|
00000050  05 02 39 00 00 02 01 0a  03 02 07 03 3b 00 13 03  |..9.........;...|
00000060  13 02 19 3b 00 10 05 01  16 00 0c a7 00 05 02 02  |...;............|
00000070  00 00 05 02 16 00 f0 05  05 f0 ff 05 01 04 00 0c  |................|
00000080  a7 00 05 01 00 00 05 02  02 00 0f 11 05 02 0a 00  |................|
00000090  05 03 01 00 05 01 31 00  07 01 ff ff 01 02 03 15  |......1.........|
000000a0  02 00 00 18 01 9e 00 16  8c 00 11 16 9e 00 05 01  |................|
000000b0  01 00 0f 12 02 12 03 05  03 01 00 08 02 01 15 02  |................|
000000c0  00 00 18 01 c4 00 07 02  ff ff 00 01 03 16 af 00  |................|
000000d0  13 03 13 02 0e 0e 12 01  12 02 12 03 12 04 05 04  |................|
000000e0  01 00 15 02 00 00 18 01  f4 00 12 02 08 02 01 09  |................|
000000f0  02 03 13 02 00 01 04 00  03 04 01 02 04 16 d6 00  |................|
00000100  13 04 13 03 13 02 13 01  0e 12 01 12 03 12 04 05  |................|
00000110  04 01 00 07 02 fb ff 05  03 14 00 07 03 fe ff 08  |................|
00000120  03 01 00 01 04 07 03 fa  ff 06 03 fd ff 15 03 1e  |................|
00000130  00 18 01 13 01 15 03 01  00 18 01 3c 01 15 03 02  |...........<....|
00000140  00 05 01 2a 00 0c a7 00  13 04 13 03 13 01 0e 12  |...*............|
00000150  01 12 03 12 04 05 04 01  00 07 02 fb ff 05 03 0a  |................|
00000160  00 07 03 fe ff 06 03 fa  ff 09 03 01 00 01 04 06  |................|
00000170  03 fd ff 15 03 1e 00 18  01 59 01 15 03 01 00 18  |.........Y......|
```

Рис. 3. Дамп байт-кода ядра ОС

Fig. 3. OS kernel byte-code dump

Каждая команда виртуальной машины кодируется соответствующим кодом, операндами могут быть как номера регистров, так и адреса памяти. В виртуальной машине используется четыре регистра общего назначения и пять специальных регистров: слово состояния ВМ, указатель команд, указатель стека, базовый

адрес режима ядра, базовый адрес режима пользователя. Слово состояния ВМ состоит из битов режима работы (режим ядра и режим пользователя) и битов флагов, которые устанавливаются после выполнения операции сравнения. Результатом сравнения могут быть операции: больше, меньше или равно. Получившийся образ ядра занимает меньше 1 килобайта (можно сравнить с размером образов современных систем [14]).

Сама виртуальная машина была реализована для архитектуры x86, при этом размер исполняемого модуля составил 19 кбайт. На рисунке 4 представлен фрагмент листинга кода виртуальной машины для архитектуры x86, реализованной на ассемблере GAS.

```
.LHOTB71:
        .p2align 4,,15
        .globl  main
        .type   main, @function
main:
.LFB55:
        .cfi_startproc
        pushq   %r12
        .cfi_def_cfa_offset 16
        .cfi_offset 12, -16
        pushq   %rbp
        .cfi_def_cfa_offset 24
        .cfi_offset 6, -24
        movq    %rsi, %r12
        pushq   %rbx
        .cfi_def_cfa_offset 32
        .cfi_offset 3, -32
        movl    %edi, %ebp
        movl    $.LC66, %esi
        movl    $.LC67, %edi
        call    fopen
        cmpl    $1, %ebp
        movq    %rax, %rbx
        jle     .L97
        movq    8(%r12), %rax
        movb    $114, (%rax)
        movl    $1, run(%rip)
.L97:
        movq    %rbx, %rcx
        movl    $1, %edx
        movl    $12, %esi
        movl    $h, %edi
        call    fread
        cmpw    $21327, h(%rip)
        jne     .L98
        cmpw    $19798, h+2(%rip)
        jne     .L98
```

Рис. 4. Фрагмент листинга кода виртуальной машины

Fig. 4. Virtual machine code listing

Таким образом, полученные файлы имеют маленький размер (около 20 Кбайт), что весьма подходит для встраиваемых систем, ограниченных объемом памяти.

Выводы

Таким образом, разработанная модель операционной системы имеет небольшой объем ядра (около 1 Кбайта) и виртуальную машину с объемом 19 Кбайт. Использование виртуальной машины позволяет достаточно легко переносить данную систему на различные встроенные (embeded) устройства [15] за счет того, что большая часть кода не изменяется. Для новой аппаратуры достаточно реализовать небольшой набор инструкций виртуальной машины. Сложность аппаратуры [16] абстрагируется за счет применения простой виртуальной машины.

Список литературы

1. Таненбаум Э., Бос Х. Современные операционные системы. 4-е изд. СПб.: Питер, 2015. 1120 с.

2. RISC | Intel вики | Fandom. URL: https://intel.fandom.com/ru/wiki/RISC (accessed 10.11.2019).

3. Ли И. В., Балса А. Р. Современные подходы к разработке операционных систем для масштабируемых многоядерных систем // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2014. № 1. С. 6-14.

4. Бовет Д., Чезати М. Ядро Linux. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 1105 с.

5. Чепцов В. Ю., Черкасова Н. И. Разработка метода динамической модификации расширений ядра в операционной системе macos для обработки радиолокационной и метеоинформации // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2017. № 3. С. 61-71.

6. Minix – Национальная библиотека им. Н. Э. Баумана. URL: https://ru.bmstu.wiki/MINIX (дата обращения: 10.02.2020).

7. Сартаков В. А., Атовмян И. О., Заева М. А. Опыт разработки и тестирования встраиваемой микроядерной операционной системы // Прикладная информатика. 2011. № 6. С. 33-37.

8. Кастер Х. Основы Windows NT и NTFS. М.: Русская Редакция, 1996. 440 с.

9. Dawson R. The Exokernel Operating System Architecture. URL: http://www.dspace.mit.ecu>bitstream…MIT.pdf (accessed 15.11.2019).

10. Николаев Д., Староверова Н. Хасанова А. Принцип уровней абстракции и его использование при разработке операционных систем // Вестник технологического университета. 2015. № 10. С. 180-183.

11. Князев В. Н., Блошкин А. С. Разработка системы управления виртуальными машинами для операционной системы специального назначения // Молодежь в науке: новые аргументы: сб. научных работ IX Международного молодежного конкурса / Пензинский государственный университет. Пенза, 2018. С. 73-78.

12. Компиляция и исполнение Java приложения. URL: https://javarush.ru/groups/posts/2256-kompiljacija-i-ispolnenie-java-prilozheniy-pod-kapotom (дата обращения: 15.11.2019).

13. Таненбаум Э., Вудхалл А. Операционные системы. Разработка и реализация. URL: http://www.obuchalka.org>...sistemi…i…tanenbaum… (дата обращения: 10.11.2019).

14. Разработка образа операционной системы FreeBSD для установки виртуального маршрутизатора и программного средства переключения путей маршрутизации / Е. Ряполова, М. Студянникова, А. Преснов, К. Цветкова // Первая миля. 2019. № 4. С. 60-63.

15. Васильев А. Е., Смирнова Н. В. Разработка операционной системы для встраиваемых микроконтроллеров // XXXI неделя науки СПБГПУ: материалы межвузовской научной конференции / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. СПб., 2003. С. 72-73.

16. Мартынов И. А. Оценка аппаратной сложности устройства для быстрой аппаратно-ориентированной классификации бинарных отношений вершин граф-схем параллельных алгоритмов // Известия Юuго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 3. С. 67-75.

References

1. Tanenbaum E., Bos H. Sovremennye operacionnye sistemy [Modern operating system]. 4th ed. St. Petersburg, Piter Publ., 2015. 1120 p. (In Russ.)

2. RISC | Intel wiki| Fandom. Available at: https://intel.fandom.com/ru/wiki/RISC. (accessed 10.02.2020)

3. Li I. V., Balsa A. R. Sovremennye podkhody k razrabotke operatsionnykh sistem dlya masshtabiruemykh mnogoyadernykh sistem [Modern methods of developing of operating systems for clustering multicore systems]. *Informatsionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo = Informacionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, parvo*, 2014, no. 1, pp. 6–14. (In Russ.)

4. Bovet D., Chezati M. Yadro Linux [Linux kernel]. 4th ed. St. Peterburg, BHV-Peterburg, 2007. 1105 p. (In Russ.)

5. Chepcov V. U., Cherkasova N. I. Razrabotka metoda dinamicheskoi modifikatsii rasshirenii yadra v operatsionnoi sisteme macos dlya obrabotki radiolokatsionnoi i meteoinformatsii [Developing of dynamic modification method for kernel modules in MacOS operating system for radio- and meteo- information processing]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosu-*

darstvennogo universiteta grazhdanskoi aviatsii = Vestnik Sankt-peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviacii, 2017, no. 3, pp. 61-71. (In Russ.)

6. Minix – Natsional'naya biblioteka im. N. E. Baumana [Minix – national library named after N. E. Bauman]. (In Russ.) Available at: https://ru.bmstu.wiki/MINIX (accessed 10.02.2020).

7. Sartakov V. A., Atovmyan I. O., Zaeva M. A. Opyt razrabotki i testirovaniya vstraivaemoi mikroyadernoi operatsionnoi sistemy [Developing and testing experience of embedded microkernel operating system]. *Prikladnaya informatika = Prikladnaya informatika*, 2011, no. 6, pp. 33-37. (In Russ.)

8. Kaster H. Osnovy Windows NT i NTFS [Windows NT and NTFS basics]. Moscow, Russkaya Redakciya Publ., 1996. 440 p. (In Russ.)

9. Dawson R. The Exokernel Operating System Architecture. Available at: http://www.dspace.mit.ecu>bitstream…MIT.pdf. (accessed 15.11.2019)

10. Nikolaev D., Staroverova N. Hasanova A. Printsip urovnei abstraktsii i ego ispol'zovanie pri razrabotke operatsionnykh sistem [Abstraction level concept and its using in operating systems development]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, no. 10, pp. 180-183. (In Russ.)

11. Knyazev V. N., Bloshkin A. S. [Development of virtual machine control system for special purpose operating system]. Molodezh' v nauke: novye argumenty. Sbornik nauchnykh rabot IX Mezhdunarodnogo molodezhnogo konkursa [Outh in science: new arguments: collection of scientific papers of the IX International youth competition]. Penza, Penza st. Univ. Publ., 2018, pp. 73-78. (In Russ.)

12. Kompilyatsiya i ispolnenie Java prilozheniya [Compilation and execution of Java application]. (In Russ.) Available at: https://javarush.ru/groups/posts/2256-kompiljacija-i-ispolnenie-java-prilozheniy-pod-kapotom. (accessed 10.02.2020)

13. Tanenbaum E., Vudhall A. Operatsionnye sistemy. Razrabotka i realizatsiya [Operating systems. Development and implementation]. (In Russ.) Available at: http://www.obuchalka.org>...sistemi…i…tanenbaum… (accessed 10.11.2019)

14. Ryapolova E., Studyannikova M., Presnov A., Cvetkova K. Razrabotka obraza operatsionnoi sistemy FreeBSD dlya ustanovki virtual'nogo marshrutizatora i programmnogo sredstva pereklyucheniya putei marshrutizatsii [Development of FreeBSD operating system image for vitual router and switching routes application setup]. *Pervaya milya = Pervaya milya*, 2019, no. 4, pp. 60-63. (In Russ.)

15. Vasil'ev A. E., Smirnova N. V. [Development of operating system for embedded microcontrollers]. XXXI nedelya nauki SPBGPU. Materialy mezhvuzovskoi nauchnoi konferentsii [XXXI science week SPBSPU. Proceedings of the interuniversity scientific conference]. St. Peterburg, St.-Peterb. st. Politehn. Univ. Publ., 2003, pp. 72-73. (In Russ.)

16. Martynov I. A. Otsenka apparatnoi slozhnosti ustroistva dlya bystroi apparatno-orientirovannoi klassifikatsii binarnykh otnoshenii vershin graf-skhem parallel'nykh algoritmov [Hardware complexity estimation of accelerator for fast determining of vertices binary relations of parallelalgorithms graph-schemes]. *Izvestiya Yuugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2015, no. 3, pp. 67-75. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Чаплыгин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры программной инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Aleksandr A. Chaplygin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Software Engeneering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: alex_chaplygin@mail.ru

Малышев Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры программной инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: alta76@yandex.ru

Aleksandr V. Malyshev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Software Engeneering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: alta76@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.391

Оценка потенциальной помехоустойчивости приёма цифровых сигналов, используемых в современных и перспективных системах радиорелейной и спутниковой связи

В. Г. Довбня[1], Д. С. Коптев[1] ✉, И. Г. Бабанин[1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Целью исследования *является обобщение имеющихся данных работ по расчёту потенциальной помехоустойчивости приёма сигналов цифровых линий связи, а также разработка теоретических выражений и графических зависимостей для сигналов с более сложными комбинированными видами модуляции (КАМ-8, АФМ), как уже применяемых, так и планируемых к использованию в ЦРРЛС и ЦФСС.*

Методы исследования *базируются на основах теории потенциальной помехоустойчивости, изложенных в работах В. А. Котельникова, Л. М. Финка, Б. М. Окунева, Д. Д. Кловского, А. Г. Зюко, В. Л. Банкета, В. Г. Карташевского, Г. Найквиста. При разработке теоретических выражений было принято комплексную аддитивную помеху, действующую в канале распространения радиоволн, в соответствии с центральной предельной теоремой считать гауссовской с равномерным спектром в полосе принимаемого сигнала. Учитывая сложность получения аналитических выражений для точной оценки потенциальной помехоустойчивости сигналов АФМ, положим, что минимальное евклидово расстояние между сигнальными точками, расположенными на разных концентрических окружностях фазовой диаграммы, существенно превосходит расстояние между точками одной окружности. В этом случае сигналы АФМ можно условно представить в виде совокупности сигналов с фазовой манипуляцией гипотетической позиционности: АФМ-16 – как ФМ-4 и ФМ-12; АФМ-32 – как ФМ-4, ФМ-12 и ФМ-16; АФМ-64 – как ФМ-4, ФМ-12, ФМ-20 и ФМ-28.*

Результаты. *В статье разработаны теоретические выражения для расчета потенциальной помехоустойчивости простых (амплитудной, частотной и фазовой) и многопозиционных (квадратурной амплитудной и амплитудно-фазовой) цифровых видов модуляции, используемых в современных ЦРРЛС и ЦФСС. Анализ спектральной эффективности показал, что наибольшей обладают КАМ- и АФМн-сигналы. Среди ЧМн-сигналов наибольшей спектральной эффективностью обладают сигналы ЧМНФ-4 с индексом модуляции 0,3 и ММС-4. Наибольшей потенциальной помехоустойчивостью обладают сигналы АМн-2 и ФМ-2, поскольку их реализации являются противоположными сигналами. Оценка потенциальной помехоустойчивости сигналов КАМ-8 и ФМ-8, являющихся перспективными в использовании в ЦФСС, показала, что КАМ-8 превышает сигнал ФМ-8 на 1,2 дБ. Сигнал ФМ-16 по помехоустойчивости уступает сигналу КАМ-16 на 4 дБ, что существенно ограничивает целесообразность использования модуляции ФМ-16. АФМн-сигналы по помехоустойчивости незначительно (на 0,2…1,7 дБ) уступают КАМ-сигналам той же позиционности. В то же время существенно более узкий динамический диапазон сигналов с АФМн определяет перспективность использования указанных сигналов в спутниковых линиях связи с нелинейными транспондерами.*

© Довбня В. Г., Коптев Д. С., Бабанин И. Г., 2020

Заключение. *Таким образом, полученные обобщенные теоретические выражения и графические зависимости для оценки потенциальной помехоустойчивости приёма цифровых сигналов в канале с комплексной аддитивной помехой позволяют теоретически обосновать технические требования к радиоприемным устройствам по помехоустойчивости при приеме цифровых сигналов различной помехоустойчивости.*

Ключевые слова*: потенциальная помехоустойчивость; цифровой сигнал; приём; модуляция; цифровые радиорелейные линии связи (ЦРРЛС); системы цифровой фиксированной спутниковой связи (ЦФСС); спектральная эффективность; энергетическая эффективность; отношение сигнал-шум.*

Конфликт интересов*: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Довбня В. Г., Коптев Д. С., Бабанин И. Г. Оценка потенциальной помехоустойчивости приёма цифровых сигналов, используемых в современных и перспективных системах радиорелейной и спутниковой связи // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 21–35.

Поступила в редакцию 18.12.2019 *Подписана в печать 17.01.2020* *Опубликована 25.02.2020*

Assessment of Potential Interference of Receiving Digital Signals Used in Modern and Perspective Radio-Relay and Satellite Communication Systems

Vitaliy G. Dovbnya[1], Dmitry S. Koptev[1] ✉, Ivan G. Babanin[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str., 94, Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Abstract

Purpose of research *is to generalize the available data on the calculation of the potential noise immunity of receiving signals from digital communication lines, as well as the development of theoretical expressions and graphic dependencies for signals with more complex combined types of modulation (QAM-8, APM), both already used and planned to be used in digital microwave links and digital fixed satellite systems.*

Methods *are based on the foundations of the theory of potential noise immunity, described in the works of V.A. Kotelnikova, L.M. Finca, B.M. Okuneva, D.D. Klovsky, A.G. Zyuko, V.L. Banquet, V.G. Kartashevsky, G. Nyquist. In developing the theoretical expressions, the complex additive interference acting in the radio wave propagation channel was adopted, in accordance with the central limit theorem, it is considered Gaussian with a uniform spectrum in the band of the received signal. Given the difficulty of obtaining analytical expressions for an accurate estimate of the potential noise immunity of APM signals, we assume that the minimum euclidean distance between signal points located on different concentric circles of the phase diagram substantially exceeds the distance between points of the same circle. In this case, APM signals can be arbitrarily represented as a set of signals with phase manipulation of hypothetical positionality: APM-16 - as PM-4 and PM-12; APM-32 - as PM-4, PM-12 and PM-16; APM-64 - as PM-4, PM-12, PM-20 and PM-28.*

Results. *The article developed theoretical expressions for calculating the potential noise immunity of simple (amplitude, frequency and phase) and multiposition (quadrature amplitude and amplitude-phase) digital types of modulation used in modern radio-relay and satellite communication systems.*
An analysis of the spectral efficiency showed that the QAM and APMn signals possess the greatest. Among FM signals, the signals with the highest modulation efficiency are C4FM with a modulation index of 0.3 and FM-4. Signals AM-2 and FM-2 have the greatest potential noise immunity, since their implementations are opposite signals. Assessment of the potential noise immunity of the QAM-8 and PM-8 signals, which are promising for use in satellite communication systems, showed that QAM-8 exceeds the PM-8 signal by 1.2 dB. The PM-16 signal in noise immunity is inferior to the QAM-16 signal by 4 dB, which significantly limits the feasibility of using PM-16 modulation. APMn signals in noise immunity are slightly (0.2 ... 1.7 dB) inferior to QAM signals of the same positionality. At the same time, a significantly narrower dynamic range of signals with APMn determines the prospects of using these signals in satellite communication lines with non-linear transponders.
Conclusion. *Thus, the obtained generalized theoretical expressions and graphical dependencies for assessing the potential noise immunity of receiving digital signals in a channel with complex additive noise allow theoretically substantiating the technical requirements for radio noise immunity devices when receiving digital signals of various noise immunity.*

Keywords*: potential noise immunity; digital signal; reception; modulation; digital radio-relay communication lines; digital fixed-satellite communications systems; spectral efficiency; energy efficiency; signal-to-noise ratio.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Dovbnya V. G., Koptev D. S., Babanin I. G. Assessment of Potential Interference of Receiving Digital Signals Used in Modern and Perspective Radio-Relay and Satellite Communication Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(1): 21–35. (In Russ.)

Received 18.12.2019 *Accepted 17.01.2020* *Published 25.02.2020*

***

Введение

Основу современных телекоммуникационных систем и сетей, обслуживающих фиксированные радиослужбы, составляют цифровые радиорелейные и спутниковые линии связи.

Совершенствование цифровых линий связи фиксированных радиослужб в направлении расширения границ диапазона рабочих частот в сторону миллиметровых волн, усложнения используемых видов модуляции путем перехода к многопозиционным сигналам с комбинированными видами модуляции, возрастания скоростей передачи информации, использования технологий инверсного мультиплексирования и поляризационного уплотнения каналов, адаптивного (в зависимости от условий распространения радиоволн) изменения вида модуляции и мощности излучения, с одной стороны, и высокая сложность электромагнитной обстановки, обусловленная постоянным ростом количества номенклатуры источников радиоизлучения, возрастанием числа нелицензированных источников с высоким уровнем непреднамеренных электромагнитных излучений и помех, а также продолжающимся ростом плотности и высоты городской застройки, с другой

стороны, объективно обусловливают необходимость совершенствования радиоприемных систем цифровых линий связи в направлении повышения помехоустойчивости, чем и обусловлена актуальность данной работы.

Одним из ключевых вопросов, которые возникают при проектировании современных и перспективных цифровых систем передачи информации, является вопрос обеспечения требуемой помехоустойчивости приёма цифровых радиосигналов [1].

Цифровая модуляция – процесс изменения одного или нескольких параметров высокочастотного модулируемого колебания в соответствии с модулирующим цифровым сигналом [1; 2; 3; 4].

В процессе цифровой модуляции передаваемый информационный цифровой поток разбивается на блоки (символы) объемом K-бит и каждому блоку однозначно ставится в соответствие один из $M = 2^K$ сигналов, где $K = \log_2 M$ определяет кратность модуляции сигнала, а M – его позиционность. При этом наилучшим способом задания этого соответствия является такой способ, при котором наименьшему евклидовому расстоянию соответствовало наименьшее хеммингово расстояние (например, код Грея).

При сравнительном анализе видов цифровой модуляции исходят прежде всего из показателя, определяющего эффективность использования системой энергетических (высокочастотной мощности) ресурсов.

Энергетическая эффективность характеризует достоверность передаваемых данных при воздействии на сигнал аддитивного белого гауссовского шума при условии, что последовательность символов восстановлена идеальным демодулятором. Определяется минимальным отношением сигнал/шум (ОСШ), которое необходимо для передачи данных через канал с вероятностью ошибки, не превышающей заданную [2; 4].

В качестве отношения сигнал/шум в радиотехнических системах принято использовать отношение средней энергии бита к односторонней спектральной плотности мощности шума [5; 6]

$$h_b^2 = \overline{E_b} / N_0$$

или отношение средней энергии символа к односторонней спектральной плотности мощности шума

$$h^2 = \overline{E} / N_0,$$

которые связаны следующим выражением:

$$h^2 = h_b^2 \log_2 M.$$

В качестве количественной меры помехоустойчивости чаще всего рассматривается средняя вероятность битовой ошибки P_b, которая для случая абсолютного модуляционного кодирования, выполняемого в соответствии с правилом «минимальному евклидовому расстоянию соответствует минимальное хеммингово расстояние», связана с вероятностью символьной

ошибки (приема элемента сигнала) P следующим соотношением:

$$P = P_b \log_2 M.$$

Зависимость вероятности ошибки идеального демодулятора от отношения сигнал/шум называется кривой энергетической эффективности или ***потенциальной помехоустойчивости***.

В ЦРРЛС и ЦФСС используются следующие основные виды цифровой манипуляции:

– амплитудная (АМн или ASK – Amplitude Shift Keying);

– частотная (ЧМн или FSK – Frequency Shift Keying);

– фазовая (ФМн или PSK – Phase Shift Keying);

– квадратурная амплитудная (КАМ или QAM – Quadrature Amplitude Modulation);

– амплитудно-фазовая (АФМн или APSK – Amplitude-Phase Shift Keying);

– многомерная ортогональная частотная модуляция (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplex) (рис. 1) [2].

Материалы и методы

Вероятность битовой ошибки приема сигналов с простыми видами (амплитудной, частотной и фазовой) манипуляции в канале с аддитивным белым гауссовским шумом при условии, что последовательность символов восстановлена идеальным демодулятором, может быть определена из следующих выражений [5; 6; 7; 8]:

$$P_{b\,\text{АМн}} = \frac{2}{\log_2 M}\frac{M-1}{M} Q\left[\sqrt{\frac{6}{M^2-1}\cdot\frac{\overline{E}_b \log_2 M}{N_0}}\right]; \quad (1)$$

$$P_{b\,\text{ЧМн}} = \frac{2}{\log_2 M}\frac{M-1}{M} Q\left[\sqrt{\frac{1-\frac{\sin(2\pi m)}{2\pi m}}{(M-1)m+1}\cdot\frac{E_b \log_2 M}{N_0}}\right]; \quad (2)$$

$$P_{b\,\text{ММС}} = \frac{2}{\log_2 M}\frac{M-1}{M} Q\left[\sqrt{\frac{1}{0,5(M-1)+1}\cdot\frac{E_b \log_2 M}{N_0}}\right]; \quad (3)$$

$$P_{b\,ФМ-2} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right); \quad (4)$$

$$P_{b\,ФМ} = \frac{2}{\log_2 M} Q\left[\sin\left(\frac{\pi}{M}\right)\sqrt{\frac{2E_b \log_2 M}{N_0}}\right], \quad M > 2, \quad (5)$$

где $Q(y)$ – интеграл ошибок;

$$Q(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_y^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx.$$

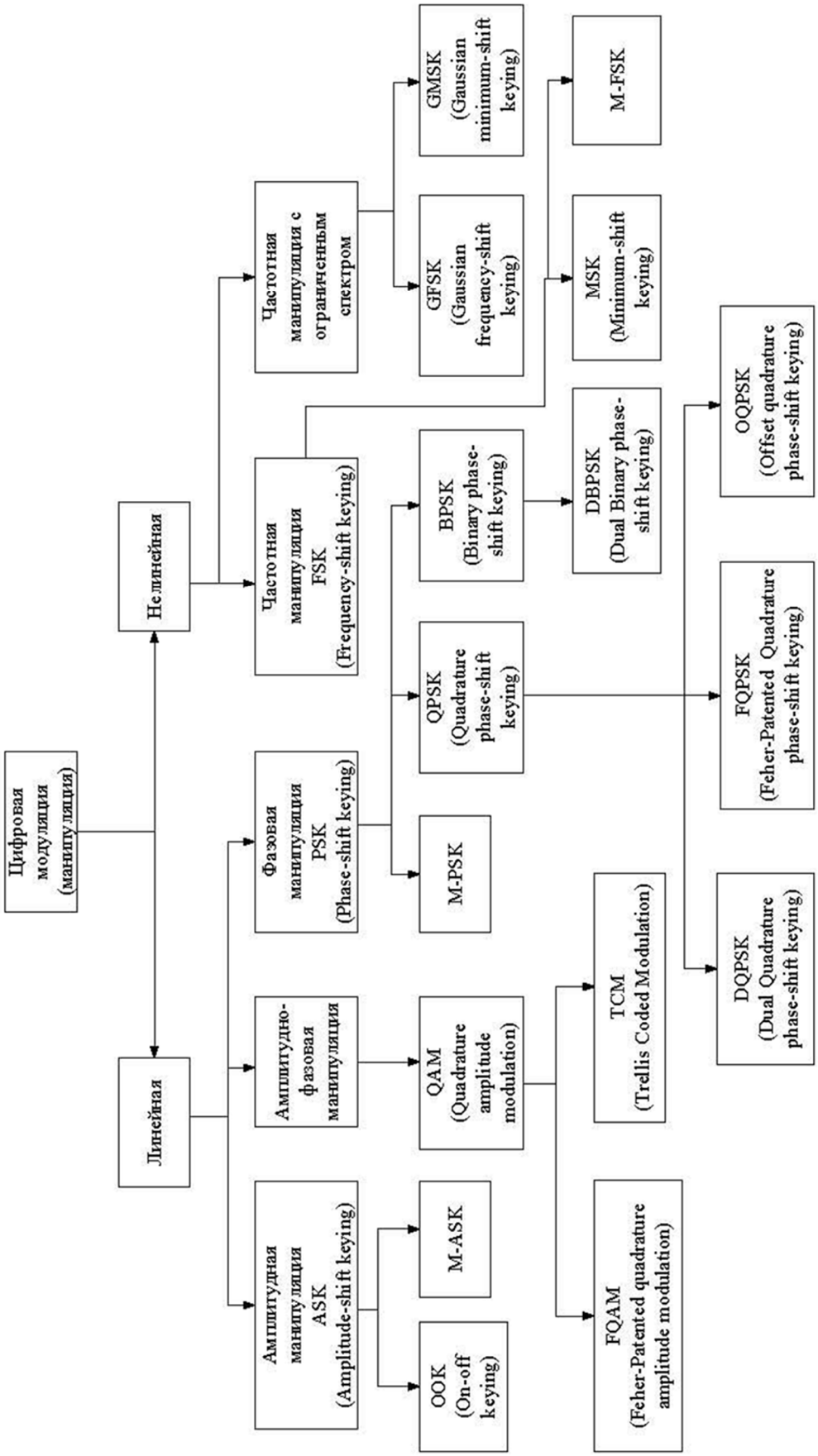

Рис. 1. Виды цифровой модуляции радиосигналов

Fig. 1. Types of digital modulation of radio signals

В большинстве практических случаев удобнее использовать зависимость вероятности битовой ошибки от отношения средней энергии символа к односторонней спектральной плотности мощности шума [9].

В этом случае выражения (1) – (5) могут быть записаны в следующем обобщенном виде:

$$P_b = \frac{k_1}{\log_2 M}\operatorname{erfc}(\sqrt{k_2 h^2}), \qquad (6)$$

где $\operatorname{erfc}(y)$ – дополнительная функция ошибок;

$$\operatorname{erfc}(y) = 2Q(\sqrt{2}\ y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_y^{\infty}\exp(-x^2)dx;$$

k_1, k_2 – коэффициенты, принимающие значения в соответствии с таблицей 1.

Результаты и их обсуждение

Графики потенциальной помехоустойчивости для сигналов АМн, ММС и ФМ, рассчитанные с помощью выражения (6) для значений коэффициентов k_1, k_2 из таблицы 1, приведены соответственно на рисунках 2 и 3.

Таблица 1. Значения коэффициентов k_1, k_2 для сигналов с простыми видами манипуляции

Table 1. The values of the coefficients k_1, k_2 for signals with simple types of manipulation

Вид манипуляции	АМн-М	ЧМн-М	ММС	ФМ-2	ФМ-М
k_1	$\frac{M-1}{M}$	$\frac{M-1}{M}$	$\frac{M-1}{M}$	0,5	1
k_2	$\frac{3}{M^2-1}$	$\frac{1-\sin(2\pi m)/(2\pi m)}{2m(M-1)+2}$	$\frac{1}{M+1}$	1	$\sin^2(\pi/M)$

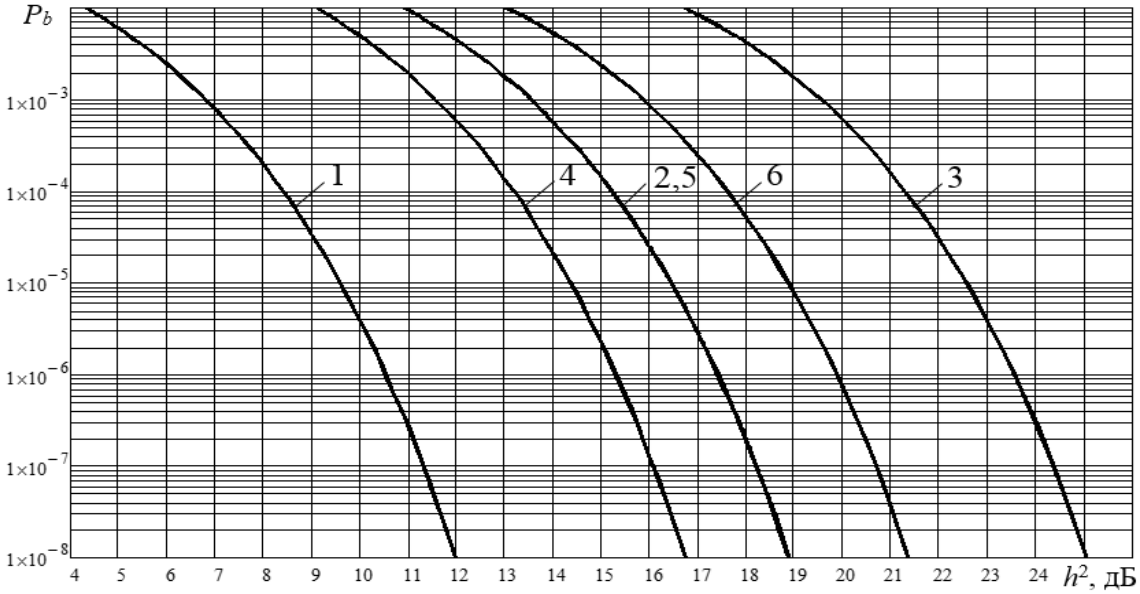

Рис. 2. Потенциальная помехоустойчивость приема цифровых сигналов:
1 – АМн-2; 2 – АМн-4; 3 – АМн-8; 4 – ММС; 5 – ММС-4; 6 – ММС-8

Fig. 2. Potential noise immunity of receiving digital signals: 1 – AMn-2; 2 – AMn-4; 3 – AMn-8; 4 – MSK; 5 – MSK-4; 6 – MSK-8

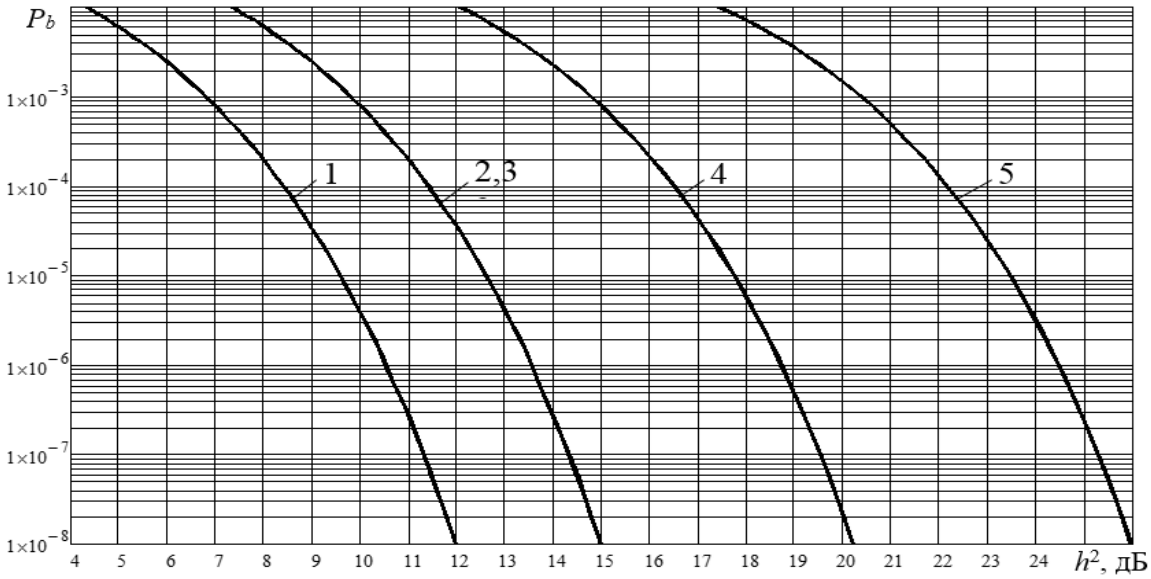

Рис. 3. Потенциальная помехоустойчивость приема цифровых сигналов:
1 – ФМ-2; 2 – ФМ-4; 3 – ФМ-4С; 4 – ФМ-8; 5 – ФМ-16

Fig. 3. Potential noise immunity of receiving digital signals:
1 – PM-2; 2 – PM-4; 3 – PM-4C; 4 – PM-8; 5 – PM-16

Значения энергетической эффективности цифровых сигналов с простыми видами модуляции для вероятности битовой ошибки 10^{-6} приведены в таблице 2 [10; 11; 12; 13].

Таблица 2. Значения энергетической эффективности сигналов с простыми видами манипуляции

Table 2. The values of the energy efficiency of signals with simple types of manipulation

Вид модуляции	Значение h^2 для $P_b = 10^{-6}$, дБ	Значение h_b^2 для $P_b = 10^{-6}$, дБ
АМн-2	10,5	10,5
АМн-4	17,4	14,4
АМн-8	23,5	18,7
ЧМНФ-2, *m*=1	16,6	16,6
ЧМНФ-4, *m*=1	19,5	16,5
ЧМНФ-2, *m*=0,7	15,0	15,0
ЧМНФ-4, *m*=0,7	17,5	14,5
ММС	15,3	15,3
ММС-4	17,4	14,4
ММС-8	18,9	14,1
ЧМНФ-2, *m*=0,3	17,7	17,7
ЧМНФ-4, *m*=0,3	19,3	16,3
ФМ-2	10,5	10,5
ФМ-4, ФМ-4С	13,5	10,5
ФМ-8	18,7	13,9
ФМ-16	24,5	18,5

Сравнительный анализ графиков, представленных на рисунках 1 и 2, и данных таблицы 2 показывает, что:

– наибольшей помехоустойчивостью обладают сигналы АМн-2 и ФМ-2, поскольку их реализации являются противоположными сигналами;

– сигналы АМн-4 и ММС-4 обладают одинаковой помехоустойчивостью;

– наибольшей помехоустойчивостью обладают сигналы с фазовой манипуляцией [1; 14].

Потенциальная помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией может быть определена из следующих выражений:

$$P_{b_{\text{КАМ-М}}} = \frac{4}{\log_2 M}\frac{L-1}{L}\cdot Q\left[\sqrt{\frac{3}{M-1}\cdot\frac{\bar{E}_b \log_2 M}{N_0}}\right], \quad (7)$$

или

$$P_{b_{\text{КАМ-М}}} = \frac{2}{\log_2 M}\frac{L-1}{L}\cdot \operatorname{erfc}\left[\sqrt{\frac{1{,}5}{M-1}\cdot h^2}\right], \quad (8)$$

где L – число уровней амплитуд огибающих квадратурных составляющих КАМ-сигнала, равное $\sqrt{M}$, если кратность вида модуляции сигнала $K = \log_2 M$ четная, и $\sqrt{1{,}125M}$ – если нечетная.

Нахождение выражения для расчета вероятности ошибки для сигналов АФМ представляет собой довольно сложную задачу.

Поскольку каждый из рассматриваемых сигналов может быть представлен в виде совокупности элементарных сигналов $s_1(t)$, $s_2(t)$, ..., $s_M(t)$ с равными априорными вероятностями, то для такой системы сигналов, передаваемых в любом канале, справедлива следующая оценка вероятности ошибки, называемая верхней аддитивной границей (границей Буля):

$$P = \frac{1}{M}\cdot\sum_{j=1}^{M} P_i = \frac{1}{M}\cdot\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M} P_{i,j} \le (M-1)\max P_{i,j},\ i \ne j, \quad (9)$$

где P_i – вероятность ошибочного приема при передаче $s_i(t)$ сигнала;

$P_{i,j}$ – вероятность ошибочного приёма в двоичной системе, использующей сигналы $s_i(t)$ и $s_j(t)$;

$\max P_{i,j}$ – максимальная по всем парам i, j вероятность ошибки в двоичной системе с сигналами $s_i(t)$ и $s_j(t)$.

Тогда выражение для верхней границы вероятности битовой ошибки будет иметь вид

$$P_b = \frac{M-1}{2\cdot\log_2 M}\cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{d^2_{E\min}}{4\cdot N_0}}\right), \quad (10)$$

где $d_{E_{\min}}$ – минимальное евклидово расстояние в двоичной системе с сигналами $s_i(t)$ и $s_j(t)$.

Графики потенциальной помехоустойчивости для сигналов КАМ и АФМн, рассчитанные с помощью выражения (6) для значений коэффициентов k_1, k_2 из таблицы 3, приведены на рисунках 4 и 5 соответственно [1; 5; 15].

Таблица 3. Значения коэффициентов k_1, k_2 для сигналов КАМ и АФМн

Table 3. The values of the coefficients k_1, k_2 for the QAM and APMn-signals

Вид модуляции	КАМ-М	АФМн-8	АФМн-16	АФМн-32	АФМн-64
k_1	$2\cdot\frac{L-1}{L}$	9/8	3/2	2	2
k_2	$\frac{1,5}{M-1}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{2}{1+3\cdot\gamma_1^2}$	$\frac{4}{1+3\cdot\gamma_1^2+4\cdot\gamma_2^2}$	$\frac{8}{1+3\cdot\gamma_1^2+5\cdot\gamma_2^2+7\cdot\gamma_3^2}$

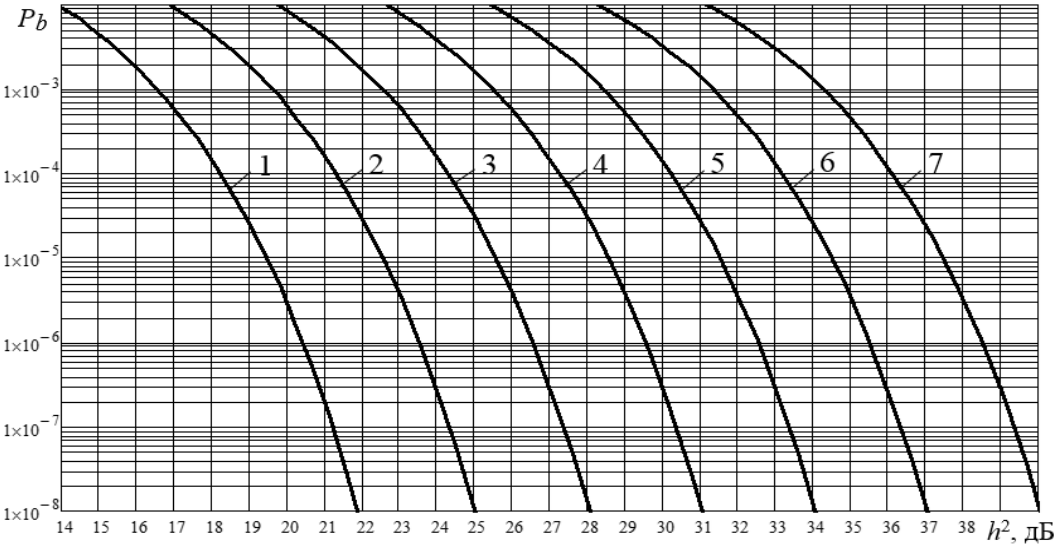

Рис. 4. Потенциальная помехоустойчивость приема цифровых сигналов: 1 – КАМ-16; 2 – КАМ-32; 3 – КАМ-64; 4 – КАМ-128; 5 – КАМ-256; 6 – КАМ-512; 7 – КАМ-1024

Fig. 4. Potential noise immunity of receiving digital signals: 1 – QAM-16; 2 – QAM-32; 3 – QAM-64; 4 – QAM-128; 5 – QAM-256; 6 – QAM-512; 7 – QAM-1024

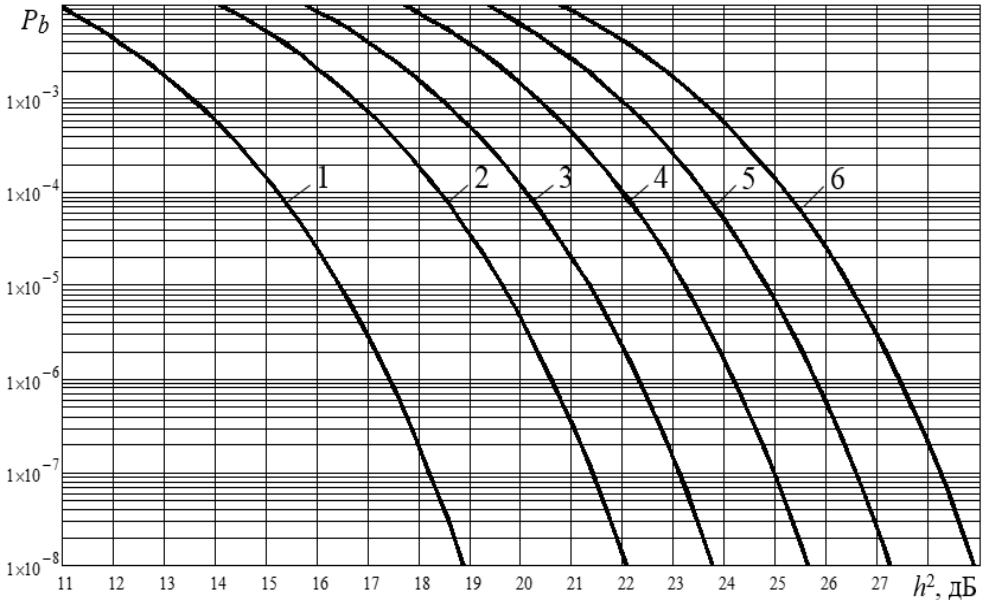

Рис. 5. Потенциальная помехоустойчивость приема цифровых сигналов: 1 – КАМ-8; 2 – АФМн-16 (r = 9/10); 3 – АФМн-16 (r = 2/3); 4 – АФМн-32 (r = 9/10); 5 – АФМн-32 (r = 3/4); 6 – АФМн-64

Fig. 5. Potential noise immunity of receiving digital signals: 1 – QAM-8; 2 – APMn-16 (r = 9/10); 3 – APMn-16 (r = 2/3); 4 – APMn-32 (r = 9/10); 5 – APMn-32 (r = 3/4); 6 – APMn-64

Значения энергетической эффективности сигналов с КАМ и АФМн для вероятности битовой ошибки 10^{-6} соответственно приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4. Значения энергетической эффективности КАМ-сигналов

Table 4. The values of the energy efficiency of QAM-signals

Вид модуляции	Значение h^2 для $P_b = 10^{-6}$, дБ	Значение h_b^2 для $P_b = 10^{-6}$, дБ
КАМ-8	17,5	12,7
КАМ-16	20,5	14,5
КАМ-32	23,5	16,5
КАМ-64	26,5	18,7
КАМ-128	29,5	21,0
КАМ-256	32,5	23,5
КАМ-512	35,5	26,0
КАМ-1024	38,5	28,5

Таблица 5. Значения энергетической эффективности АФМн-сигналов

Table 5. The values of the energy efficiency of APMn-signals

Вид модуляции	Значение h^2 для $P_b = 10^{-6}$, дБ	Значение h_b^2 для $P_b = 10^{-6}$, дБ
АФМн-16, $r = 9/10$	20,6	14,6
АФМн-16, $r = 5/6$	21,0	15,0
АФМн-16, $r = 3/4$	21,4	15,4
АФМн-16, $r = 2/3$	22,3	16,3
АФМн-32, $r = 9/10$	24,2	17,2
АФМн-32, $r = 5/6$	24,7	17,7
АФМн-32, $r = 3/4$	25,8	18,8
АФМн-64, $r = 9/10$	27,4	19,6

Сравнительный анализ графиков, представленных на рисунках 3, 4 и 5, и данных таблиц 2, 4 и 5 показывает, что:

– помехоустойчивость сигнала КАМ-8 превышает помехоустойчивость сигнала ФМ-8 на 1,2 дБ;

– сигнал ФМ-16 по помехоустойчивости уступает сигналу КАМ-16 на 4 дБ, что существенно ограничивает целесообразность использования модуляции ФМ-16;

– АФМн-сигналы по помехоустойчивости незначительно (на 0,2…1,7 дБ) уступают КАМ-сигналам той же позиционности. В то же время существенно более узкий динамический диапазон сигналов с АФМн определяет перспективность использования указанных сигналов в спутниковых линиях связи с нелинейными транспондерами [16; 17].

Выводы

Таким образом, полученные обобщенные теоретические выражения и графические зависимости для оценки потенциальной помехоустойчивости приёма цифровых сигналов в канале с комплексной аддитивной помехой позволяют теоретически обосновать технические требования к радиоприемным устройствам по помехоустойчивости при приеме цифровых сигналов различной помехоустойчивости.

Список литературы

1. Довбня В. Г., Азиатцев В. Е., Михайлов С. Н. Помехоустойчивость радиоприёмных систем цифровых линий связи: монография / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2017. 175 с.

2. Коптев Д. С., Бабанин И. Г., Довбня В. Г. Теория радиотехнических сигналов: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2019. 240 с.

3. Бабанин И. Г., Коптев Д. С. Общая теория связи. Сигналы и аналоговые системы передачи информации: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. 110 с.

4. Бабанин И. Г., Коптев Д. С., Мухин И. Е. Общая теория связи. Цифровые системы передачи данных: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2019. 105 с.

5. Довбня В. Г. Помехоустойчивость приёма цифровых сигналов с комбинированными видами манипуляции // Телекоммуникации. 2010. №7. С. 41–44.

6. Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Государственное энергетическое издательство, 1956. 153 с.

7. Довбня В. Г., Севрюков А. Е. Влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приёма сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 3 (16). С. 49–55.

8. Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи. М.: Связь, 1983. 320 с.

9. Бабанин И. Г. Процедура проектирования фильтров частотной селекции с учётом энергетических потерь в радиоприёмных устройствах высокоскоростных радиосистем передачи информации: дис. ... канд. техн. наук / Рязанский государственный радиотехнический университет. Курск, 2018. 17 с.

10. Банкет В. Л., Лысенко Л. А. АФМ-сигналы в системах передачи дискретных сообщений // Зарубежная электроника. 1980. № 2. С. 49–63.

11. Витерби Э. Д., Омура Дж. Принципы цифровой связи и кодирования: [пер. с англ.]. М.: Радио и связь, 1982. 535 с.

12. Довбня В. Г., Вольский В. А. Помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов в канале с межсимвольной интерференцией // Известия Юго-Западного госу-

дарственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 17–20.

13. Довбня В. Г., Севрюков А. Е. Влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приёма сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Проектирование и технология электронных средств. 2016. № 1. С. 14-19.

14. Довбня В. Г., Севрюков А. Е. Влияние качества функционирования системы тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема КАМ-сигналов // Телекоммуникации. 2016. № 4. С. 43–47.

15. Васильев К. К., Глушков В. А., Дормидонтов А. В. Теория электрической связи: учеб. пособие / под общ. ред. К. К. Васильева. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 452 с.

16. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Дрофа, 2006. 720 с.

17. Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Назаров М. В. Теория передачи сигналов: учебник. М.: Связь, 1980. 288 с.

References

1. Dovbnya V. G., Asiatsev V. E., Mikhailov S. N. Pomekhoustoichivost' radiopriemnykh sistem tsifrovykh linii svyazi: monografiya [Interference immunity of radio receiving systems of digital communication lines: monograph]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2017. 175 p. (In Russ.)

2. Koptev D. S., Babanin I. G., Dovbnya V. G. Teoriya radiotekhnicheskikh signalov [The theory of radio signals: textbook. allowance]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2019. 240 p. (In Russ.)

3. Babanin I. G., Koptev D. S. Obshchaya teoriya svyazi. Signaly i analogovye siste-my peredachi informatsii [General theory of communication. Signals and analog information transmission systems]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2018. 110 p. (In Russ.)

4. Babanin I. G., Koptev D. S., Mukhin I. E. Obshchaya teoriya svyazi. Tsifrovye sistemy peredachi dannykh [General theory of communication. Digital data transmission systems]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2019. 105 p. (In Russ.)

5. Dovbnya V. G. Pomekhoustoichivost' priema tsifrovykh signalov s kombinirovannymi vidami manipulyatsii [Immunity of receiving digital signals with combined types of manipulation]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2010, no. 7, pp. 41-44. (In Russ.)

6. Kotelnikov V. A. Teoriya potentsial'noi pomekhoustoichivosti [Theory of potential noise immunity]. Moscow, State Energy Publishing House, 1956. 153 p. (In Russ.)

7. Dovbnya V. G., Sevryukov A. E. Vliyanie nelineinykh iskazhenii na pomekhoustoichivost' priema signalov s kvadraturnoi amplitudnoi manipulyatsiei [Influence of nonlinear distortions on noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude manipulation]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie,*

vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2015, no. 3 (16), pp. 49-55. (In Russ.)

8. Zyuko A. G. Pomekhoustoichivost' i effektivnost' sistem svyazi [Interference immunity and efficiency of communication systems]. Moscow, Svyaz' Publ., 1983. 320 p. (In Russ.)

9. Babanin I. G. Protsedura proektirovaniya fil'trov chastotnoi selektsii s uchetom energeticheskikh poter' v radiopriemnykh ustroistvakh vysokoskorostnykh radiosistem peredachi informatsii. Diss. kand. tekhn. nauk [The procedure for designing frequency Selection filters taking into account energy losses in radio receiving devices of high-speed radio information transmission systems. Cand. tehn. sci. diss.]. Kursk, 2018. 17 p. (In Russ.)

10. Banquet V. L., Lysenko L. A. AFM signaly v sistemakh peredachi diskretnykh soobshchenii [AFM signals in discrete message transmission systems]. *Zarubezhnaya elektronika = Foreign Electronics*, 1980, no. 2, pp. 49-63. (In Russ.)

11. Viterbi E. D., Omura J. Printsipy tsifrovoi svyazi i kodirovaniya [The principles of digital communication and coding]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 535 p. (In Russ.)

12. Dovbnya V. G., Volsky V. A. Pomekhoustoichivost' priema mnogopozitsionnykh signalov v kanale s mezhsimvol'noi interferentsiei [Interference immunity of receiving multiposition signals in a channel with intersymbol interference]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 2, pp. 17–20. (In Russ.)

13. Dovbnya V. G., Sevryukov A. E. Vliyanie nelineinykh iskazhenii na pomekhoustoichivost' priema signalov s kvadraturnoi amplitudnoi manipulyatsiei [The influence of nonlinear distortion on the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude manipulation]. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Tools*, 2016, no. 1, pp. 14-19. (In Russ.)

14. Dovbnya V. G., Sevryukov A. E. Vliyanie kachestva funktsionirovaniya sistemy taktovoi sinkhronizatsii na pomekhoustoichivost' priema KAM-signalov [The influence of the quality of functioning of the clock synchronization system on the noise immunity of receiving KAM signals]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2016, no. 4, pp. 43-47. (In Russ.)

15. Vasiliev K. K., Glushkov V. A., Dormidontov A. V. Teoriya elektricheskoi svyazi [Theory of electrical communication]; ed. by K. K. Vasilieva. Ulyanovsk, UlSTU Publ., 2008. 452 p. (In Russ.)

16. Gonorovsky I. S. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly [Radio engineering circuits and signals]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 720 p. (In Russ.)

17. Zyuko A. G., Klovsky D. D., Nazarov M. V. Teoriya peredachi signalov [Theory of signal transmission]. Moscow, Svyaz' Publ., 1980. 288 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Довбня Виталий Георгиевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: vit_georg@mail.ru

Vitaliy G. Dovbnya, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: vit_georg@mail.ru

Коптев Дмитрий Сергеевич, аспирант, преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Dmitry S. Koptev, Post-Graduate Student, Lecturer at the Department of Space Instrument Engineering and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Бабанин Иван Геннадьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: babanin_ivan@bk.ru

Ivan G. Babanin, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: babanin_ivan@bk.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.396.933

Основные направления повышения помехозащищенности радиоприёмных систем на основе пространственно-временной обработки сложных сигналов в антенном устройстве

В. Г. Довбня[1], Д. С. Коптев[1] ✉

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Целью исследования *является анализ возможностей антенных устройств современных радиоприемных систем по подавлению помех, принимаемых по основному и кросс-поляризационному каналам приёма от других радиоэлектронных средств при работе с сигналами с квадратурной амплитудной модуляцией высокой позиционности.*

Методы. *При разработке теоретических выражений для оценки средней вероятности битовой ошибки приёма М-позиционного КАМ-сигнала результирующая считалась гауссовской. Графики зависимости эквивалентных энергетических потерь при приёме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией высокой позиционности от отношения сигнал/помеха были получены итерационным методом в среде MathCad 11. На основе исходных данных и данных работ получены теоретические зависимости для расчета коэффициента усиления антенного устройства в направлении главного и боковых лепестков, а также графики зависимости ожидаемого уровня принимаемых помех от других радиоэлектронных средств при приходе помехи по основному и побочному секторам приёма.*

Результаты. *В статье разработаны теоретические выражения для расчета потенциальной помехоустойчивости сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией высокой позиционности, на основе которых проведена оценка уровня помехозащищенности радиоприемных устройств при приеме помех от других радиоэлектронных средств по основному и побочному каналам приема. Проведенный анализ показал, что антенные устройства типовых радиоприёмных устройств не обеспечивают необходимый уровень помехозащищенности. Основным направлением повышения помехозащищенности является применение средств компенсации помех от других радиоэлектронных средств с использованием методов пространственного разнесения и весовой обработки сигнала.*

Заключение. *Реализация в антенном устройстве синхронно-синфазного весового сложения является эффективным средством повышения помехозащищенности радиоприемного устройства. Полученные с помощью разработанных аналитических моделей зависимости энергетического выигрыша в режиме сложения парциальных компонент сигнала и энергетических потерь в режиме подавления помех позволили теоретически обосновать требования к точности установки модуля и фазы коэффициентов взвешивания в устройстве весовой обработки при приеме цифровых сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией высокой позиционности.*

Ключевые слова*: потенциальная помехоустойчивость; антенное устройство; коэффициент усиления; радиоприемное устройство; подавление помех; основной и побочный каналы приема; квадратурная амплитудная модуляция.*

© Довбня В. Г., Коптев Д. С., 2020

***Конфликт интересов**: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Довбня В. Г., Коптев Д. С. Основные направления повышения помехозащищенности радиоприёмных систем на основе пространственно-временной обработки сложных сигналов в антенном устройстве // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 36–50.

Поступила в редакцию 29.12.2019 *Подписана в печать 22.01.2020* *Опубликована 25.02.2020*

Basic Directions of Increasing the Interference Protection of Radio Receiving Systems Based on Space-Temporal Processing of Complex Signals in Antenna Device

Vitaliy G. Dovbnya[1], Dmitry S. Koptev[1] ✉

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str., 94, Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Abstract

***Purpose of research** of the study is to analyze the capabilities of antenna devices of modern radio reception systems to suppress interference received through the main and cross-polarized reception channels from other electronic devices when working with signals with quadrature amplitude modulation of high positioning.*

***Methods.** When developing theoretical expressions for estimating the average probability of a bit error in receiving an M-position KAM signal, the resulting interference, which is the sum of the additive Gaussian noise and interference, was assumed to be Gaussian. The dependences of the equivalent energy losses when receiving signals with quadrature amplitude modulation of high positionality on the signal-to-noise ratio were obtained by the iterative method in MathCad 11. Based on the initial data and the data from theoretical dependences were obtained for calculating the gain of the antenna device in the direction of the main and side lobes, and also obtained graphs of the expected level of received interference from other electronic means on the gain antenna on the arrival of the interference of primary and secondary sectors of the reception.*

***Results.** The article developed theoretical expressions for calculating the potential noise immunity of signals with quadrature amplitude modulation of high positioning, based on which an assessment was made of the level of noise immunity of radio receivers when receiving interference from other radio electronic means through the main and side reception channels. The analysis showed that the antenna devices of typical radio receivers do not provide the necessary level of noise immunity. The main direction of increasing noise immunity is the use of means to compensate for interference from other radio electronic means using methods of spatial diversity and weighted signal processing.*

***Conclusion.** The implementation of synchronous-in-phase weight addition in an antenna device is an effective means of increasing the noise immunity of a radio receiving device. The dependences of the energy gain obtained in the mode of addition of partial signal components and energy losses in the interference suppression mode obtained using the developed analytical models allowed us to theoretically substantiate the requirements for the accuracy of the installation of the module and the phase of the weighting coefficients in the weight processing device when receiving digital signals with high positional quadrature amplitude modulation.*

***Keywords**: potential noise immunity; antenna device; gain; radio receiver; interference suppression; primary and secondary reception channels; quadrature amplitude modulation.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Dovbnya V. G., Koptev D. S. Basic Directions of Increasing the Interference Protection of Radio Receiving Systems Based on Space-Temporal Processing of Complex Signals in Antenna Device. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(1): 36–50. (In Russ.)

Received 29.12.2019 *Accepted 22.01.2020* *Published 25.02.2020*

***

Введение

Ключевым вопросом, возникающим при проектировании современных и перспективных цифровых систем передачи информации, является вопрос обеспечения требуемой помехоустойчивости приёма цифровых радиосигналов [1; 2].

Одной из основных задач, возлагаемых на антенное устройство радиоприёмных устройств (РПУ), является подавление помех от других радиоэлектронных средств (РЭС), принимаемых по основному и кросс-поляризационному каналам приема с заданного направления.

Для определения требований по подавлению помех в антенном устройстве оценим степень их влияния на помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов, при этом полагаем следующее:

– помеха действует в одном из каналов;

– распределение спектральной плотности мощности помехи имеет такой же вид, что и для принимаемого сигнала;

– направление прихода помехи лежит в горизонтальной плоскости, при этом плотность вероятности углов прихода распределена равномерно в заданном секторе $\pm\Delta\Theta$ [3; 4].

Материалы и методы

Выражение для отношения сигнал/(шум+помеха) на выходе антенного устройства РПУ может быть записано в виде

$$h_\varsigma^2 = \frac{\overline{P}_S}{P_\xi + P_\varsigma}, \qquad (1)$$

где $\overline{P}_S$ – мощность принимаемого сигнала, усредненная по всем его реализациям;

P_ξ, P_ς – мощность соответственно аддитивного гауссовского шума и помехи.

Мощность аддитивного гауссовского шума и помехи можно определить соответственно из следующих выражений:

$$P_\xi = N_0 B_R; \qquad (2)$$

$$P_\varsigma = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} N_\varsigma(\Omega)\left|\dot{H}_R(\Omega)\right|^2 \partial\Omega, \qquad (3)$$

где $N_0, N_\varsigma(\Omega)$ – односторонняя спектральная плотность мощности соответственно гауссовского шума и помехи;

$B_R = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left|\dot{H}_R(\Omega)\right|^2 \partial\Omega$ – полоса пропускания фильтра основной селекции РПУ;

$\dot{H}_R(\Omega)$ – эквивалентная частотная характеристика фильтра основной селекции РПУ.

При согласованной фильтрации ($B_R T = 1$) выражение (1) примет следующий вид:

$$h_\varsigma^2 = \left(h^{-2} + h_\varsigma^{-2}\right)^{-1}, \qquad (4)$$

где $h^2 = \dfrac{\overline{P}_S T}{N_0}$ – отношение средней энергии сигнала к спектральной плотности шума;

$h_\varsigma^2 = \dfrac{\overline{P}_S}{P_\varsigma}$ – отношение мощности сигнала к мощности помехи.

В дальнейших рассуждениях примем, что результирующая помеха, представляющая собой сумму аддитивного гауссовского шума и помехи, является гауссовской. Такое допущение является обоснованным, поскольку уровень подавленной помехи имеет тот же порядок, что и уровень аддитивного гауссовского шума.

Тогда среднюю вероятность битовой ошибки приема M-позиционного КАМ-сигнала с учетом (4) можно определить из выражения

$$P_b(\mu_\varsigma) = \frac{L-1}{L}\frac{2}{\log_2 M}\operatorname{erfc}\left[\sqrt{\frac{1{,}5}{(M-1)\left(h^{-2}+h_\varsigma^{-2}\right)}}\right]. \qquad (5)$$

На рисунке 1 представлены графики зависимости эквивалентных энергетических потерь при приёме (ЭЭПП) сигналов КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, КАМ-1024 от отношения сигнал/помеха, полученные итерационным методом в среде MathCad 11 с использованием выражения (5) [6; 7].

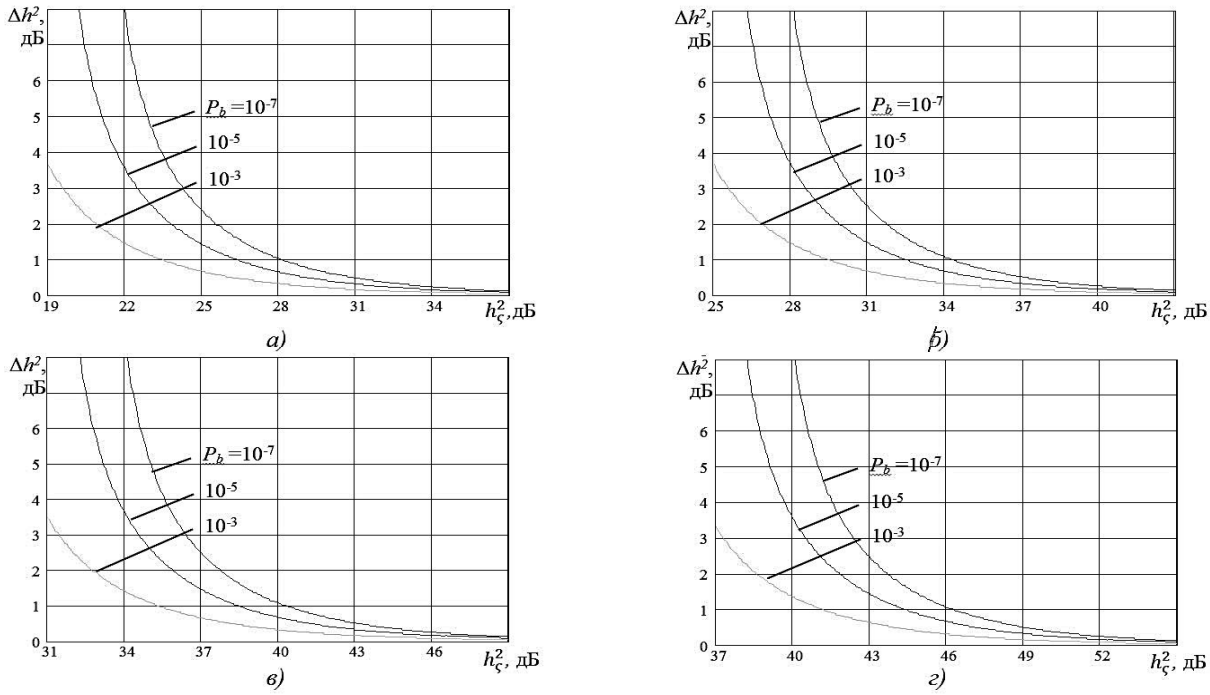

Рис. 1. Графики зависимости ЭЭПП от отношения сигнал/помеха: а – КАМ-16; б – КАМ-64; в – КАМ-256; г – КАМ-1024

Fig. 1. Graphs of the dependence of the equivalent energy loss at reception on the signal-to-noise ratio: a – QAM-16; b – QAM-64; c – QAM-256; d – QAM-1024

Анализ полученных графиков показывает, что приемлемый уровень эквивалентных энергетических потерь (0,2…0,3 дБ) обеспечивается при отношении сигнал/помеха не менее 34, 40, 46 и 52 дБ соответственно для видов модуляции КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256 и КАМ-1024 [5].

Интегральными показателями качества функционирования антенного устройства, позволяющими оценить ожидаемый уровень принимаемых помех от других РЭС, является математическое ожидание $M[F_R^2]$ и дисперсия $D[F_R^2]$ помехозащищенности. Указанные показатели качества непосредственно определяются нормированной диаграммой направленности антенного устройства $F_R(\Theta)$ и плотностью распределения углов прихода помехи $w_p(\Theta)$ [8; 9].

Для равномерного закона распределения углов прихода помехи от других РЭС в диапазоне $\pm\Theta$ выражения для математического ожидания и дисперсии помехозащищенности имеют соответственно следующий вид:

$$M[F_R^2] = \frac{1}{2\Delta\Theta}\int_{-\Delta\Theta}^{\Delta\Theta} F_R^2(\Theta)\,d\Theta\,; \qquad (6)$$

$$D[F_R^2] = \frac{1}{2\Delta\Theta}\int_{-\Delta\Theta}^{\Delta\Theta}\left[F_R^2(\Theta) - M_\Theta^2\right]d\Theta\,. \qquad (7)$$

Предположим, что сектор прихода помехи составляет ± 48°, а диаграмма направленности антенного устройства удовлетворяет рекомендации ITU-RF.699-6 [10; 11] для зеркально-параболических антенн с отношением диаметра рефлектора D к длине волны λ, меньшим или равным 100:

$$G(\Theta) = \begin{cases} G_{\max} - 2{,}5\cdot 10^{-3}(\Theta D/\lambda)^2, & 0^0 < \Theta \le \Theta_1; \\ G_1, & \Theta_1 < \Theta \le \Theta_2; \\ 52 - 10\lg(D/\lambda) - 25\lg(\Theta), & \Theta_2 < \Theta \le 48^0; \\ 10 - 10\lg(D/\lambda), & 48^0 < \Theta \le 180^0, \end{cases} \qquad (8)$$

где Θ – угловая координата, град;

$G_1 = 2 + 15\lg(D/\lambda)$ – коэффициент усиления антенны в направлении первого бокового лепестка ДН;

$\Theta_1 = 20(D/\lambda)^{-1}(G_{\max} - G_1)^{0,5}$;

$\Theta_2 = 100(D/\lambda)^{-1}$;

$G_{\max} = 10 + 20\lg(D/\lambda) + 10\lg(k_{\text{ИП}})$ – коэффициент усиления антенны в направлении главного лепестка ДН;

$k_{\text{ИП}}$ – коэффициент использования поверхности, принимающий значения 0,55…0,7 для однозеркальных антенн диаметром до 5 м.

Полагая, что коэффициент использования поверхности антенного устройства равен 0,6, выразим отношение D/λ через коэффициент усиления в направлении главного лепестка ДН $G_{\max}$ как

$$D/\lambda = 10^{0,05G_{\max} - 0,35}. \qquad (9)$$

Тогда выражение (8) с учетом (9) может быть записано в следующем виде:

$$G(\Theta)=\begin{cases} G_{\max}-2,5\cdot 10^{0.1G_{\max}-3,7}\cdot\Theta^2, & 0^0<\Theta\le\Theta_1; \\ G_1, & \Theta_1<\Theta\le\Theta_2; \\ 55,5-0,5G_{\max}-25\lg(\Theta), & \Theta_2<\Theta\le 48^0; \\ 13,5-0,5G_{\max}, & 48^0<\Theta\le 180^0, \end{cases} \quad (10)$$

где $G_1=-3,25+0,75G_{\max}$ – коэффициент усиления антенны в направлении первого бокового лепестка ДН;

$$\Theta_1=2\cdot 10^{-0,05G_{\max}+1,35}\cdot(G_{\max}-G_1)^{0,5};$$

$$\Theta_2=10^{-0,05G_{\max}+2,35}$$ [8].

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 представлены зависимости ожидаемого уровня принимаемых помех от других РЭС от коэффициента усиления антенного устройства РПУ в направлении главного лепестка ДН, полученные с использованием выражений (6) и (10). Кривые получены для случая, когда углы прихода помехи распределены равномерно: 1 – в секторе ±48°, 2 – в секторах от –48° до $-\Theta_1$ и от Θ_1 до 48 (прием помех по боковым лепесткам).

На рисунке 3 изображены кривые помехоустойчивости приема сигналов КАМ-16, КАМ-64, КАМ-128 и КАМ-256 для реализуемых значений уровня кросс-поляризационной развязки в антенных устройствах РПУ: стандартного (25 дБ) и повышенных (30 и 35 дБ).

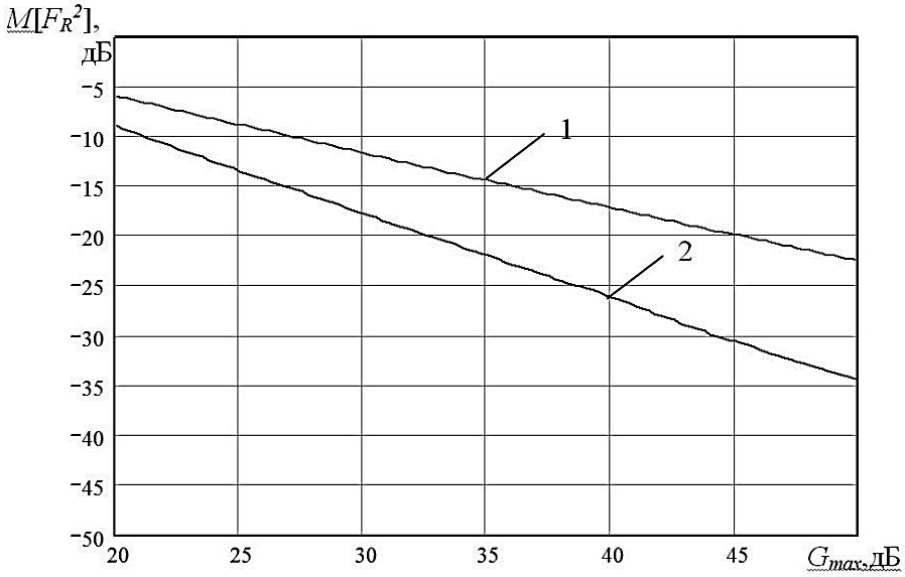

Рис. 2. Графики зависимости ожидаемого уровня принимаемых помех от других РЭС от коэффициента усиления антенны при приходе помехи: 1 – в секторе ±48°; 2 – в секторах от –48° до $-\Theta_1$ и от Θ_1 до 48°(прием помех по боковым лепесткам)

Fig. 2. Graphs of the dependence of the expected level of received interference from other RES on the antenna gain when interference occurs: 1 - in the sector ± 48 °; 2 – In sectors from –48 ° to – Θ1 and from Θ1 to 48 ° (interference reception on side lobes)

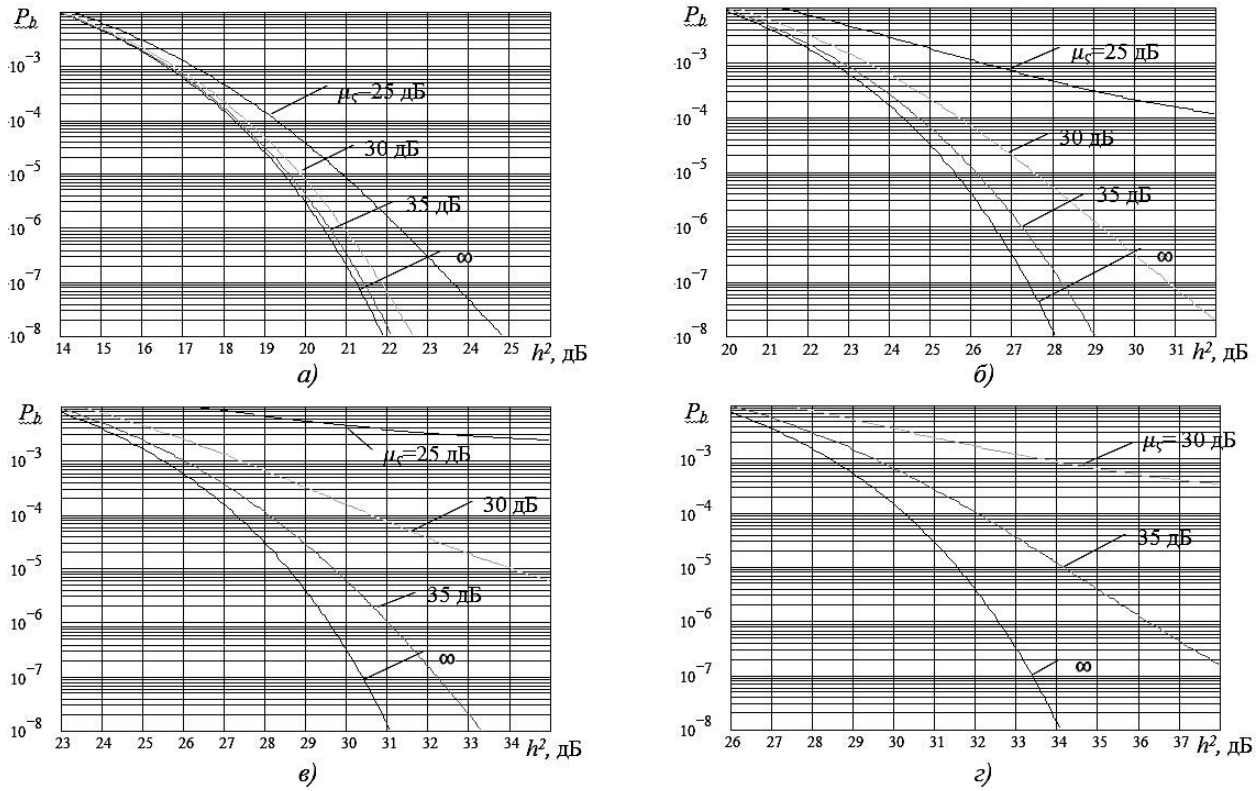

Рис. 3. Помехоустойчивость приема сигналов при различных уровнях кросс-поляризационной развязки: а – КАМ-16; б – КАМ-64; в – КАМ-128; г – КАМ-256

Fig. 3. Immunity of signal reception at different levels of cross-polarization isolation: a – QAM-16; b – QAM-64; c – QAM-128; d – QAM-256

Из анализа зависимостей, представленных на рисунках 1-3, следует, что антенные устройства типовых РПУ не обеспечивают необходимого уровня помехозащищенности РПУ.

В связи с тем, что возможности по подавлению помех, принимаемых по основному и кросс-поляризационному каналам приема от других РЭС, за счет повышения коэффициента усиления и кросс-поляризационной развязки в антенных устройствах РПУ практически исчерпаны, основным направлением повышения ее помехозащищенности является применение средств компенсации помех от других РЭС с использованием методов пространственного разнесения и весовой обработки сигнала [12; 13].

В пространственной интерпретации подавление помех сводится к адаптивному формированию нулей диаграммы направленности фазированной антенной решетки (ФАР) на источник помехи. Принцип работы системы пространственной обработки сигналов показан на рисунке 4, на котором в разных точках компенсатора помех представлены сигналы и помехи на комплексной плоскости [14; 15].

Управление адаптивной ФАР осуществляется при помощи электронного блока управления путем изменения весовых коэффициентов, на которые умножаются выходные сигналы антенн. При этом возможное количество фор-

мирования нулей диаграммы направленности на один меньше, чем количество элементов ФАР. Стоит заметить, что подобный компенсатор помех подавляет помеху, а усиления полезного сигнала не происходит. Реализуемая таким образом ФАР с цифровым формированием ДН обеспечивает формирование ДН с нулями в направлении помехи и максимумами в направлении полезного сигнала. Поскольку весовые коэффициенты для формирования ДН формируются в программной части, имеется возможность применения различных алгоритмов формирования коэффициентов и, соответственно, ДН, в зависимости от поставленной задачи и условий функционирования [16; 17].

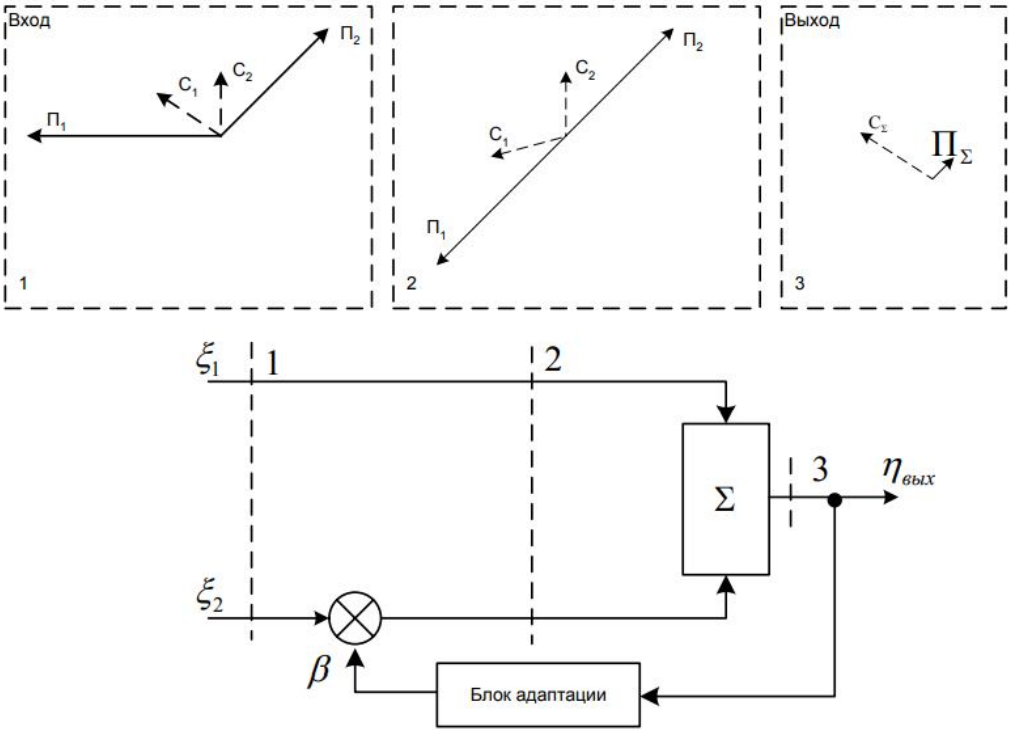

Рис. 4. Принцип работы пространственной обработки сигналов

Fig. 4. The principle of spatial signal processing

Мощность сигнала, помехи и шума на выходе антенного устройства с двухканальной обработкой сигнала можно записать в следующем виде:

$$P_{\Sigma s} = \left|1 + \dot{\alpha}\dot{\mu}_s\right|^2 \overline{P}_s; \qquad (11)$$

$$P_{\Sigma\varsigma} = \left|1 + \dot{\alpha}\dot{\mu}_\varsigma\right|^2 P_\varsigma; \qquad (12)$$

$$P_{\Sigma\xi} = \left(1 + \alpha^2\right) P_\xi, \qquad (13)$$

где $\overline{P}_s, P_\varsigma, P_\xi$ – мощность соответственно сигнала, помехи и шума в канале приема с максимальным отношением сигнал/шум;

$\dot{\alpha} = \alpha\exp(j\varphi)$ – взвешивающий коэффициент передачи во втором канале приема;

$\dot{\mu}_s, \dot{\mu}_\varsigma$ – коэффициенты, учитывающие соотношение комплексных ампли-

туд сигнала и помехи соответственно в первом и втором каналах приема [18].

Тогда выражение для отношения сигнал/(шум+помеха) на выходе антенного устройства с обработкой сигнала примет вид

$$h_{\Sigma}^{2} = \\ = \left|1+\dot{\alpha}\dot{\mu}_{s}\right|^{2}\left[(1+\alpha^{2})h^{-2}+\left|1+\dot{\alpha}\dot{\mu}_{\varsigma}\right|^{2}h_{\varsigma}^{-2}\right]^{-1}, \quad (14)$$

а выражение для средней вероятности битовой ошибки приема (5) может быть записано в следующем виде:

$$P_{b}(\mu_{\varsigma}) = \frac{L-1}{L}\frac{2}{\log_{2} M}\operatorname{erfc}\left[\sqrt{\frac{1,5h_{\Sigma}^{2}}{M-1}}\right]. \quad (15)$$

Выражение для определения уровня подавления помех от точности установки амплитуды и фазы в устройстве весовой обработки можно получить, преобразовав выражение (12) к виду

$$\mu_{p}^{2} = \frac{P_{\Sigma\varsigma}}{P_{\varsigma}} = \\ = 1+(1+\Delta\alpha)\left[1+\Delta\alpha-2\cos(\Delta\varphi)\right]. \quad (16)$$

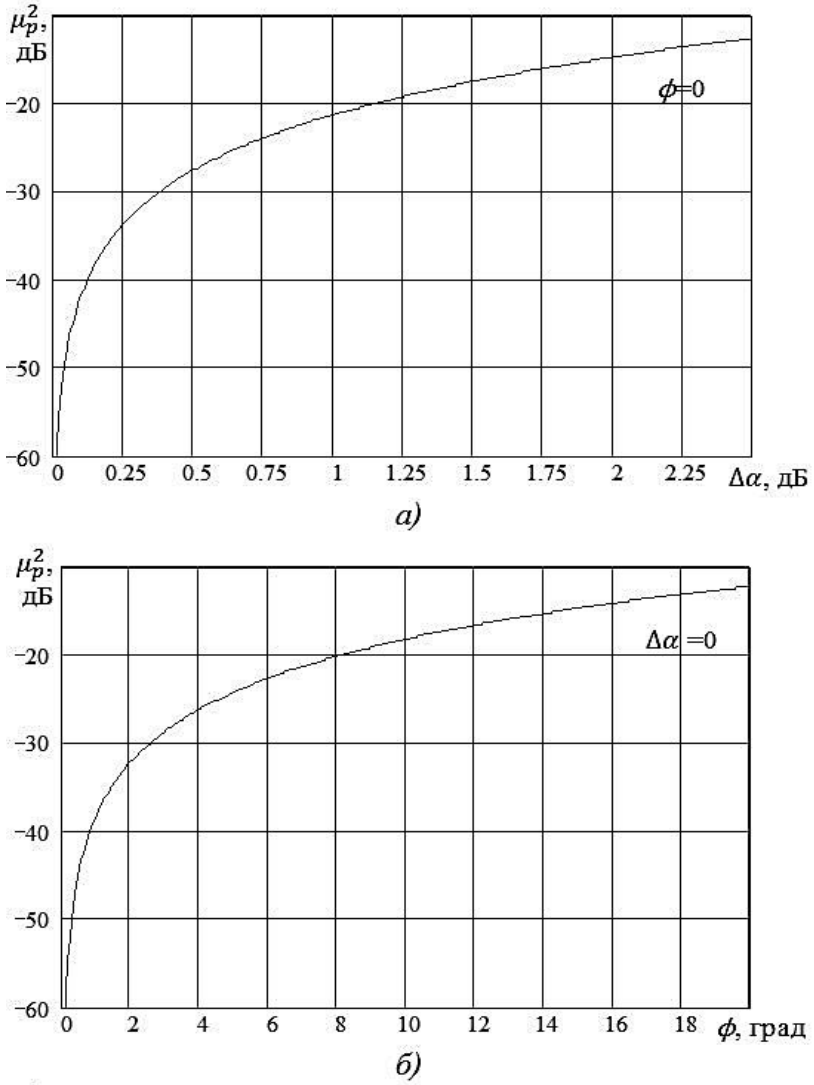

Рис. 5. Графики зависимости уровня подавления помех в устройстве весовой обработки от погрешности установки: *а* – амплитуды; *б* – фазы

Fig. 5. Graphs of the dependence of the level of noise suppression in the weight processing device on the installation error: a – amplitude; b – phases

На рисунке 5 представлены зависимости уровня подавления помех от погрешности установки амплитуды и фазы в устройстве весовой обработки.

Сравнительный анализ графиков, представленных на рисунках 1 и 5, показывает, что в режиме подавления помех от других РЭС требования к точности установки амплитуды и фазы на порядок выше, чем в режиме синфазного сложения парциальных компонент сигнала [15; 19; 20].

Результаты расчета зависимости эквивалентных энергетических потерь при приеме КАМ-сигналов четной кратности от погрешности установки амплитуды и фазы в устройстве весовой обработки представлены на рисунках 6 и 7 соответственно. Зависимости получены итерационным методом в среде *MathCad 11* с использованием выражений (14) и (15).

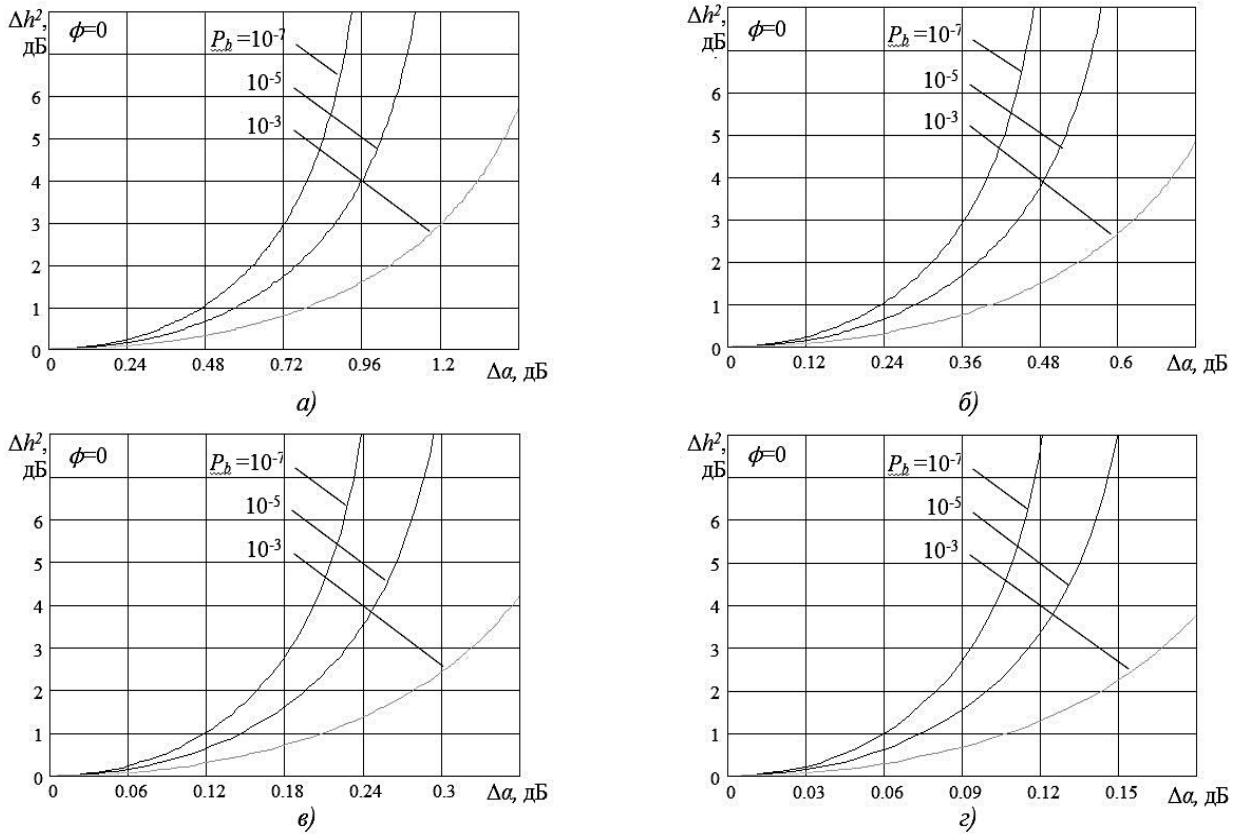

Рис. 6. Графики зависимости ЭЭПП от погрешности установки амплитуды в устройстве весовой обработки: а – КАМ-16; б – КАМ-64; в – КАМ-256; г – КАМ-1024

Fig. 6. Graphs of the dependence of the equivalent energy loss during reception on the error of the amplitude setting in the weight processing device: a – QAM-16; b – QAM-64; c – QAM-256; d – QAM-1024

Выводы

Анализ полученных зависимостей показывает, что приемлемый уровень эквивалентных энергетических потерь (0,2…0,3 дБ) обеспечивается при погрешности установки амплитуды не более 0,24; 0,12; 0,06 и 0,03 дБ и фазы – не более 2°, 1°, 0,5° и 0,25° соответственно

при приеме сигналов КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, КАМ-1024. Реализация таких довольно жестких требований обусловливает необходимость изыскания научно-технических путей реализации устройств весовой обработки с соответствующими качественными характеристиками.

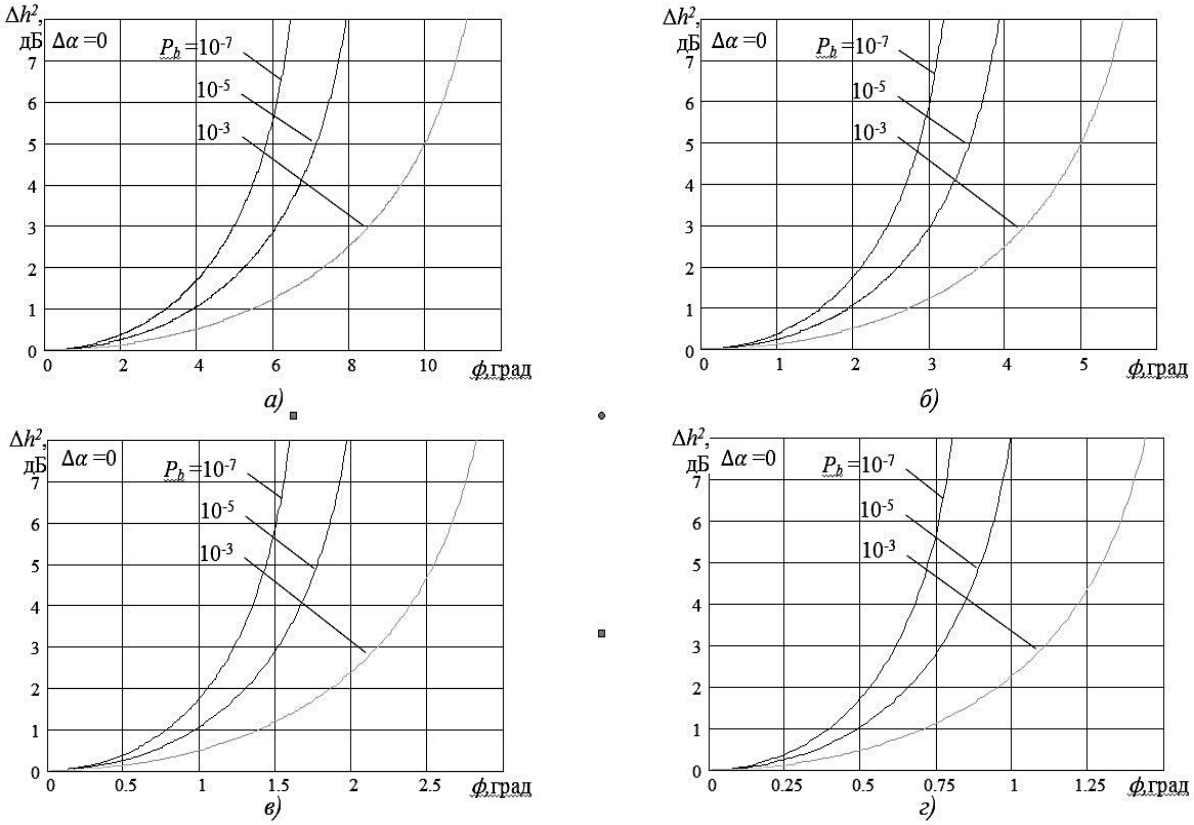

Рис. 7. Графики зависимости ЭЭПП от погрешности установки фазы в устройстве весовой обработки: а – КАМ-16; б – КАМ-64; в – КАМ-256; г – КАМ-1024

Fig. 7. Graphs of the dependence of the equivalent energy loss during reception on the phase installation error in the weight processing device: a – QAM-16; b – QAM-64; c – QAM-256; g – QAM-1024

Таким образом, реализация в антенном устройстве синхронно-синфазного весового сложения является эффективным средством повышения помехозащищенности РПУ. Полученные с помощью разработанных аналитических моделей зависимости энергетического выигрыша в режиме сложения парциальных компонент сигнала и энергетических потерь в режиме подавления помех позволили теоретически обосновать требования к точности установки модуля и фазы коэффициентов взвешивания в устройстве весовой обработки при приеме цифровых сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией высокой позиционности.

Список литературы

1. Фролов О. П. Антенны и фидерные тракты для радиорелейных линий связи. М.: Радио и связь, 2001. 416 с.

2. Довбня В. Г., Севрюков Е. А. Влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 3 (16). С. 49–55.

3. Довбня В. Г., Азиатцев В. Е., Михайлов С. Н. Помехоустойчивость радиоприёмных систем цифровых линий связи: монография / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2017. 175 с.

4. Коптев Д. С., Бабанин И. Г., Довбня В. Г. Теория радиотехнических сигналов: учебное пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2019. 240 с.

5. INU-T Recommendation F.699. Reference radiation patterns for fixed wireless system antennas for usein coordination studies and interference assessment in thefrequency range from 100 MHz to about 70 GHz. 2006. URL: http://www.:tu.int>rec/R-RECF.699-8-201801…en (accessed 10.11.2019).

6. Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Мошкина Т. Г. Потенциальная помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М. Ф. Решетнева. 2012. № 3(43). С. 113–119.

7. Довбня В. Г. Помехоустойчивость приёма цифровых сигналов с комбинированными видами манипуляции // Телекоммуникации. 2010. № 7. С. 41–44.

8. Довбня В. Г., Вольский В. А. Помехоустойчивость приема многопозиционных сигналов в канале с межсимвольной интерференцией // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 17–20.

9. Защищенные радиосистемы цифровой передачи информации / П. Н. Сердюков, А. В. Бельчиков, А. Е. Дронов [и др.]. М.: АСТ, 2006. 403 с.

10. Пистолькорс А. А., Литвинов О. С. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991. 200 с.

11. Freiman C., Wyner A. Optimum block codes for noiseless input restricted channels // Inform. Control. 1964. Vol. 7. P. 398–415.

12. Бабанин И. Г. Процедура проектирования фильтров частотной селекции с учётом энергетических потерь в радиоприёмных устройствах высокоскоростных радиосистем передачи информации: дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2018.

13. Процедура оценки влияния неидеальности параметров оптимального демодулирующего устройства системы приёма сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией различной позиционности и коэффициента неравномерности сигнального созвездия на эквивалентные энергетические потери / И. Г. Бабанин, Н. Ю. Михайлова, А. И. Николаенко, Д. С. Коптев // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 10 (16). С. 60-69.

14. Довбня В. Г., Севрюков А. Е. Влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приёма сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Проектирование и технология электронных средств. 2016. № 1. С. 14-19.

15. Довбня В. Г., Севрюков А. Е. Влияние качества функционирования системы тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема КАМ-сигналов // Телекоммуникации. 2016. № 4. С. 43-47.

16. Чаплин А. Ф. Анализ и синтез антенных решеток. Львов: Выща школа. Изд-во при Львов. ун-те, 1987.

17. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.

18. Пространственно-временная обработка сигналов в системах радиосвязи / под ред. А. П. Родимова. М.: Радиотехника, 1992. 96 с.

19. Прокис Дж. Цифровая связь: [пер. с англ.] / под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

20. Мартиросов В. Е. Влияние нелинейных (компрессионных) искажений на помехоустойчивость приема сигналов QAM // Радиотехника. 2008. № 9. С. 4–11.

References

1. Frolov O. P. Antenny i fidernye trakty dlya radioreleinykh linii svyazi [Antennas and feeder paths for radio relay communication lines]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2001. 416 p. (In Russ.)

2. Dovbnya V. G., Sevryukov E. A. Vliyanie nelineinykh iskazhenii na pomekhoustoichivost' priema signalov s kvadraturnoi amplitudnoi manipulyatsiei [The influence of nonlinear distortions on the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude manipulation]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2015, no. 3 (16), pp. 49–55. (In Russ.)

3. Dovbnya V. G., Asiatsev V. E., Mikhailov S. N. Pomekhoustoichivost' radiopriemnykh sistem tsifrovykh linii svyazi [Interference immunity of radio receiving systems of digital communication lines]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2017. 175 p. (In Russ.)

4. Koptev D. S., Babanin I. G., Dovbnya V. G. Teoriya radiotekhnicheskikh signalov [The theory of radio signals]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2019. 240 p. (In Russ.)

5. INU-T Recommendation F.699. Reference radiation patterns for fixed wireless system antennas for usein coordination studies and interference assessment in thefrequency range from 100 MHz to about 70 GHz. 2006. Available at: http://www.:tu.int>rec/R-RECF.699-8-201801…en. (accessed 10.11.2019)

6. Tyapkin V. N., Dmitriev D. D., Moshkina T. G. Potentsial'naya pomekhoustoichivost' navigatsionnoi apparatury potrebitelei sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem [Potential noise immunity of navigation equipment of consumers of satellite radio navigation systems]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. Akademika M. F. Reshetneva = Bulletin of the Siberian State Aerospace University. Academician M. F. Reshetneva*, 2012, no. 3 (43), pp. 113-119. (In Russ.)

7. Dovbnya V. G. Pomekhoustoichivost' priema tsifrovykh signalov s kombinirovannymi vidami manipulyatsii [Immunity of receiving digital signals with combined types of manipulation]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2010, no. 7, pp. 41-44. (In Russ.)

8. Dovbnya V. G., Volsky V. A. Pomekhoustoichivost' priema mnogopozitsionnykh signalov v kanale s mezhsimvol'noi interferentsiei [Interference immunity of receiving multiposition signals in a channel with intersymbol interference]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 2, pp. 17–20. (In Russ.)

9. Serdyukov P. N., Belchikov A. V., Dronov A. E., eds. Zashchishchennye radiosistemy tsifrovoi peredachi informatsii [Protected radio systems for digital information transfer]. Moscow, AST Publ., 2006. 403 p.

10. Pistolkors A. A., Litvinov O. S. Vvedenie v teoriyu adaptivnykh antenn [Introduction to the theory of adaptive antennas]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 200 p. (In Russ.)

11. Freiman C., Wyner A. Optimum block codes for noiseless input restricted channels. Inform. *Control*, 1964, vol. 7, pp. 398–415.

12. Babanin I. G. Protsedura proektirovaniya fil'trov chastotnoi selektsii s uchetom energeticheskikh poter' v radiopriemnykh ustroistvakh vysokoskorostnykh radiosistem peredachi informatsii. Diss. kand. tekhn. nauk [The procedure for designing frequency selection filters taking into account energy losses in the radio receivers of high-speed radio information transmission systems. Cand. eng. sci. diss]. Ryazan', 2018. (In Russ.)

13. Babanin I. G., Mikhailova N. Yu., Nikolaenko A. I., Koptev D. S. Protsedura otsenki vliyaniya neideal'nosti parametrov optimal'nogo demoduliruyushchego ustroistva sistemy priema signalov s kvadraturnoi amplitudnoi modulyatsiei razlichnoi pozitsionnosti i koeffitsienta neravnomernosti signal'nogo sozvezdiya na ekvivalentnye energeticheskie poteri [The procedure for assessing the effect of non-ideal parameters of the optimal demodulating device of a signal receiving system with quadrature amplitude modulation of different positionalities and the unevenness of the signal constellation on equivalent energy losses]. *Radiotekhnika = Radio engineering*, 2019, vol. 83, no. 10 (16), pp. 60-69. (In Russ.)

14. Dovbnya V. G., Sevryukov A. E. Vliyanie nelineinykh iskazhenii na pomekhoustoichivost' priema signalov s kvadraturnoi amplitudnoi manipulyatsiei [The influence of nonlinear distortion on the noise immunity of receiving signals with quadrature amplitude manipulation]. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic tools*, 2016, no. 1, pp. 14-19. (In Russ.)

15. Dovbnya V. G., Sevryukov A. E. Vliyanie kachestva funktsionirovaniya sistemy taktovoi sinkhronizatsii na pomekhoustoichivost' priema KAM-signalov [The influence of the

quality of functioning of the clock synchronization system on the noise immunity of receiving KAM signals]. *Telekommunikatsii = Telecommunications*, 2016, no. 4, pp. 43-47. (In Russ.)

16. Chaplin A. F. Analiz i sintez antennykh reshetok [Analysis and synthesis of antenna arrays]. Lviv, Vishcha shkola Publ., 1987. (In Russ.)

17. Sazonov D. M. Antenny i ustroistva SVCh [Antennas and microwave devices]. Moscow, Vishcha shkola Publ., 1988. 432 p. (In Russ.)

18. Prostranstvenno-vremennaya obrabotka signalov v sistemakh radiosvyazi [Spatial-temporal signal processing in radio communication systems]; ed. by A. P. Rodimova. Moscow, Radiotekhnika Publ., 1992. 96 p. (In Russ.)

19. Prokis J. Tsifrovaya svyaz' [Digital Communications]; ed. by D. D. Klovsky. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2000. 800 p. (In Russ.)

20. Martirosov V. Ye. Vliyanie nelineinykh (kompressionnykh) iskazhenii na pomekhoustoichivost' priema signalov QAM [Influence of nonlinear (compression) distortions on the noise immunity of QAM signal reception]. *Radiotekhnika = Radio engineering*, 2008, no. 9, pp. 4–11. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Довбня Виталий Георгиевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: vit_georg@mail.ru

Vitaliy G. Dovbnya, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: vit_georg@mail.ru

Коптев Дмитрий Сергеевич, аспирант, преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Dmitry S. Koptev, Post-Graduate Student, Lecturer at the Department of Space Instrument Engineering and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.921

Программная реализация алгоритма разрешения коллизий в 2D-пространстве

Е. А. Петрик[1] ✉, М. А. Харченко[1],Т. И. Лапина[1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉e-mail:petrik.ea@mail.ru

Резюме

Цель исследования *заключается в создании библиотеки программного кода на языке программирования Go, предназначенной для разрешения коллизий (столкновений) между геометрическими объектами в двухмерном пространстве компьютерных игр.*

***Методы**. В процессе вывода на экран объектов в двухмерном пространстве компьютерных игр возникает необходимость расчета областей видимости этих объектов, а также траекторий и скорости движения, основанной на моделировании физических законов реального мира. В ходе исследования в качестве графических примитивов были приняты три геометрические формы: круг, прямоугольник и отрезок прямой. При разработке алгоритмов разрешения коллизий и определения видимости объектов была использована теорема о разделяющей оси, позволяющая обнаруживать наложения объектов друг на друга в двумерном пространстве. Особенностью алгоритма обнаружения коллизий является использование межкадровой проверки параллельных отрезков на коллизию, а также оптимизация поиска коллизий в пространстве с использованием алгоритма разбиения пространства с помощью дерева квадрантов.*

***Результаты**. В ходе исследования были разработаны программные коды алгоритмов разрешения и обнаружения коллизий, аппроксимации коллизий, оптимизации поиска коллизий между объектами в пространстве, а также было проведено тестирование алгоритмов с помощью симуляции броуновского движения, в котором даже при очень большой загруженности (11 000 проверок коллизий в секунду), которой обычно не случается в реальных игровых сценах, частота кадров остается не менее 60. Это показывает, что библиотека является эффективной для применения в проектах и может выдерживать большие вычислительные нагрузки.*

***Заключение**. В результате проведенных исследований была создана библиотека разрешения коллизий на языке программирования Go. Методы библиотеки позволяют обнаруживать и разрешать коллизии объектов разной формы.*

***Ключевые слова**: программирование; компьютерная графика; компьютерная геометрия; алгоритм обнаружения коллизий; разработка видеоигр.*

***Конфликт интересов**: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Петрик Е. А., Харченко М. А., Лапина Т. И., 2020

Для цитирования: Петрик Е. А., Харченко М. А., Лапина Т. И. Программная реализация алгоритма разрешения коллизий в 2D-пространстве // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 51–66.

Поступила в редакцию 19.12.2019 *Подписана в печать 20.01.2020* *Опубликована 25.02.2020*

Software Realization of the 2D-Collision Resolution Algorithm

Elena A. Petrik[1] ✉, Maxim A. Kharchenko[1], Tatyana I. Lapina[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str., 94, Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail:petrik.ea@mail.ru

Abstract

The purpose *of* ***research*** *is to create a library of program code in the Go programming language, designed to resolve collisions (collisions) between geometric objects in the two-dimensional space of computer games.* ***Methods****. In the process of displaying objects in the two-dimensional space of computer games, it becomes necessary to calculate the visibility areas of these objects, as well as the trajectories and speed of movement, based on modeling the physical laws of the real world. During the study, three geometric shapes were taken as graphic primitives: a circle, a rectangle, and a straight line segment. In developing algorithms for resolving collisions and determining the visibility of objects, the dividing axis theorem was used, which makes it possible to detect overlapping objects on top of each other in two-dimensional space. A feature of the collision detection algorithm is the use of interframe verification of parallel segments for a collision, as well as the optimization of the search for collisions in space using the algorithm for splitting space using the quadrant tree.*

Results*. During the study, software codes were developed for the algorithms for resolving and detecting collisions, approximating collisions, optimizing the search for collisions between objects in space, and algorithms were tested using a simulation of Brownian motion, in which even with very high workload (11,000 collision checks per second), which usually does not happen in real game scenes, the frame rate remains at least 60. This shows that the library is effective for use in projects and can withstand large computational loads.*

Conclusion*. As a result of the research, a collision resolution library was created in the Go programming language. Library methods allow you to detect and resolve collisions of objects of different shapes.*

Keywords*: programming; computer graphics; computer geometry; collision detection algorithm; video game development.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Petrik E. A., Kharchenko M. A., Lapina T. I. Software Realization of the 2D-Collision Resolution Algorithm. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(1): 51–66. (In Russ.)

Received 19.12.2019 *Accepted 20.01.2020* *Published 25.02.2020*

***

Введение

В настоящее время игровая индустрия является одной из наиболее прибыльных секторов экономики, с каждым годом привлекающей все больше потребителей, инвесторов и квалифицированных специалистов. Эта область также очень сильно зависит от внедрения новых технологий в области производства компьютерных микросхем и открытий в области математики и информатики [1]. Ядром любой игры является программная платформа для создания видеоигр, включающая себя средства вывода графики и звука, считывания пользовательского ввода, исполнения программных скриптов и средства расчета коллизий и взаимодействия между объектами игрового мира, основанного на законах физики. Существует множество готовых игровых программных платформ, например UnrealEngine 4, CryEngine 5 и Unity3D. Они не всегда удовлетворяют требованиям разработчиков. Кроме того, разработчики вынуждены платить отчисления за их использование. Именно поэтому многие разработчики видеоигр, особенно крупные, создают собственные игровые платформы [2; 3].

В течение долгого времени основным языком программирования для разработки игровых платформ являлся C++. Его популярность в этой области обусловлена производительностью и удобством работы с системными API низкого уровня. Тем не менее в настоящее время широко используется язык программирования Go (Golang), разработанный в 2009 г. в Google. Go предназначен для разработки высокопроизводительных программ, работающих в рамках распределенной и многопроцессорной архитектуры, характеризуется своей кросс-платформенностью и быстротой вычислений. В настоящее время он используется для разработки высоконагруженных веб-приложений на основе микросервисной архитектуры. Пользователи считают язык Go перспективным «языком с XXI века» и применяют для создания игровых программных платформ. Наиболее популярными среди них являются Pixel, Ebiten, GarageEngine, Azul3D и g3n. Они разработаны на основе графических APIOpenGL и Vulkan, адаптированных для языка Go при помощи кросс-языкового интерфейса [4].

Тем не менее для выполнения полноценной симуляции использования одной лишь графики недостаточно. Следует отметить, для того, чтобы объекты игрового мира взаимодействовали друг с другом, а не проходили друг через друга, нужна реализация разрешения коллизий между геометрическими объектами, а для некоторых игр необходимо учитывать физические процессы, происходящие в реальном мире, такие как гравитация, трение, деформация и т. д.

При этом выбор библиотек для разрешения коллизий на Go довольно мал: одни плохо документированы и неудобны в использовании (например, Box2D, Chipmunk2D), другие недостаточно функциональны и оптимизированы (например, библиотеки resolv, physac на веб-сервисе GitHub) [5; 6]. Про-

веденный анализ позволил сформулировать задачу исследований, заключающуюся в создании новой библиотеки, позволяющей производить разрешение коллизий, под названием Cirno.

Материалы и методы

В создаваемой библиотеке пользователю доступны три геометрические фигуры (примитивы): круг, прямоугольник (OrientedBoundingBox), отрезок прямой. Для этих примитивов реализуются методы обнаружения коллизий между ними. При этом фигуру любого типа можно перемещать в пространстве, а прямоугольник и прямую можно вращать, а также производить проверку принадлежности точки какой-либо фигуре.

Для разрешения коллизии двух ориентированных (при вращении на определенный угол) прямоугольников используется теорема о разделяющей оси. Справедливым считается утверждение о том, что две выпуклые фигуры не накладываются друг на друга, если существует ось, такая что проекции этих фигур на нее не пересекаются [3; 7; 8; 9]. В случае с двумя прямоугольниками, если разделяющая ось существует, то она параллельна одной из осей A_x, A_y, B_x, B_y, определяющих ориентации прямоугольников. Для проверки рассматривается вектор

$$T = P_B - P_A, \quad (1)$$

где P_A, P_B – центры соответствующих прямоугольников. За разделяющую ось L при каждой проверке принимается одна из вышеперечисленных осей ориентации. W_A, H_A, W_B, H_B – скалярные величины, равные значениям полуширины полудлины прямоугольников. Детальная схема изображена на рисунке 1.

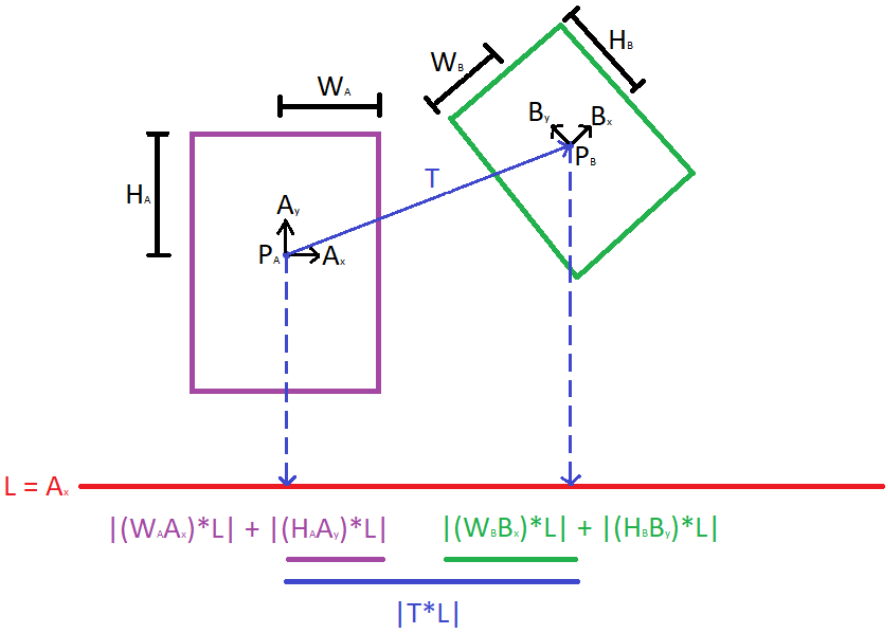

Рис. 1. Проверка: является ли ось A_x осью, параллельной разделяющей оси для прямоугольников (знак «*»используется для обозначения проекции вектора)

Fig. 1. Check if the A_x axis is an axis parallel to the dividing axis for rectangles (the "*" sign is used to denote a vector projection)

Чтобы разделяющая ось для двух ориентированных прямоугольников существовала, необходимо выполнение одного из следующих условий:

$$\begin{aligned} |T \cdot A_x| &> W_A + |(W_B \cdot B_x) * A_x| + \left|\left(H_B \cdot B_y\right) \cdot A_x\right|, \\ \left|T \cdot A_y\right| &> H_A + \left|(W_B \cdot B_x) * A_y\right| + \left|\left(H_B \cdot B_y\right) \cdot A_y\right|, \\ |T \cdot B_x| &> W_B + |(W_A \cdot A_x) * B_x| + \left|\left(H_A \cdot A_y\right) \cdot B_x\right|, \\ \left|T \cdot B_y\right| &> H_B + \left|(W_A \cdot A_x) * B_y\right| + \left|\left(H_A \cdot A_y\right) \cdot B_y\right|. \end{aligned} \quad (2)$$

Если ни одно из них не выполняется, то прямоугольники накладываются друг на друга и имеет место коллизия [10; 11].

Для разрешения коллизии прямоугольника и круга необходимо найти ближайшую к центру круга точку, лежащую на одной из сторон прямоугольника, и проверить, находится ли она внутри данного круга (если да, то коллизия имеет место быть). Для этого круг сначала переносится в локальную систему координат прямоугольника. Далее рассматриваются точки *Min* и *Max* прямоугольника. Алгоритм определения ближайшей к кругу точки *closestPoint* прямоугольника – на псевдокоде, представленном на рисунке 2.

На рисунке 3 продемонстрирована проверка прямоугольника и круга на коллизию (обе фигуры перенесены в локальное координатное пространство прямоугольника).

```
closestPoint := circle.center;

ifclosestPoint.X<Min.X:
   closestPoint.X = Min.X;
else ifclosestPoint.X>Max.X:
   closestPoint.X = Max.X;

ifclosestPoint.Y<Min.Y:
   closestPoint.Y = Min.Y;
else ifclosestPoint.Y>Max.Y:
   closestPoint.Y = Max.Y;
```

Рис. 2. Псевдокод алгоритма определения ближайшей к кругу точки *closestPoint*

Fig. 2. Pseudocode of the algorithm for determining the *closestPoint* point closest to the circle

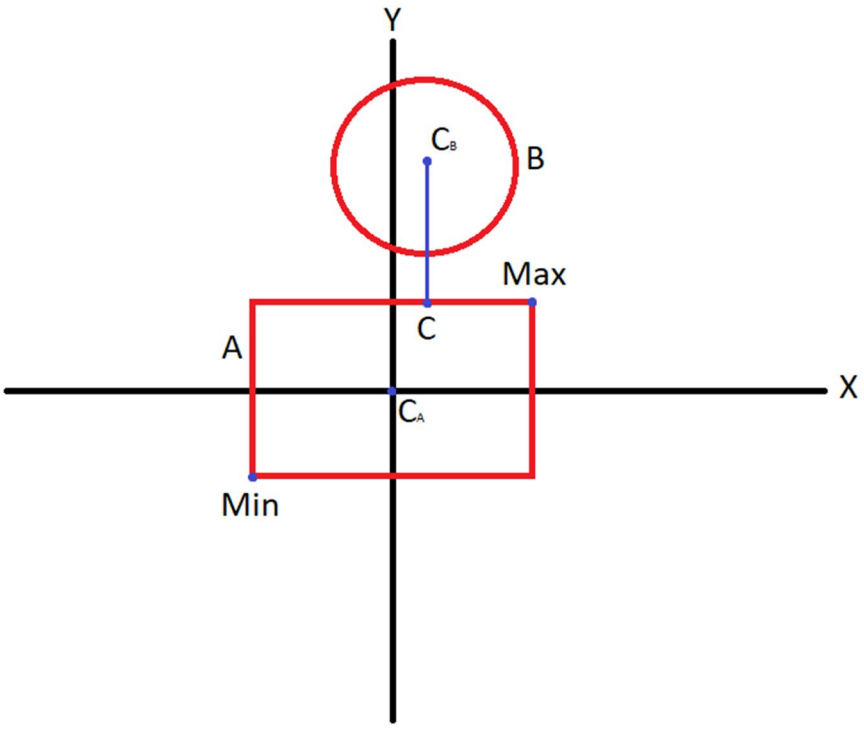

Рис. 3. Иллюстрация проверки круга и прямоугольника на коллизию

Fig. 3. Illustration of checking a circle and a rectangle for collision

Чтобы проверить два круга на коллизию, необходимо использовать вектор $t = C_B - C_A$, где C_A, C_B – центры соответствующих окружностей. Если длина этого вектора меньше суммы радиусов окружностей или равна ей, то имеет место коллизия, т. к. операция извлечения квадратного корня является более затратной с точки зрения вычислений, длина вектора и сумма радиусов возведены в квадрат (рис. 4).

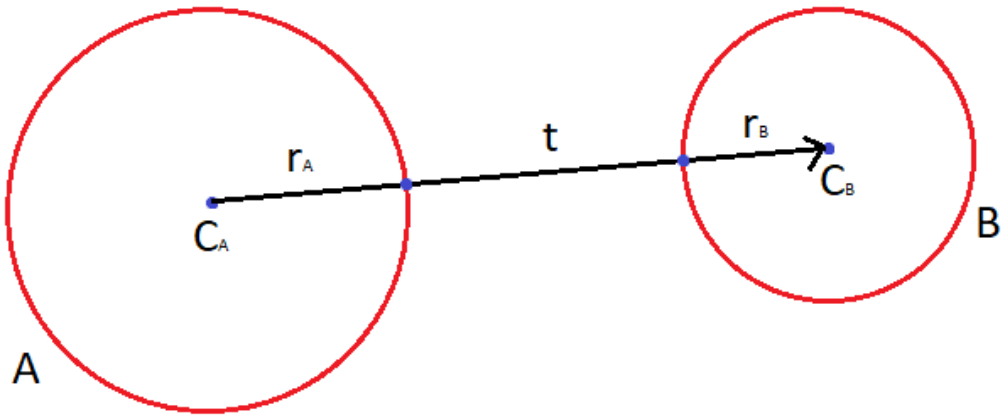

Рис. 4. Иллюстрация проверки двух кругов на коллизию

Fig. 4. Illustration of checking two circles for collision

Коллизия отрезка и круга проверяется так же, как и коллизия прямоугольника и круга: методом нахождения ближайшей к центру окружности точки отрезка и проверки вхождения ее в круг. Сначала необходимо проверить, что одна из конечных точек отрезка входит в окружность. Если условие выполняется, то коллизия произошла, иначе необходимо найти векторы $K = C_B - P$ и PQ, где C_B – центр круга, P, Q – конечные точки отрезка. Далее необходимо вычислить t:

$$t = \frac{K \cdot PQ}{PQ \cdot PQ}. \quad (3)$$

Если множитель t получился меньше 0 или больше 1, значит, коллизии между двумя данными фигурами нет. Иначе координаты ближайшей к кругу точки отрезка получаются путем переноса точки P на вектор $t \cdot PQ$. После этого остается лишь проверить вхождение этой точки в круг. Иллюстрация метода представлена на рисунке 5.

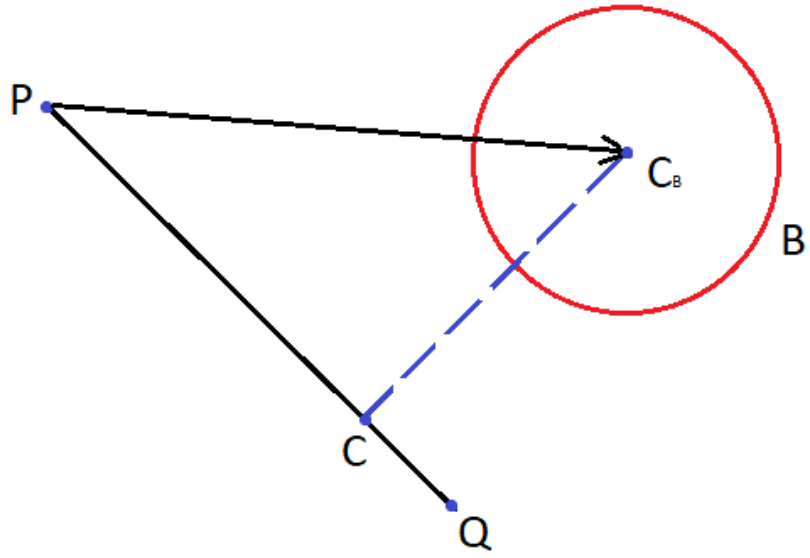

Рис. 5. Проверка отрезка и круга на коллизию

Fig. 5. Checking the segment and circle for collisions

Проверка двух отрезков на пересечение: два отрезка пересекаются, если описывающие их выровненные по осям прямоугольники (Axis-AlignedBoundingBoxes, AABB) накладываются друг на друга и при этом конечные точки отрезка P_1Q_1 лежат по разные стороны отрезка P_2Q_2 либо одна из конечных точек первого отрезка лежит на втором отрезке [8; 12; 13] . Детальная иллюстрация представлена на рисунке 6.

Проверка коллизии отрезка и ориентированного прямоугольника производится анализом пересечения исходного отрезка и всех отрезков, содержащих стороны прямоугольника. В том случае, если отрезок находится

внутри прямоугольника, то предварительно производится проверка вхождения конечных точек отрезка в прямоугольник.

Сложности возникают при коллизии параллельных друг другу отрезков. В динамической симуляции один такой отрезок гарантированно пройдет сквозь другой, параллельный ему, даже если при движении он должен был с ним столкнуться. Иллюстрация представлена на рисунке 7.

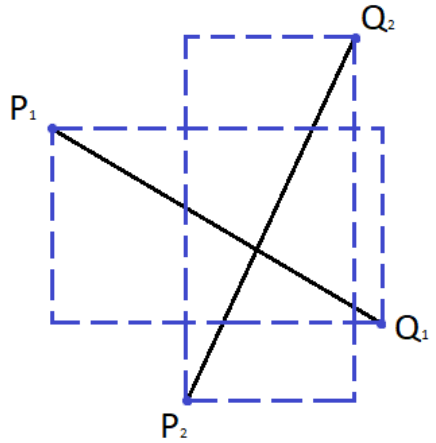

Рис. 6. Нахождение пересечения двух отрезков

Fig. 6. Finding the intersection of two line segments

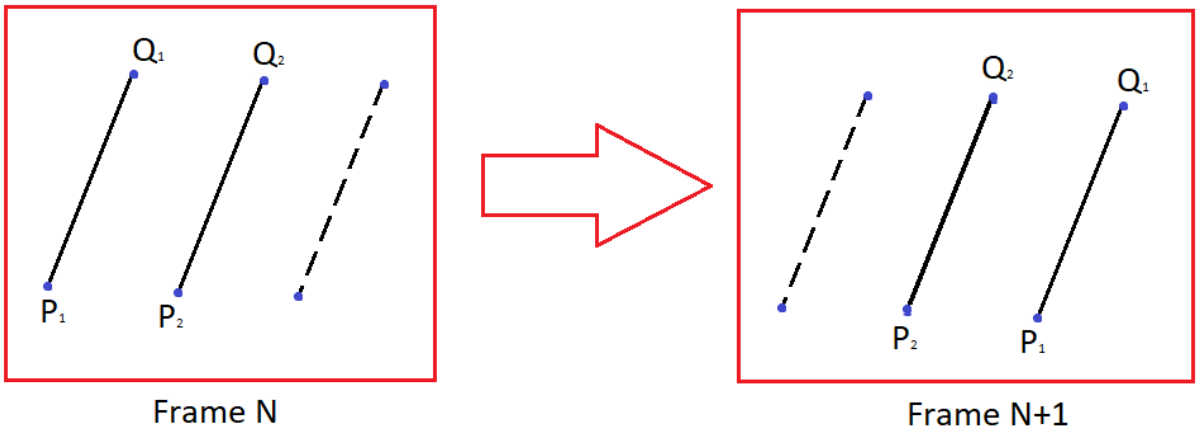

Рис. 7. Иллюстрация того, как коллизия параллельных отрезков не обнаруживается

Fig. 7. An illustration of how collision of parallel lines is not detected

Именно поэтому проверку параллельных отрезков на коллизию следует осуществлять между кадрами. Для этого делается следующее: отрезок P_2Q_2 совершает движение, противоположное движению отрезка P_1Q_1. Новый отрезок $P_2`Q_2`$. P_1Q_1 двигаем в предназначенном ему направлении, получаем $P_1`Q_1`$. Строим новые отрезки: $P_1P_1`$, $P_2P_2`$, $Q_1Q_1`$, $Q_2Q_2`$. Если хотя бы один из этих отрезков пересечет один из первоначальных отрезков, значит, между кадрами *N* и *N+1* произошла коллизия отрезков, которую надо обработать соответствующим образом. Этот метод проиллюстрирован на рисунке 8.

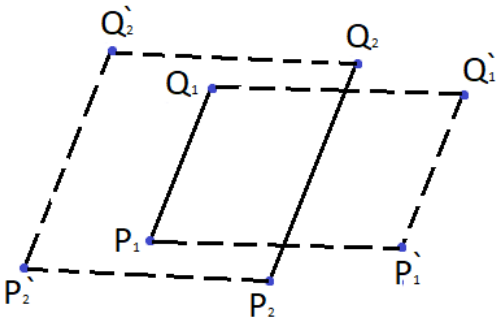

Рис. 8. Межкадровая проверка параллельных отрезков на коллизию

Fig. 8. Interframe check of parallel segments for collision

Если коллизия между двумя объектами была обнаружена, то производится проверка коллизий, при которой поведение объектов зависит от количества сменяемых кадров. Установлено, что чем больше скорость объекта и меньше частота кадров, тем менее точной будет проверка объектов на коллизию. Поэтому необходимо с определенной точностью находить максимально близкую к другому объекту точку, в которой первый объект не будет накладываться на другой. Для этого используется аппроксимация позиции объекта при его перемещении из точки A в точку B, которое происходит за один кадр. Весь путь первого объекта между кадрами разбивается на N равноотстоящих точек, где N – значение интенсивности аппроксимации. Чем количество точек меньше, тем выше производительность и меньше точность аппроксимации. Первый объект поочередно перемещается из одной точки в другую, в каждой из которых происходит проверка коллизии с другим объектом. Поиск заканчивается, когда все точки пройдены или если обнаружена коллизия. Результатом является последняя точка перед той, в которой была выявлена коллизия. Именно в эту позицию и будет перемещен объект в следующем кадре [8; 12; 13]. Данный процесс проиллюстрирован на рисунке 9.

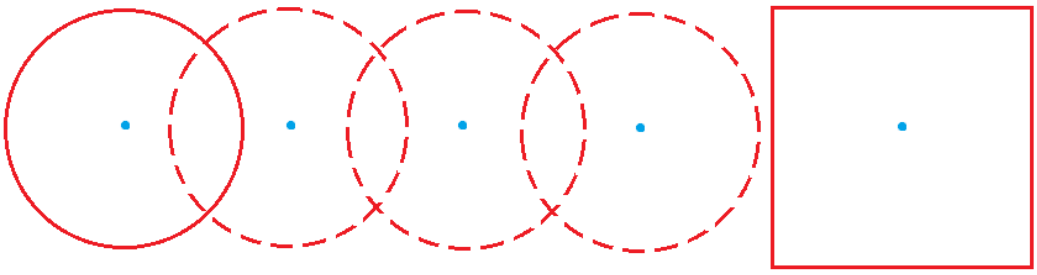

Рис. 9. Аппроксимация позиции круга по отношении к кубу, с которым круг должен столкнуться в следующем кадре

Fig. 9. Approximation of the position of the circle in relation to the cube, with which the circle should collide in the next frame

Обычно в компьютерных играх геометрических объектов на экране очень много, и если во всех кадрах проверять коллизию каждого объекта с каждым, то частота кадров снизится, а нагрузка на процессор возрастет. Именно поэтому необходимо оптимизировать поиск коллизий в пространстве. Для этого в программных игровых платформах используются алгоритмы разбиения пространства, а конкретно в Cirno задействовано дерево квадрантов [12; 14]. Оно разбивает пространство на 4 подпространства, каждое из которых разбивается еще на 4 подпространства и т. д. У дерева квадрантов задается максимальная глубина и максимальное число объектов в подпространстве. Если число объектов в квадранте превышает N – максимальное число объектов в квадранте, то квадрант раз-

деляется на 4 новых квадранта, в которые перераспределяются все объекты из родительского квадранта. Но если глубина дерева равна числу M – максимальной глубине дерева, то квадранты не разделяются на новые, а объект вставляется, несмотря на превышение емкости квадранта. Когда происходит проверка коллизии конкретного объекта O с другими объектами в пространстве, идет обход дерева в глубину с целью найти именно те квадранты, в которых находится объект O. Как только квадранты найдены, происходит проверка объекта O на коллизию со всеми остальными объектами в этих квадрантах. Таким образом, при необходимости определить, с какими другими объектами объект O имеет коллизию, проверяются не все объекты пространства, а только соседние с объектом O. Если с объектом O выполняются аффинные преобразования (перемещение, вращение, масштабирование), необходимо выполнить обход дерева в глубину 2 раза: один раз – чтобы удалить объект из старых квадрантов, второй раз – чтобы вставить в новые.

Использование деревьев квадрантов дает возможность достигать высокой частоты смены кадров при большом количестве объектов на экране. Например, в играх жанра Shoot'emUp количество снарядов на экране велико (на уровнях повышенной сложности оно исчисляется несколькими сотнями и может доходить до 1000 и более), но нет необходимости проверять их коллизию друг с другом, проверяется коллизия только с игроком, причем именно в том квадранте, где игрок расположен (рис. 10).

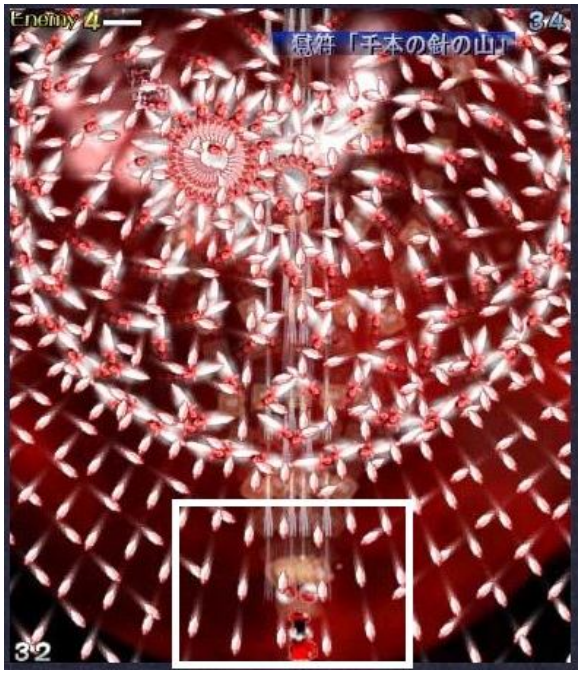

Рис. 10. Скриншот из Touhou 6 (несмотря на большое число снарядов, проверки коллизии необходимо делать только в обведенной области)

Fig. 10. Screenshot from Touhou 6 (despite the large number of projectiles, collision checks should only be made in the circled area)

В библиотеке Cirno присутствует система тэгов, которая предназначена для того, чтобы группировать формы и задавать правила коллизии для них. Она составлена следующим образом: каждая форма реализует интерфейс Shape, в котором предполагается, что любая форма имеет два поля – identity (идентичность) и mask (маска). Идентичность определяет, какие формы могут иметь коллизию с данной формой, а маска – с какими формами данная форма может иметь коллизию. Иначе говоря, в данной системе, если форма A может иметь коллизию с формой B, необязательно форма B будет иметь коллизию с формой A [15; 16]. Чтобы проверить, может ли одна форма иметь коллизию в отношении другой, в библиотеке применяется метод, листинг которого приведен на рисунке 11.

```
Func (t tag) ShouldCollide(other Shape) bool {
    return t.mask&other.GetIdentity() > 0
}
```

Рис. 11. Листинг метода проверки коллизий

Fig. 11. Listing of the collision check method

Как видно из кода, приведенного на рисунке 11, для проверки возможности коллизии конъюнкция маски формы t и идентичности формы shape сравнивается с нулем. Если результат является ненулевым, то коллизия может иметь место.

Взаимодействие с библиотекой происходит через класс Space. Объект этого класса хранит дерево квадрантов с формами в нем. Каждый раз, когда форма изменяет свое положение и/или угол в пространстве, необходимо вызывать метод func (space *Space) Update (shapeShape), который изменит положение формы в дереве квадрантов. Для обнаружения коллизий между формами в пространстве есть следующие методы:

f func (*space *Space*) *WouldBeCollidedBy* (*shape Shape*, *moveDiff Vector*, *turnDiff float64*) – возвращает множество форм пространства space, которые будут перекрываться формой shape, указанной в качестве аргумента метода, если она будет перемещаться в указанном направлении moveDiff и/или вращаться на указанный угол turnDiff. Этот метод необходимо вызывать перед тем, как производить с формой действия (движение и вращение), после которых необходимо вызывать Update.

func (*space *Space*) *CollidedBy* (*shape Shape*) – возвращает множество форм пространства space, которые перекрываются формой shape. Этот метод необходимо вызывать уже после того, как над формой произведены необходимые манипуляции (движение и вращение) и вызван метод Update. Основ-

ное отличие от метода *WouldBeCollidedBy* заключается в том, что *CollidedBy* не имеет возможность проверить коллизию коллинеарных линий, но при этом задействует меньше обращений к дереву квадрантов. Так что вызывать его стоит всегда, когда нет необходимости прибегать к вызову *WouldBeCollidedBy*.

Также класс Space имеет так называемые методы запросов:

func (*space *Space*) *Raycast* (*origin Vector*, *direction Vector*, *distance float64*, *mask int32*) – выполняет бросание луча из заданной точки origin в направлении direction. Возвращает первую форму, пересеченную лучом;

func (*space *Space*) *Boxcast*(*rect *Rectangle*) – возвращает все формы пространства, пересекаемые прямоугольников rect;

func (*space *Space*) *Circlecast* (*circle *Circle*) – возвращает все формы пространства, пересекаемые кругом circle.

Результаты и их обсуждение

Для демонстрации возможностей графической библиотеки была создана симуляция броуновского движения, при котором частицы беспорядочно движутся в пространстве и сталкиваются между собой.

С течением времени симуляции число коллизий в ней растет (рис. 12, 13).

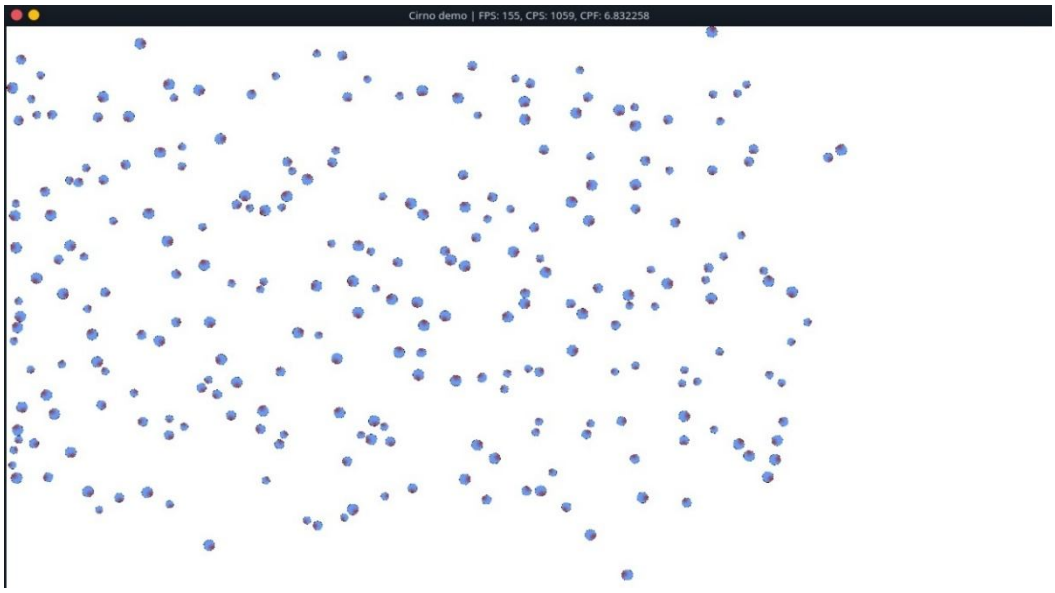

Рис. 12. Начало симуляции

Fig. 12. Start simulation

В данной симуляции используются следующие показатели производительности: FPS (FramesperSecond, кадров в секунду), или же частота кадров; CPS (CollisionsperSecond, коллизий в секунду), или же сумма числа коллизий каждого объекта; CPF (CollisionsperFrame, коллизий за кадр) является

отношением CPS к FPS. Количество объектов на экране – 256, каждый из них может сталкиваться с любым другим. Таким образом, при увеличении среднего числа покадровых коллизий в ~43 раза, частота кадров уменьшается лишь в 2,6 раза. Этого удалось достичь благодаря разбиению пространства при помощи дерева квадрантов, большинство операций которого осуществляются за асимптотическое время $O(\log n)$.

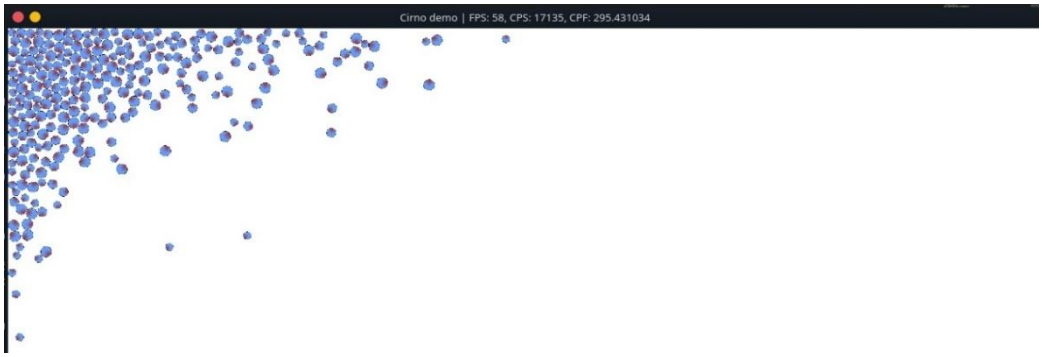

Рис. 13. Окончание симуляции

Fig. 13. End of simulation

Выводы

В результате проведенных исследований на основе теоремы о разделяющей оси, позволяющей производить обнаружение наложения объектов друг на друга в двумерном пространстве, а также алгоритма разбиения пространства с помощью дерева квадрантов, позволяющего оптимизировать поиск коллизий в пространстве, была создана библиотека разрешения коллизий на языке программирования Go. В рамках работы были проведены исследования эффективности созданных алгоритмов с помощью симуляции броуновского движения, в котором даже при очень большой загруженности (11 000 проверок коллизий в секунду), которой обычно не случается в реальных игровых сценах, частота кадров остается не менее 60. Таким образом, созданная библиотека может выдерживать большие вычислительные нагрузки. Методы библиотеки позволяют обнаруживать и разрешать коллизии объектов разной формы. Исходный код библиотеки будет опубликован на GitHub под лицензией BSD (2-clause).

Список литературы

1. Wijman T. The World’s 2.7 Billion Gamers Will Spend $159.3 Billion on Games in 2020. The Market Will Surpass $200 Billion by. URL: https://newzoo.com/insights/articles/newzoo-games-market-numbers-revenues-and-audience-2020-2023/ (accessed 18.11.2019).

2. Глейзер Д., Мадхав С. Многопользовательские игры. Разработка сетевых приложений. СПб.: Питер, 2016. 368 с.

3. Томакова Р. А., Петрик Е. А. Методы и алгоритмы цифровой обработки изображений. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2020. 310 с.

4. Maidment D. Writing a 2D platform game engine in Golang. URL: https://medium.com/@DavidMaidment/writing-a-2d-platform-game-engine-in-golang-2a83666c35f1 (accessed 15.03.2020).

5. Resolv. URL: https://github.com/SolarLune/resolv (accessed 30.10.2019).

6. Physac. URL: https://github.com/victorfisac/Physac (accessed 30.10.2019).

7. Алгоритмы обнаружения коллизий плоских двумерных объектов произвольной формы / Р. А. Файзрахманов, Р. Т. Мурзакаев, М. Д. Швецов, А. С. Мехоношин, А. Ф. Хабибулин // Инженерный вестник Дона. 2015. № 3 (37). С. 73.

8. Конгер Д. Физика для разработчиков компьютерных игр. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 520 с.

9. Huynh J. Separating Axis Theorem for Oriented Bounding Boxes. URL: https://www.jkh.me/files/tutorials/Separating Axis Theorem for Oriented Bounding Boxes.pdf (accessed 20.11.2019).

10. Thoma M. How to check if two line segments intersect. URL: https://martin-thoma.com/how-to-check-if-two-line-segments-intersect/ (accessed 11.11.2019).

11. Licensing a repository. URL: https://help.github.com/en/github/creating-cloning-and-archiving-repositories/licensing-a-repository (accessed 10.11.2019).

12. Ефимов Н. В. Линейная алгебра и многомерная. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 464 с.

13. Szauer G. Game Physics Cookbook. Packt Publishing, 2017. 480 p.

14. Лапина Т. И., Лапин Д. В., Петрик Е. А. Использование информационного критерия для классификации данных измерений // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15, № 12. С. 45-50.

15. Лапина Т. И. Прогнозирование динамических процессов в задачах распределения ресурсов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8, № 11. С. 51-54.

16. Томакова Р. А. Метод обработки сложносегментируемых изображений с использованием многослойных морфологических операторов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2, ч. 2. С. 158-164.

References

1. Wijman T. The World's 2.7 Billion Gamers Will Spend $159.3 Billion on Games in 2020; The Market Will Surpass $200 Billion by. Available at: https://newzoo.com/insights/articles/newzoo-games-market-numbers-revenues-and-audience-2020-2023/. (accessed 18.11.2019)

2. Glejzer D., Madhav S. Mnogopol'zovatel'skie igry. Razrabotka setevykh prilozhenii [Multiplayer games. Development of network applications]. St. Petersburg, Piter Publ., 2016. 368 p. (In Russ.)

3. Tomakova R. A., Petrik E. A. Metody i algoritmy tsifrovoi obrabotki izob-razhenii [Methods and algorithms for digital image processing]. Kursk, ZAO "Universitetskaya kniga", 2020. 310 p. (In Russ.)

4. Maidment D. Writing a 2D platform game engine in Golang. Available at: https://medium.com/@DavidMaidment/writing-a-2d-platform-game-engine-in-golang-2a83666c35f1. (accessed 15.03.2020)

5. Resolv. Available at: https://github.com/SolarLune/resolv. (accessed 30.10.2019)

6. Physac. Available at: https://github.com/victorfisac/Physac. (accessed 30.10.2019)

7. Fajzrahmanov R. A., Murzakaev R. T., Shvecov M. D., Mekhonoshin A. S., Habibulin A. F. Algoritmy obnaruzheniya kollizii ploskikh dvumernykh ob"ektov proizvol'noi formy [Collision detection algorithms for flat two-dimensional objects of arbitrary shape]. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Bulletin of Don*, 2015, no. 3 (37), p. 73. (In Russ.)

8. Konger D. Fizika dlya razrabotchikov komp'yuternykh igr [Physics for computer game developers]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znanii Publ., 2007. 520 p. (In Russ.)

9. Huynh J. Separating Axis Theorem for Oriented Bounding Boxes. Available at: https://www.jkh.me/files/tutorials/Separating Axis-Theorem-for-Oriented-Bounding-Boxes.pdf. (accessed 20.11.2019)

10. Thoma M. How to check if two line segments intersect. Available at: https://martin-thoma.com/how-to-check-if-two-line-segments-intersect/. (accessed 11.11.2019)

11. Licensing a repository. Available at: https://help.github.com/en/github/creating-cloning-and-archiving-repositories/licensing-a-repository. (accessed 10.11.2019)

12. Efimov N. V Lineinaya algebra i mnogomernaya [Linear algebra and multidimensional]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004. 464 p. (In Russ.)

13. Szauer G. Game Physics Cookbook. Packt Publishing, 2017. 480 p.

14. Lapina T. I., Lapin D. V., Petrik E. A. Ispol'zovanie informatsionnogo kriteriya dlya klassifikatsii dannykh izmerenii [Using an information criterion to classify measurement data]. *Naukoemkie tekhnologii = Science-intensive technologies*, 2014, vol. 15, no. 12, pp. 45-50. (In Russ.)

15. Lapina T. I. Prognozirovanie dinamicheskikh protsessov v zadachakh raspredeleniya resursov [Forecasting dynamic processes in resource allocation problems]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and control systems*, 2010, vol. 8, no. 11, pp. 51-54. (In Russ.)

16. Tomakova R. A. Metod obrabotki slozhnosegmentiruemykh izobrazhenii s ispol'zovaniem mnogosloinykh morfologicheskikh operatorov [A method of processing complexly segmented images using multilayer morphological operators]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2012, no. 2, pt. 2, pp. 158-164. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Петрик Елена Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: petrik.ea@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9296-4047

Elena A. Petrik, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: petrik.ea@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9296-4047

Харченко Максим Андреевич, студент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: maximgradan@gmail.co

Maxim A. Kharchenko, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: maximgradan@gmail.com

Лапина Татьяна Ивановна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: lapinati@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7959-3053

Tatyana I. Lapina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Information Systems and Technologies Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: lapinati@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7959-3053

Оригинальная статья / Original article

УДК 05.13.01

Тестирование алгоритмов детектирования размытых изображений

А. В. Алексеев[1], Ю. А. Орлова[1] ✉, В. Л. Розалиев[1], А. В. Заболеева-Зотова[1]

[1] Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
пр. им. В. И. Ленина, 28, г. Волгоград, 400006, Российская Федерация

✉ e-mail: yulia.orlova@gmail.com

Резюме

Цель исследования *заключается в сборе данных (изображений) для автоматического тестирования алгоритмов детектирования размытых изображений.*

Методы исследования. *К собираемому набору данных выдвинуты следующие требования: набор данных должен включать тройки изображений различных сцен. Одна тройка изображений – это четкое, расфокусированное и смазанное в движении изображения. Кроме того, чтобы избежать искажений результатов, необходимо использовать как можно большее количество физических устройств для получения снимков. Для сбора данных использовалась краудсорсинговая платформа Яндекс.Толока. В данной платформе исполнителям (толокерам) ставилось задание сделать три фотографии одной и той же сцены: четкую, расфокусированную и смазанную в движении. Для отсеивания некачественного выполнения была использована ручная постпроверка авторами. Кроме того, собранный набор данных исключает разные тройки (четкое, расфокусированное и смазанное в движении) изображений одной и той же сцены или объекта.*

Результаты. *Результатом исследования является собранный и описанный набор данных, находящийся по адресу https://github.com/Kwentar/blur_dataset/. Кроме того, в результате работы был разработан метод для автоматической генерации синтетических размытых изображений, который может быть использован в методах и алгоритмах машинного обучения.*

Заключение. *Собранный набор изображений может быть использован как для проверки качества работы методов и алгоритмов детектирования размытых изображений, так и для настройки этих методов и алгоритмов.*

Ключевые слова: *обработка изображений; датасет изображений; детектирование размытых изображений; генерация размытых изображений.*

Финансирование*: Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ и администрации Волгоградской области (гранты 18-07-00220, 19-07-00020, 19-47-343001, 19-47-340003, 19-47-340009, 19-47-340013, 19-47-343002, 19-37-90060, 20-07-00502).*

Конфликт интересов*: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Алексеев А. В., Орлова Ю. А., Розалиев В. Л., Заболеева-Зотова А. В., 2020

Для цитирования: Тестирование алгоритмов детектирования размытых изображений / А. В. Алексеев, Ю. А. Орлова, В. Л. Розалиев, А. В. Заболеева-Зотова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 67–77.

Поступила в редакцию 19.02.2019 *Подписана в печать 17.01.2020* *Опубликована 25.02.2020*

Testing Algorithms for Detecting Blurry Images

Alexey V. Alekseev[1], Yulia A. Orlova[1] ✉, Vladimir L. Rozaliev[1], Alla V. Zaaboleeva-Zotova[1]

[1] Volgograd State Technical University (VSTU),
avenue V. I. Lenina, 28, Volgograd, 400006, Russian Federation

✉ e-mail: yulia.orlova@gmail.com

Abstract

The purpose of the study *is to collect dataset (images) for automatic testing of blurry image detection algorithms.*
Methods. *The following requirements are put forward for the collected dataset: the dataset must include triplets of images of various scenes. One triplet of images has three images: a clear, defocused and motion blurred image. In addition, in order to avoid distortion of the results, it is necessary to use as many physical devices as possible to obtain images. To collect data, the crowdsourcing platform Yandex.Toloka was used. In this platform, the workers (tolokers) were tasked with making three photographs of the same scene: clear, defocused, and blurred in motion. For screening of poor-quality performance, manual post-verification by the authors was used. In addition, the collected dataset excludes different triplets (clear, defocused and blurry in motion) of images of the same scene or object.*
Results. *The result of the study is a collected and described dataset located at https://github.com/Kwentar/blur_dataset/. We also developed a method for the automatic generation of synthetic blurry images that can be used in the machine learning algorithms.*
Conclusion*. The collected dataset of images can be used both to check the quality of the work of blurry image detection methods and algorithms, and to configure these methods and algorithms.*

Keywords: *Image processing; image dataset; blurry image detection; blurry image generation.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Alekseev A. V., Orlova Yu. A., Rozaliev V. L., Zaaboleeva-Zotova A. V. Testing Algorithms for Detecting Blurry Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(1): 67–77. (In Russ.)

Received 19.12.2019 *Accepted 17.01.2020* *Published 25.02.2020*

***

Введение

В настоящее время генерируется огромное количество фотографий в самых различных сферах жизни: любительских, спутниковых, микроскопических. В силу влияния из-за внешних факторов

или в случае неправильных настроек апертуры, изображение получаются размытыми. Основные причины появления размытия изображений – движение сцены или устройства захвата изображения и неправильно выставленное фокусное расстояние. Задача автоматического детектирования размытых изображений является актуальной, необходимой для предварительной фильтрации, с целью обнаружения и определения изображений с неудовлетворительным качеством для того, чтобы не обрабатывать их в дальнейшем [1; 2; 3]. Для создания методов автоматического детектирования размытых изображений необходимы эталонные наборы изображений для последующей оценки качества решений. На данный момент существует ряд наборов данных, такие как [4] и [5], однако они обладают рядом существенных недостатков: малое количество устройств, на некоторых изображениях отдельное размытие объекта от фона, часть размытых изображений сгенерированы синтетически [6; 7]. Целью данной работы являлось создание набора изображений, предназначенного для автоматической проверки качества работы алгоритмов и реализации методов детектирования размытых изображений.

Материалы и методы

Описание собранного набора размытых и четких изображений

Для тестирования методов и алгоритмов автоматического детектирования размытых изображений был составлен набор изображений. К процессу формирования данного набора выдвигались следующие требования:

1. Объем выборки – набор изображений должен содержать не менее 1000 изображений.

2. Необходимо произвести значительное разнообразие сцен и объектов на изображениях.

3. Необходимо использовать как можно большее разнообразие устройств, с помощью которых возможно получить изображения, включая как мобильные устройства (смартфоны), так и фотоаппараты (зеркальные и незеркальные).

4. Для каждой сцены необходимо получить 3 изображения: четкое, размытое в движении (получалось с помощью большого значения выдержки и движения устройства захвата изображения) и расфокусированное (получалось неверной установкой фокуса на устройстве захвата изображения).

Для выполнения выдвинутых требований с целью формирования набора изображений было решено использовать краудсорсинговую платформа Яндекс.Толока [5]. Применение этой платформы дает возможность использовать большое разнообразие устройств и сцен исполнителей (толокеров), кроме того, обеспечить повышает скорость сбора данных.

С целью проведения исследований был сформирован набор данных, состоящий из 1050 изображений, при этом изображения представлены тройками (всего 350 троек). Каждая тройка представляет фотографию одной и той же сцены (примерное соответствие, не

«пиксел в пиксел»). Первое изображение четкое, второе – расфокусировано, а третье смазано в движении. Изображение в тройке гарантированно имеет один и тот же размер (ширина и высота).

Набор данных формировался с помощью различных устройств, всего представлено 66 устройств, более 10 снимков, получены с 8 устройств. Большая часть устройств – это смартфоны, также представлено несколько фотоаппаратов.

Структура набора данных следующая: три папки: sharp, defocused-blurred и motion-blurred. В каждой папке по 350 соответствующих изображений.

Имя каждого файла имеет следующую структуру:

<id>_<device>_<type>.<extension>,

где id – уникальный идентификатор изображения, число от 0 до 349;

device – устройства захвата изображения;

type – тип изображения, одно из трех возможных [S, F, M],

где S – четкое изображение (sharp);

F – расфокусированное изображение (defocused-blurred);

M – смазанное в движении изображение (motion-blurred).

Примеры изображений приведены ниже (рис. 1).

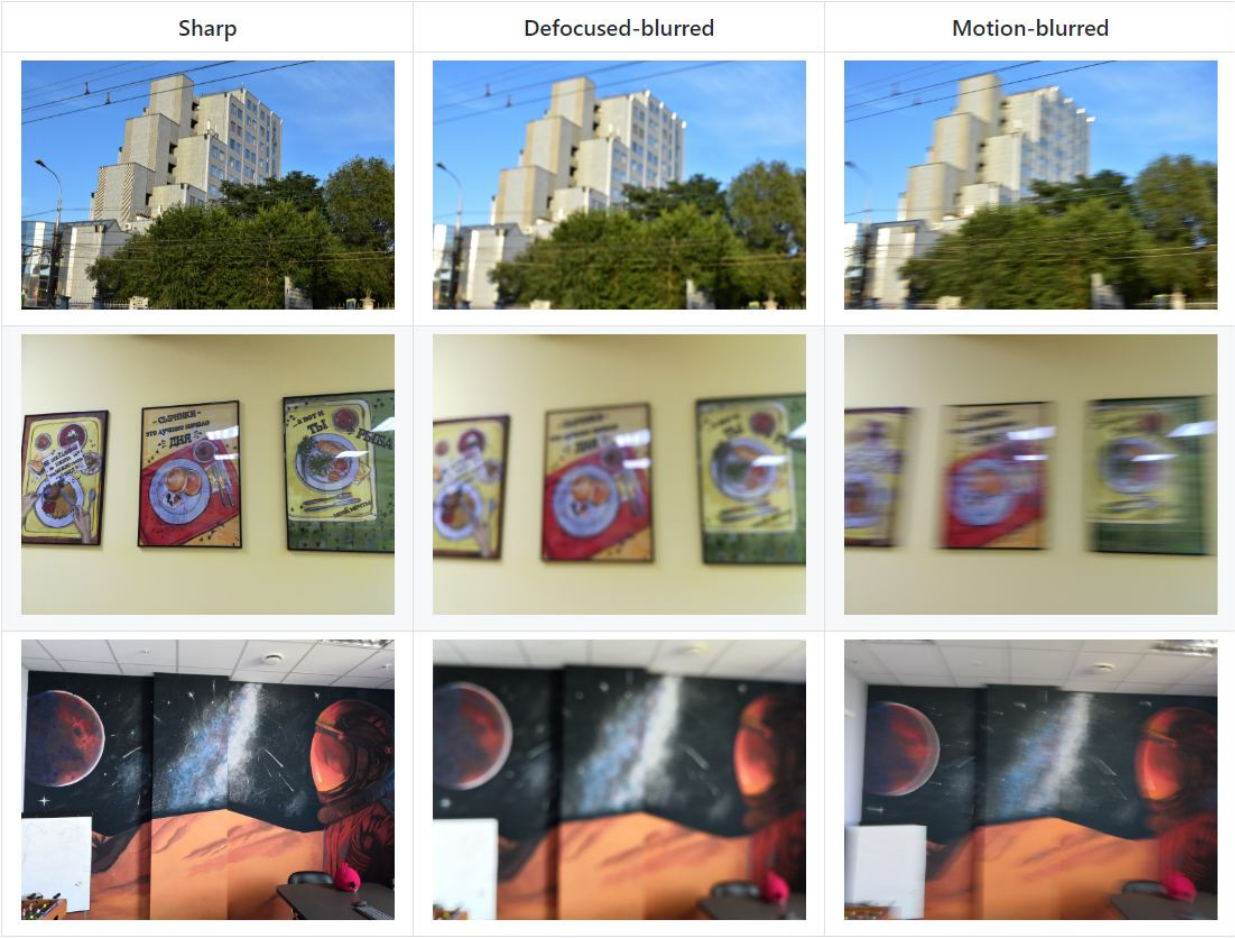

Рис. 1. Пример изображений из набора данных

Fig. 1. Example of images from dataset

Генерация размытых изображений

Формальная модель процесса размытия (1) представлена в виде

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) + n(x,y), \qquad (1)$$

где $g(x,y)$ – полученное размытое изображение;

$h(x,y)$ – искажающая функция;

$f(x,y)$ – исходное, неповрежденное изображение;

$n(x,y)$ – аддитивный шум.

* – оператор свертки.

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) = \\ = \sum_{i=-a}^{a} \sum_{j=-b}^{b} h(i,j) f(x+i, y+j), \qquad (2)$$

где $h(x,y)$ имеет размеры m×n, $a = \frac{m-1}{2}$, $b = \frac{n-1}{2}$.

Соответственно, для генерации размытых изображений необходимо иметь четкое изображение, искажающую функцию (или функция рассеяния точки, ФРТ) и аддитивный шум.

Причины возникновения аддитивного шума n(x,y) различны и обусловливаются физическими процессами, возникающими в цифровых сенсорах. При этом на величину шума влияет большое количество параметров, таких как: тип фотоматрицы сенсора, условия освещения, параметры съемки и др. В большинстве случаев шум является гауссовым, аддитивным и не зависит от координат пикселя на изображении. В данной работе для имитации шума использовали прибавление гауссова шума к результату операции свертки, применительно к каждому из цветных каналов [8]. При этом величина шума изменялась с целью повышения обобщающей способности сети.

Результаты их обсуждение

Для генерации размытых изображений необходимо определить искажающую функцию, или функцию рассеивания точки (ФРТ). В данной работе под ФРТ подразумевается 2D-изображения небольших размеров (до 128x128 пикселей).

В случае расфокусированных изображений функция рассеяния точки представляет собой «пятно», близкое к кругу. Размер пятна определяется тем, насколько далеко объект от точки фокуса и открытостью диафрагмы (чем дальше от точки фокуса, тем больше пятно при одной и той же диафрагме; и чем сильнее открыта диафрагма, тем больше при одном и том же расстоянии). Более того, в силу наличия шумов пятно неравномерно. Пример реальных ФРТ, полученных фотографированием близкого к точечному источнику света, приведен на рисунке 2, а.

Алгоритм генерации ФРТ расфокусированных изображений состоит из этапов:

1. Определение размера, число от 16 до 128.

2. Определение количества углов, от 6 до 20, также возможен идеальный круг с вероятностью 0,2.

3. Генерация заданной формы.

4. Применение сжатия до 15% с вероятностью 0,1.

5. Добавление шума на полученную ФРТ.

Примеры сгенерированных ФРТ приведены на рисунке 2, б и 2, в. Для сравнения проекции сгенерированного и реального ФРТ представлены на рисунке 3.

а) *б*) *в*)

Рис. 2. Примеры расфокусированной ФРТ: *а* – реальная ФРТ; *б* и *в* – сгенерированная ФРТ

Fig. 2. Examples of defocuses PSF: *а* – Real PSF; *б* and *в* – generated PSF

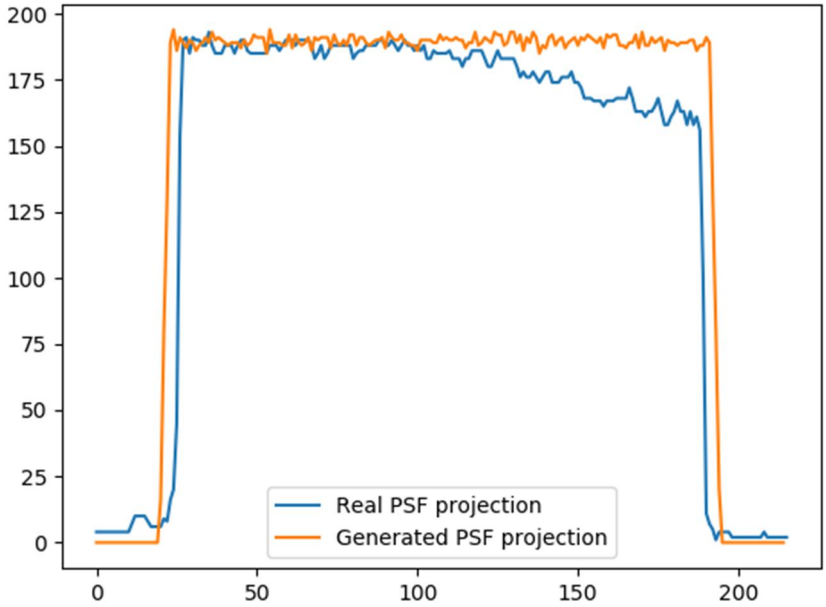

Рис. 3. Проекции сгенерированной и реальной ФРТ

Fig. 3. Projection of generated and real PSF

Для смазанных в движении изображений был реализован алгоритм, приведенный в [9]. Примеры сгенерированных ФРТ с помощью данного алгоритма приведены на рисунке 4, а на рисунке 5 показаны примеры сгенерированных размытых изображений.

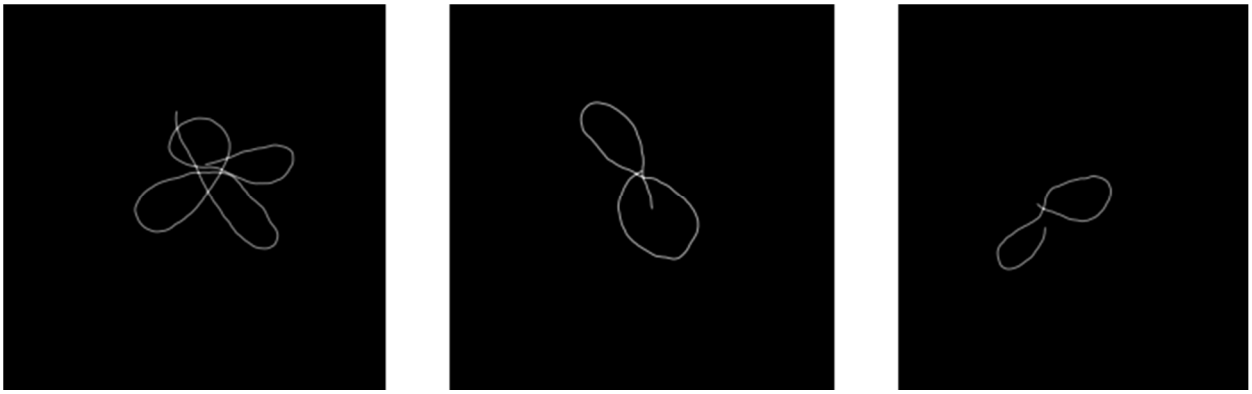

Рис. 4. Примеры сгенерированных ФРТ для размытия в движении

Fig. 4. Examples of generated PSF for motion blur

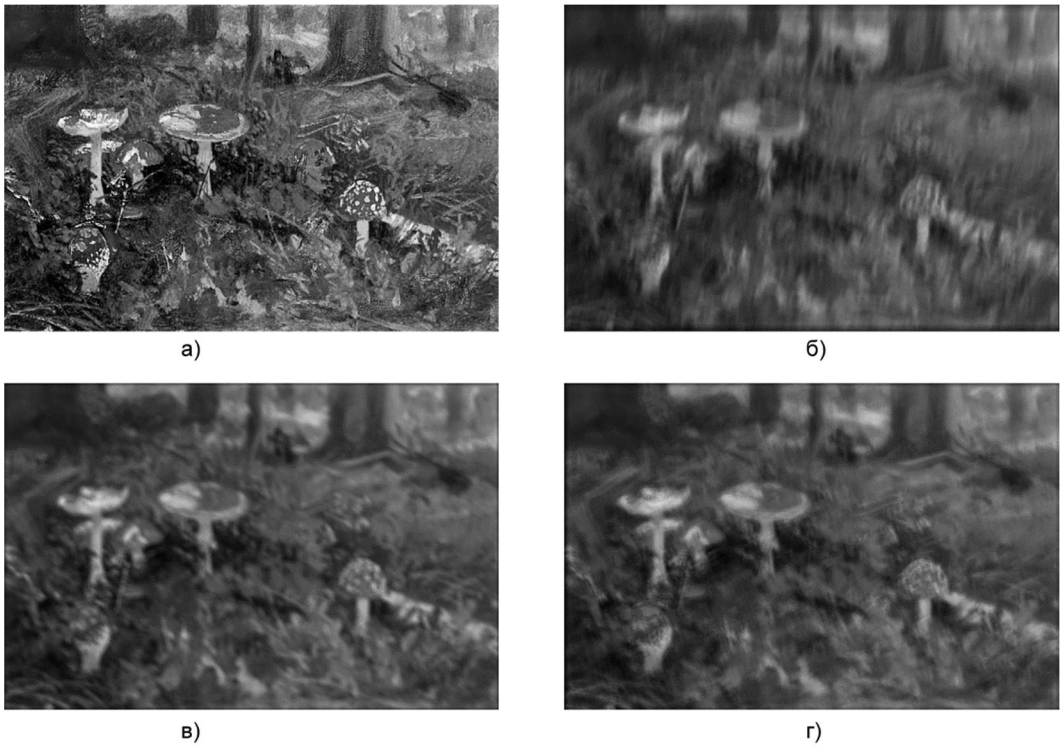

Рис. 5. Пример работы метода генерации синтетических изображений:
а – исходное; б, в и г – сгенерированные

Fig. 5. Example of results of synthetic blur images generation method:
а – source image; б, в and г – generated images

Обсуждение результатов

Методы детектирования размытых изображений можно разделить на две категории: методы «классического машинного зрения», которые построены на аналитических формулах и предположениях, и методы глубокого машинного обучения, в основе которых лежит использование больших наборов данных и в общем случае нейронных сетей. Самым робастным примером из первой группы являются методы на основе дисперсии опера-

тора Лапласа [10]. Вторая группа включает методы, которые позволяют детектировать размытие на изображениях и автоматически вычислять ФРТ [11; 12].

Выводы

Собранный набор изображений может быть использован как для проверки качества работы методов и алгоритмов детектирования размытых изображений, так и для настройки этих методов и алгоритмов. Предложенный метод генерации размытых изображений может быть использован в алгоритмах и методах детектирования размытых изображений, основанных на машинном обучению и требующих большого объема данных для процесса обучения.

Список литературы

1. Alekseev A. V., Rozaliev V. L., Orlova Yu. A. Automatic coloring of grayscale images based on intelligent scene analysis // Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications). 2015. Vol. 25, no. 1. P. 10-21.

2. Томакова Р. А. Метод обработки сложносегментируемых изображений с использованием многослойных морфологических операторов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-2. С. 158-164.

3. Многослойные морфологические операторы для сегментации сложноструктурируемых растровых полутоновых изображений / С. А. Филист, А. Р. Дабагов, Р. А. Томакова [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 3(32). С. 44-63.

4. Mavridaki E., Mezaris V. No-Reference blur assessment in natural images using Fourier transform and spatial pyramids // Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2014). Paris, 2014.

5. Jianping Shi, Li Xu, Jiaya Jia. Discriminative Blur Detection Features // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2014.

6. Practice of Efficient Data Collection via Crowdsourcing at Large-Scale / A. Drutsa, V. Farafonova, V. Fedorova, O. Megorskaya, E. Zerminova, O. Zhilinskaya. URL: https://arxiv.org/abs/1912.04444 (accessed 30.10.2019).

7. Context-Sensitive Image Analysis for Coloring Nature Images / A. V. Alekseev, V. L. Rozaliev, Yu. A. Orlova, A. V. Zaboleeva-Zotova // Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'16) (Rostov-on-Don – Sochi, Russia, May 16-21, 2016) / ed. by A. Abraham. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. P. 133-141.

8. Two-Stage Segmentation Method for Context-Sensitive Image Analysis / A. V. Alekseev, Yu. A. Orlova, V. L. Rozaliev, A. V. Zaboleeva-Zotova // Knowledge-Based Software Engineering: Proceedings of 11th Joint Conference, JCKBSE 2014 (Volgograd, Russia, September 17-20, 2014) / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, Tadashi Iijima. Springer International Publishing, 2014. P. 331-340.

9. DeblurGAN: Blind Motion Deblurring Using Conditional Adversarial Networks / O. Kupyn, V. Budzan, M. Mykhailych, D. Mishkin, J. Matas // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 8183–8192. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00854

10. Bansal R., Raj G., Choudhury T. Blur image detection using Laplacian operator and Open-CV. 2016 // International Conference System Modeling Advancement in Research Trends (SMART). 2016. P. 63–67. DOI:10.1109/SYSMART.2016.7894491

11. Blind Image Deblurring via Deep Discriminative Priors / L. Li, J. Pan, W. S. Lai, C. Gao, N. Sang, M. H. Yang // International Journal of Computer Vision. 2018. June. DOI:10.1007/s11263-018-01146-0

12. Dynamic Scene Deblurring Using Spatially Variant Recurrent Neural Networks / J. Zhang, J. Pan, J. Ren, Y. Song, L. Bao, R. W. H. Lau, M. H. Yang // Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 2521–2529. DOI:10.1109/CVPR.2018.00267

Reference

1. Alekseev A. V., Rozaliev V. L., Orlova Yu. A. Automatic coloring of grayscale images based on intelligent scene analysis. *Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications)*, 2015, vol. 25, no. 1, pp. 10-21.

2. Tomakova R. A. Metod obrabotki slozhnosegmentiruemykh izobrazhenii s ispol'zovaniem mnogosloinykh morfologicheskikh operatorov [Method for processing complex segmented images using multilayer morphological operators]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2012, no. 2-2, pp. 158-164. (In Russ.)

3. Filist S. A., Dabagov A. R., Tomakova R. A., eds. Mnogosloinye morfologicheskie operatory dlya segmentatsii slozhnostrukturiruemykh rastrovykh polutonovykh izobrazhenii [Multi-layer morphological operators for segmentation of complex-structured raster halftone images]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the*

Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2019, vol. 9, no. 3(32), pp. 44-63. (In Russ.)

4. Mavridaki E., Mezaris V. No-Reference blur assessment in natural images using Fourier transform and spatial pyramids. Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2014). Paris, 2014.

5. Jianping Shi, Li Xu, Jiaya Jia. Discriminative Blur Detection Features. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2014.

6. Drutsa A., Farafonova V., Fedorova V., Megorskaya O., Zerminova E., Zhilinskaya O. Practice of Efficient Data Collection via Crowdsourcing at Large-Scale. Available at: https://arxiv.org/abs/1912.04444. (accessed 30.10.2019).

7. Alekseev A. V., Rozaliev V. L., Orlova Yu. A., Zaboleeva-Zotova A. V. Context-Sensitive Image Analysis for Coloring Nature Images. Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'16) (Rostov-on-Don – Sochi, Russia, May 16-21, 2016); ed. by A. Abraham. Switzerland, Springer International Publishing, 2016, pp. 133-141.

8. Alekseev A. V., Orlova Yu. A., Rozaliev V. L., Zaboleeva-Zotova A. V. Two-Stage Segmentation Method for Context-Sensitive Image Analysis. Knowledge-Based Software Engineering: Proceedings of 11th Joint Conference, JCKBSE 2014 (Volgograd, Russia, September 17-20, 2014); ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, Tadashi Iijima. Springer International Publishing, 2014, pp. 331-340.

9. Kupyn O., Budzan V., Mykhailych M., Mishkin D., Matas J. DeblurGAN: Blind Motion Deblurring Using Conditional Adversarial Networks. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018, pp. 8183–8192. doi: 10.1109/CVPR.2018.00854

10. Bansal R., Raj G., Choudhury T. Blur image detection using Laplacian operator and Open-CV. 2016. International Conference System Modeling Advancement in Research Trends (SMART), 2016, pp. 63–67. doi:10.1109/SYSMART.2016.7894491.

11. Li L., Pan J., Lai W. S., Gao C., Sang N., Yang M. H. Blind Image Deblurring via Deep Discriminative Priors. International Journal of Computer Vision, 2018, June. doi:10.1007/s11263-018-01146-0

12. Zhang J., Pan J., Ren J., Song Y., Bao L., Lau R. W. H., Yang M. H. Dynamic Scene Deblurring Using Spatially Variant Recurrent Neural Networks. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018, pp. 2521–2529. doi:10.1109/CVPR.2018.00267

Информация об авторах / Information about the Authors

Алексеев Алексей Владимирович, старший преподаватель кафедры ПОАС, Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация
e-mail: alekseev.yeskela@gmail.com

Alexey V. Alekseev, Senior Lecturer at Software Engineering Department, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation
e-mail: alekseev.yeskela@gmail.com

Орлова Юлия Александровна, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Программное обеспечение автоматизированных систем», Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация
e-mail: yulia.orlova@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4854-7462

Yulia A. Orlova, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, head of Department "Software Engineering", Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation
e-mail: yulia.orlova@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4854-7462

Розалиев Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры САПРиПК, Волгоградский технический государственный университет, г. Волго-град, Российская Федерация
e-mail: vladimir.rozaliev@gmail.com

Vladimir L. Rozaliev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, at CAD Department Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation
e-mail: vladimir.rozaliev@gmail.com

Заболеева-Зотова Алла Викторовна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Программное обеспечение автоматизированных систем», Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация
e-mail: poas@vstu.ru

Alla V. Zaaboleeva-Zotova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department "Software Engineering", Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation
e-mail: poas@vstu.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 05.11.17

Анализ параллельной нейронной сети Adaboost для классификации больших наборов изображений

Р. И. Гущин[1], Ю. А. Орлова[1] ✉, В. Л. Розалиев[1]

[1] Волгоградский государственный технический университет
пр. им. В. И. Ленина, 28, Волгоград, 400006, Российская Федерация

✉ e-mail: yulia.orlova@gmail.com

Резюме

Цель исследования *заключается в анализе параллельного алгоритма нейронной сети Adaboost-BP и получения лучших показателей скорости работы без потери точности классификации по сравнению с другими алгоритмами классификации изображений. Алгоритм, предназначенный для улучшения характеристик, является параллельной версией Adaboost-BP с использованием модели параллельного программирования MapReduce.*

Методы исследований. *Для реализации предложенного подхода был выполнен прототип системы классификации изображений с использованием языка C#. Для оценки качества алгоритма были проведено сравнение со следующими алгоритмами классификации: RF, SVM, Adaboost BP. Для проверки работоспособности предложенного алгоритма были проведены экспериментальные сравнения, оценивающие точность классификации, время выполнения, ускорение и масштабируемость.*

Результаты. *Реализация параллельного алгоритма нейронной сети Adaboost-BP была протестирована с изображениями из наборов данных Pascal VOC2007, Caltech256 и SUN. Результаты эксперимента показывают, что алгоритм, предложенный в этом исследовании, обеспечивает хорошее распараллеливание, которое может в полной мере использовать ресурсы распределенной системы для повышения эффективности классификации.*

Заключение. *Предложен параллельный алгоритм нейронной сети Adaboost-BP на основе MapReduce для решения задачи классификаций изображений. Выполнены исследования анализа параллельного проектирования, проведена реализация алгоритма нейронной сети Adaboost-BP, а также быстрая и точная автоматическая классификация массивных наборов данных изображений с использованием платформы Hadoop. Распределенная параллельная система на основе MapReduce значительно улучшила производительность по сравнению с традиционными архитектурами алгоритмов с одним узлом и полностью демонстрирует мощные вычислительные возможности параллельной обработки.*

Ключевые слова: *анализ изображений; высокопроизводительные вычисления; классификация изображений; Adaboost BP; MapReduce; Hadoop.*

Финансирование*: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-07-00020, 19-47-343009, 19-47-343001, 18-07-00220, 19-07-00020, 20-07-00502.*

Конфликт интересов*: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Гущин Р. И., Орлова Ю. А., Розалиев В. Л., 2020

Для цитирования: Гущин Р. И., Орлова Ю. А., Розалиев В. Л. Анализ параллельной нейронной сети Adaboost для классификации больших наборов изображений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 78–93.

Поступила в редакцию 08.01.2020 *Подписана в печать 31.01.2020* *Опубликована 25.02.2020*

Parallel Neural Network Analysis of Topics for Classifying Large Sets of Images

Roman I. Guschin[1], Yulia A. Orlova[1] ✉, Vladimir L. Rozaliev [1]

[1] Volgograd State Technical University (VSTU),
avenue V. I. Lenina, 28, Volgograd, 400006, Russian Federation

✉ e-mail: yulia.orlova@gmail.com

Abstract

The purpose of research *is to develop a parallel neural network algorithm Adaboost-BP and obtain the best performance characteristics of the speed without loss of classification accuracy compared to other image classification algorithms. The algorithm, to increase performance, is a parallel version of Adaboost-BP, which is using the MapReduce parallel programming model.*

Methods. *To implement the proposed approach, a prototype image classification system using the C # language was implemented. To evaluate the quality of the algorithm, a comparison was made with the following classification algorithms: RF, SVM, Adaboost BP. To verify the operability of the proposed algorithm, experimental comparisons were carried out evaluating the classification accuracy, execution time, acceleration, and scalability.*

Results. *The completed implementation was tested with image data from the Pascal VOC2007, Caltech256, and SUN datasets. The results of the experiment show that the algorithm proposed in this study provides good parallelization, which can fully use the resources of a distributed system to improve the classification efficiency of the algorithm.*

Conclusion. *In this paper, a parallel Adaboost-BP neural network algorithm based on MapReduce was proposed to solve the image classification problem. The topic of parallel design and implementation of the Adaboost-BP neural network algorithm was studied, as well as the fast and accurate automatic classification of massive image data sets using the Hadoop platform. The distributed MapReduce-based parallel system has significantly improved performance over traditional single-node algorithm architectures and fully demonstrates the powerful computing capabilities of parallel processing.*

The study was carried out with the financial support of the Russian Federal Property Fund in the framework of scientific project No. 19-47-343002.

Keywords: *image analisys; HPC; image classification; Adaboost BP; MapReduce; Hadoop.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Guschin R. I., Orlova Yu. A., Rozaliev V. L. Parallel Neural Network Analysis of Topics for Classifying Large Sets of Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(1): 78–93. (In Russ.)

Received 08.01.2020 *Accepted 31.01.2020* *Published 25.02.2020*

***

Введение

Классификация иллюстраций широко применяется для обнаружения и распознавания целей, поиска изображений, фильтрации информации и т. д. в таких областях, как поиск информации, мониторинг безопасности, медицинская информация и аэрокосмическая промышленность [1; 2; 3]. Поэтому эффективное и точное разделение изображений на соответствующие категории было в центре внимания многих исследований.

Исследования технологий классификации изображений в основном сосредоточены на возможных подходах к процессу проведения классификации. Основываясь на концепции дизайна классификаторов, классификацию изображений можно разделить на два подхода: первый сформирован на генеративной модели, а второй – на дискриминантном анализе. Классификационный подход, основанный на генеративной модели, базируется на совместном распределении вероятностей функций изображения и категорий иллюстраций. Самый простой подход к классификации изображений, основанный на генеративной модели, – это байесовская модель. Авторы статьи представили линейные дискриминантные функции Байеса и применили их для проведения классификации изображений [4]. Для улучшения извлечения изображений может использоваться метод Simple Bayesian classifier, предназначенный для выполнения семантической классификации ресурсов изображений [5].

Наиболее распространенным подходом к классификации изображений, основанном на применении генеративной модели, является подход модели на основе смеси Гаусса (GMM). Также возможен метод иерархической классификации изображений путем моделирования функций изображения [6]. При данном подходе выполняется классификация на разных уровнях для набора данных изображения праздничных предметов, а затем практикуется моделирование смеси Гаусса для каждого класса, для достижения всей классификации изображений отдыха. При широком применении модели суммирования слов в полях изображений различные типы тематических моделей стали широко использоваться для классификации изображений. Одной из наиболее распространенных моделей является вероятностный латентный семантический анализ (PLSA), представляющий изображение как набор визуальных слов с использованием модели суммирования слов, рассматривает категорию изображения как потенциальную тему, а затем находит распределение скрытых семантика путем анализа.

Модель PLSA впервые была предложена для обработки документов и предназначалась для обработки дискретной текстовой информации. Чтобы адаптировать эту модель к данным изображения, предложен подход моделирования распределения визуальных

элементов слова с использованием распределения непрерывных локальных векторов признаков [7]. Эксперименты показали, что этот метод превосходит традиционную дискретную визуальную модель элемента слов. Поскольку подход к классификации изображений, основанный на генеративной модели, выражает распределение данных с точки зрения статистики и может отражать сходство аналогичных данных, то возможности его расширения позволяют получать хорошие результаты в случае большего количества данных выборки или неполной информации данных [8; 9; 10; 11; 12]. Стоит отметить, что применяемая модель напрямую определяет сложность алгоритма.

В настоящее время существуют многочисленные исследования модели MapReduce, и только несколько исследований посвящены классификации изображений непосредственно с использованием модели MapReduce [13].

Ввиду проблем, описанных выше, в этой статье предлагается оценить параллельный алгоритм нейронной сети Adaboost-BP для классификации больших наборов данных изображений. Этот алгоритм является параллельной версией традиционного алгоритма нейронной сети Adaboost-BP, который в полной мере использует модель параллельного программирования MapReduce и устанавливает модель для массовой классификации изображений. Реализация этого алгоритма эффективно улучшает временные характеристики и точность классификации изображений, используя методы распределенной параллельной обработки.

Материалы и методы

С целью эффективности предложенного подхода авторы реализовали прототип системы классификации изображений с использованием языка программирования C#. Автоматизированная система проводит классификацию изображений по классам, определенным наборами данных Pascal VOC2007, Caltech256 или SUN, в соответствии с моделью классификации, изображенной на рисунке 1. Кроме того, для проверки работоспособности предложенного алгоритма были проведены экспериментальные исследования, позволяющие выполнить сравнения с известными методами, оценить точность классификации, время выполнения, ускорение и увеличение масштаба.

Основываясь на наборах данных Pascal VOC2007, Caltech256 и SUN, традиционном случайном лесе (RF), машине опорных векторов (SVM), алгоритме нейронной сети Adaboost-BP30, алгоритме параллельной нейронной сети BP29, параллельный алгоритм нейроной сети Adaboost-BP, предложенный в этом исследовании, сравнивался с точки зрения их коэффициентов точности классификации [14; 15; 16].

Для дальнейшей проверки эффективности предложенного подхода время обучения, требуемое алгоритмом

нейронной сети RF, SVM, Adaboost-BP, оказалось намного длиннее, чем при реализации двух параллельных алгоритмов. Это объясняется тем, что два параллельных алгоритма основываются на технологии распределенной параллельной обработки, тогда как RF, SVM, алгоритм нейронной сети Adaboost-BP используют одноузловую архитектуру с ограниченной вычислительной мощностью [1; 17].

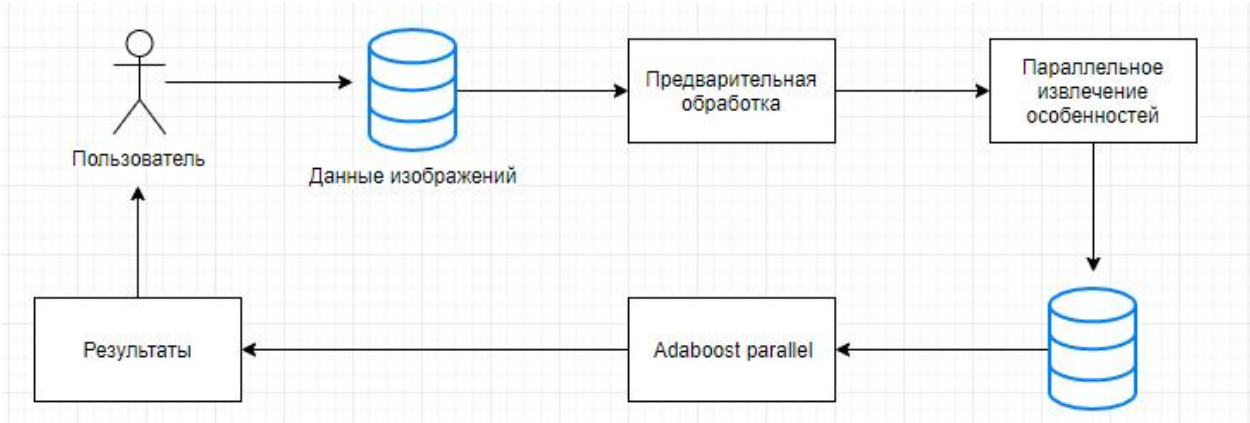

Рис. 1. Цикл работы алгоритмы

Fig. 1. Cycle of algorithm work

Для модели параллельного программирования, основанной на MapReduce, осуществлялась оценка производительности предложенного алгоритма с точки зрения ускорения, увеличения и масштабирования.

При этом ускорение рассматривалось как отношение времени, необходимого для выполнения задачи на одном вычислительном узле, ко времени, которое требуется для выполнения той же задачи с использованием нескольких вычислительных узлах [18; 19; 20]. Чтобы измерить ускорение, проведена фиксация размера набора данных при увеличении количества используемых узловых компьютеров (например, от одного узла до четырех узлов). Кроме того, было использовано различное количество изображений: 1000, 5000 и 20000.

Результаты и их обсуждение

Тестирование алгоритма производилось на кластере из четырех узлов. Каждый узел содержал два шестиядерных процессора Intel Xeon Processor E5-2620 и 500 Gb оперативной памяти.

В таблице 1 приведено сравнение точности классификации испытанных классификационных подходов, основанных на 20 категориях из набора данных Pascal VOC2007. Анализ данных таблицы 1 свидетельствует о том, что эффективность подхода к классификации, предложенного в этом исследовании, является более точной, чем у других методов.

Таблица 1. Различная точность классификации для различных подходов на наборе Pascal VOC2007

Table 1. Different classification accuracy for different approaches on the Pascal VOC2007 dataset

Категория	RF	SVM	Adaboost-BP	Parallel BP	Цель
Самолет	82,6	83,1	83.2	89,8	93,8
Велосипед	81	80,2	79,8	87,7	90,1
Птица	77,9	77,3	78,4	86,5	92,9
Лодка	78.2	79,9	80,5	86,9	93,1
Автобус	71,7	72,9	73,1	62,6	74,2
Кот	82,0	81,1	83,6	90,1	95,6
Стул	64,9	65,2	65,8	72,5	84,1
Корова	67,1	66,1	67,0	73,9	87,6
Собака	83,9	83,7	84,7	90,5	97,7
Лошадь	81,7	81,6	82,4	90,6	96,1
TV	74,4	74,3	74,8	83,7	88,3
Отклонение	9,266	9,43	9,213	8,419	6,517

Установлено, что по сравнению с традиционным алгоритмом нейронных сетей RF, SVM и Adaboost-BP предложенный подход позволил повысить точность классификации на 15,1%, 15,0% и 10,0% соответственно. При этом по сравнению с параллельным алгоритмом нейронной сети BP точность классификации увеличилась на 6,4%. Принимая во внимание тот факт, что все шесть методов разработаны на основе дискриминантной модели, полученная точность классификации традиционного алгоритма RF, SVM и нейроной сети Adaboost-BP на основе автономной архитектуры оказалась значительно ниже. Однако результаты работы параллельного алгоритма нейронной сети BP и алгоритма на основе предлагаемого подхода, основанного на модели параллельного программирования MapReduce, характеризуются лучшими показателями точности классификации. При этом точность классификации предложенного подхода оказалось выше, чем сообщенная для алгоритма параллельной нейронной сети BP, в связи с использованием комбинирования выходов нейронных сетей 15BP. Следовательно, предлагаемый подход приводит к наименьшему стандартному отклонению, при этом установлено, что колебания значений данных выборки влияют на него меньше всего; следовательно, что использование этого подхода позволяет получить лучшие результаты классификации в проведенных экспериментах.

В таблице 2 приведено сравнение средней точности классификации проверенных подходов классификации на основе приблизительно 30 000 изображений из наборов данных Caltech256 и SUN.

Таблица 2. Средняя точность различных подходов на Caltech256 и SUN

Table 2. The average accuracy of different approaches on Caltech256 and SUN

Набор данных	Алгоритм	Min, %	Max, %	Средняя точность, %
Caltech256 dataset	RF	52,9	67,1	60,2
	SVM	50,7	70,9	59,8
	Adaboost-BP	53,2	70,7	59,7
	Parallel BP	61,3	85,5	79,2
	The proposed approach	81,7	96,4	85,9
SUN dataset	RF	55,1	69,4	62,3
	SVM	53,9	71,3	61,2
	Adaboost-BP	54,5	72,1	62,8
	Parallel BP	73,9	91,3	81,7
	The proposed approach	82,5	95,4	88,6

Установлено, что средняя точность классификации традиционного алгоритма RF, SVM и Adaboost-BP и других уменьшается на 14,5%, 14,3%, 14,6% и 10,7% соответственно. Для набора данных SUN средняя точность классификации уменьшается на 12,7%, 12,3%, 11,5% и 6,9% соответственно, но точность алгоритма параллельной нейронной сети BP и предлагаемого подхода снижается только на 4,3% и 3,1%, 0,9%, 0,2% – в случае набора данных Caltech256 и набора данных SUN соответственно. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что производительность классификации традиционных алгоритмов, основанных на автономной архитектуре, будет продолжать снижаться по мере увеличения объема данных. Стоит отметить, что эффективность классификации предложенного алгоритма, основанного на модели MapReduce, снижается незначительно, поскольку применяется прикладная распределенная архитектура параллельной обработки, в которой большие объемы данных обрабатываются с использованием большей вычислительной мощности классификационных узлов.

В таблице 3 приведены результаты точности классификации на основе различных подходов к классификации с различным количеством изображений, при этом число изображений в каждой категории увеличивается с 5 до 200.

Следует отметить, что увеличение количества категорий мало влияет на классификационную точность (за ис-

ключением традиционных алгоритмов нейронных сетей RF, SVM и Adaboost-BP) при использовании менее 5000 изображений.

Таблица 3. Точность различных подходов в зависимости от количества изображений

Table 3. Accuracy of different approaches depending on the number of images

Алгоритм	500	1000	2000	5000	10000	20000
RF	9,015	11,369	14,945	17,123	20,147	22,013
SVM	9,187	11,023	14,365	16,785	17,985	20,112
Adaboost-BP	9,165	9,842	12,945	14,842	18,134	20,674
Parallel BP	1,459	2,695	5,4213	8,644	12,192	16,412
Parallel Adaboost-BP	0,554	1,613	1,751	6,562	7,236	10,756

Установлено, что если количество изображений превышает 5000, то увеличение количества категорий изображений оказывает значительное влияние на точность классификации, особенно на алгоритмы, основанные на архитектуре с одним узлом, такие как традиционный алгоритм RF, SVM, алгоритм нейронной сети Adaboost-BP.

Следовательно, с увеличением количества изображений точность классификации в параллельных алгоритмах снижается. Этот вывод характерен для параллельного алгоритма Adaboost-BP, предложенного в этом исследовании, что в основном связано с построением сильного классификатора, хотя классификационная точность всех подходов классификации снижается.

Более того, точность классификации различных подходов почти одинакова с менее чем 2000 изображений, но они все больше расходятся в точности классификации (особенно традиционный алгоритм нейронной сети RF, SVM, Adaboost-BP), так как количество изображений превышает 2000. Кроме того, по мере увеличения количества категорий изображений кривые снижения точности классификации для двух параллельных алгоритмов становятся мягкими по мере увеличения количества изображений. Этот результат указывает на то, что увеличение количества изображений мало влияет на производительность классификации параллельных алгоритмов на основе MapReduce и дополнительно иллюстрирует преимущества распределенной параллельной обработки, которые еще более очевидны в подходе, предложенном в этом исследовании.

Результаты тестирования ускорения показаны на рисунке 2.

В идеальных условиях ускорение будет расти линейно по мере увеличения числа вычислительных узлов. Однако, поскольку на условия могут влиять балансировка нагрузки, накладные расходы на связь и другие факторы, ускоре-

ние не увеличивается линейно [21]. Мы находим, что параллельный алгоритм нейронной сети Adaboost-BP, предложенный в этом исследовании, имеет лучшие показатели ускорения. Максимальное значение ускорения может достигать приблизительно 3,8 при использовании четырех компьютеров подчиненных узлов. Более того, с увеличением количества изображений увеличивается и скорость. Это происходит главным образом потому, что время на обработку небольшого количества изображений не является значительным по сравнению со временем, затрачиваемым на связь и организацию задач; однако интенсивное вычисление изображения становится доминирующим с увеличением количества изображений, и, таким образом, ускорение также увеличивается.

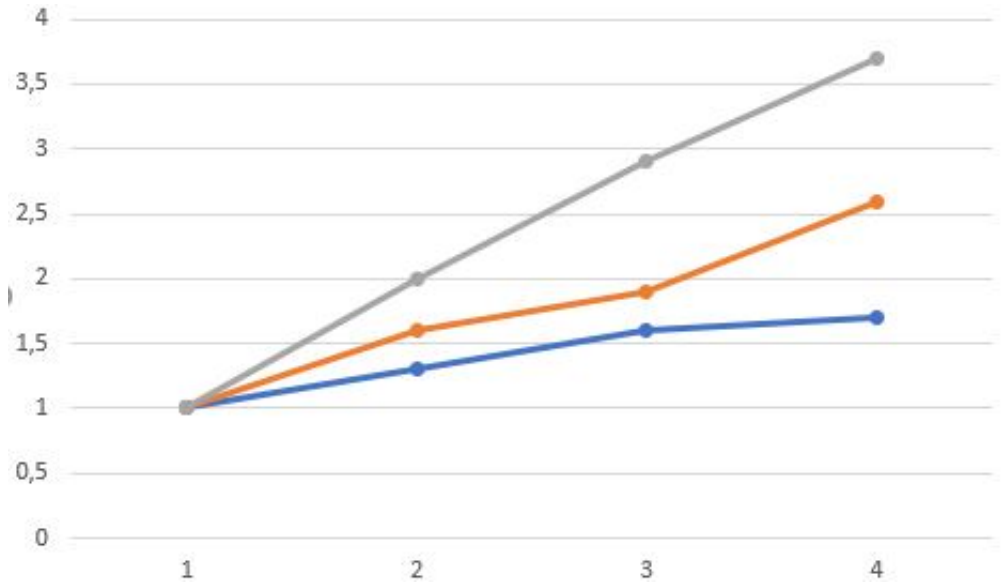

Рис. 2. Сравнение ускорения

Fig. 2. Acceliration compare

Следует отметить важный аспект, когда число изображений превышает 20000, то ускорение изменяется почти линейно. Поэтому предлагаемый алгоритм подходит для эффективной обработки больших наборов данных.

Размер определяется как дополнительное время, необходимое данной системе, так как количество изображений становится в m раз больше, чем исходное количество изображений. Другими словами, чем больше число изображений, тем выше количество данных и тем дольше система кластеров будет обрабатывать их.

Чтобы измерить размер, мы фиксируем число подчиненных узлов на 1, 2, 3 или 4, увеличивая количество изображений с 1000 до 20000 изображений для каждого узла. Рисунок 3 показывает результаты эксперимента. При увеличении количества изображений с 1000 до 20 000 размер системы с 1 узлом увеличивается примерно на 2,5, а для системы с 4 узлами он увеличивается

только на 1,5, поскольку время связи 1 узловая система меньше, чем у 4-узловой системы, но время связи в предлагаемом параллельном алгоритме нейронной сети Adaboost-BP не увеличивается, так как количество изображений увеличивается. Следовательно, предложенный алгоритм в этом исследовании имеет хорошие показатели производительности.

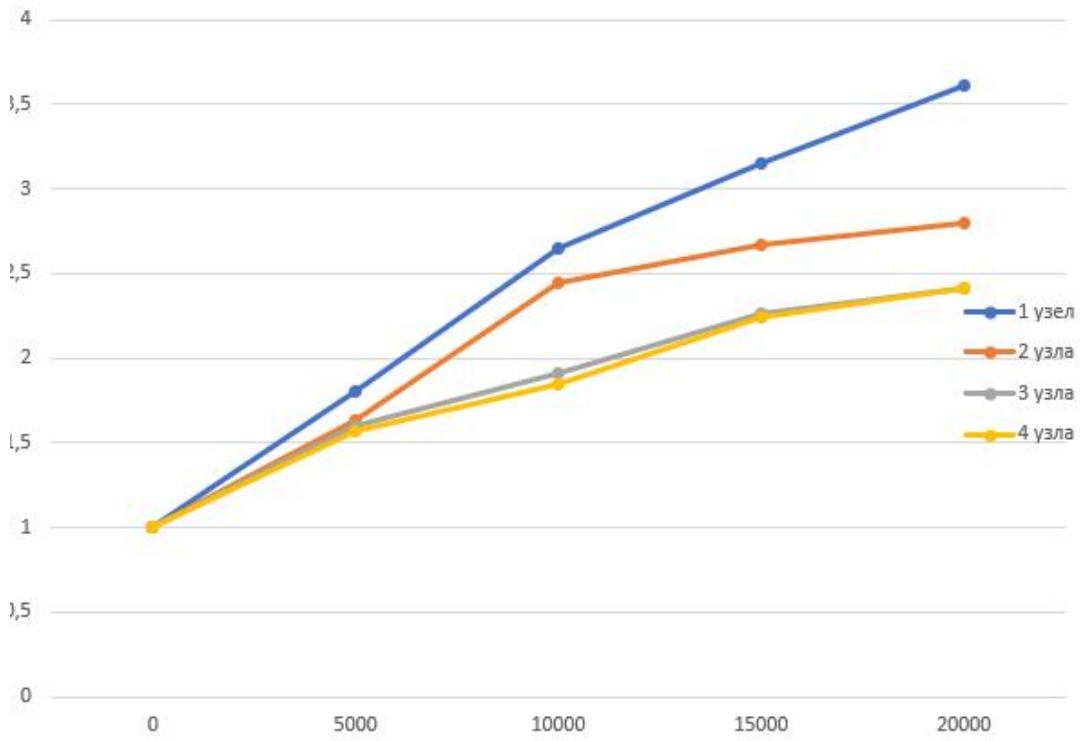

Рис. 3. Сравнение масштабируемости

Fig. 3. Acceliration scalability

Под масштабированием понимается способность системы в миллион раз больше выполнять работу в миллион раз больше за то же время, что и в исходной системе [22]. Мера масштабирования используется для оценки способности алгоритма адаптироваться как к росту системы, так и к увеличению количества изображений. Очевидно, что более высокое значение масштабирования указывает на лучшую производительность алгоритма. Таким образом, масштабирование проверяет, насколько хорошо алгоритм обрабатывает большее количество изображений, когда доступно больше узловых компьютеров.

Классификация изображений – это сложный и трудоемкий процесс, требующий пространства и времени для выбора, выделения, идентификации элементов и создания модели классификации. Стремительное развитие технологий информационных сетей сегодня означает, что становится доступным все большее число изображений, что намного превышает возможности тра-

диционных алгоритмов классификации эффективно использовать эти изображения, если время их расчета резко не сократится. Платформа Hadoop с открытым исходным кодом и распределенными вычислениями получила широкое распространение, поскольку создавать кластеры Hadoop удобно и недорого, а платформа имеет простую и удобную в использовании вычислительную модель [23]. Академический и промышленный мир постоянно изучают способы адаптации традиционных алгоритмов и приложений, разработанных для сред с одним компьютером или мэйнфреймом, к кластерной среде Hadoop.

В этом исследовании был предложен параллельный алгоритм нейронной сети Adaboost-BP на основе MapReduce для массивных классификаций наборов данных изображений. Кроме того, он провел углубленное исследование и анализ параллельного проектирования и реализации алгоритма нейронной сети Adaboost-BP. Были исследованы следующие три темы: построение строгого классификатора с использованием алгоритма Adaboost, параллельное проектирование и реализация алгоритма нейронной сети Adaboost-BP, а также быстрая и точная автоматическая классификация массивных наборов данных изображений с использованием платформы Hadoop. Завершенная реализация была протестирована с данными изображений из наборов данных Pascal VOC2007, Caltech256 и SUN. Результаты эксперимента подтверждают, что предложенный алгоритм не только может обрабатывать крупномасштабные наборы данных, но также очень хорошо масштабируется с точки зрения показателей оценки ускорения. Основным ограничением подхода является особенность подхода MapReduce. При запуске задач параллельно отсутствует возможность обмена данными между процессами, которая может быть необходима для ряда задач. Так же простота подхода сказывается на правильном разделении ответственности между двумя процессами. Это дает невозможность добавить дополнительную логику, отличную от Map или Reduce.

Стоит отметить ряд недостатков, которые могут проявляться в ряде задач.

Данное решение с большой долей вероятности будет менее эффективно, чем специализированное решение для задачи.

Метод эффективен при наличии достаточного уровня параллельности в задаче.

Как следствие предыдущего пункта, метод требователен к количеству издержек на сетевое взаимодействие.

Выводы

Результаты эксперимента показывают, что алгоритм, предложенный в этом исследовании, обеспечивает хорошее распараллеливание, которое может в полной мере использовать ресурсы распределенной системы для повышения

эффективности классификации алгоритма. Кроме того, распределенная параллельная система на основе MapReduce значительно улучшила производительность по сравнению с традиционными архитектурами алгоритмов с одним узлом и полностью демонстрирует мощные вычислительные возможности параллельной обработки. Поскольку параллельное проектирование и реализация алгоритмов являются новой и актуальной темой исследования, в нашей будущей работе мы намереваемся изучить разработку оптимизированных задач Map и Reduce для модели параллельного программирования MapReduce.

Список литературы

1. Alekseev A., Rozaliev V., Orlova Y. Automatization colorize grayscale images based intelligent scene analysis // 11th International Conference of Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-11-2013), September 23-28, 2013. Vol. I. P. 151–154.

2. Томакова Р. А. Метод обработки сложносегментируемых изображений с использованием многослойных морфологических операторов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-2. С. 158-164.

3. Многослойные морфологические операторы для сегментации сложноструктурируемых растровых полутоновых изображений / С. А. Филист, А. Р. Дабагов, Р. А. Томакова [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 3(32). С. 44-63.

4. Fernández-Delgado M., Cernadas E., Barro S., Amorim D. Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems? // J. Mach. Learn. Res. 2014. No. 15. P. 3133–3181.

5. Ducinskas K., Stabingiene L., Stabingis G. Application of Bayes linear discriminant functions in image classification // Pattern Recognition Letters. 2012. No. 33. P. 278–282.

6. Gao T., Li G., Hou J. Retrieving image resource technique based on bayes semantic classification and visual feature extraction // J. Inter. Tech. 2013. No. 14. P. 929–934.

7. Image classification for content-based indexing / A. Vailaya [et al.] // IEEE Transactions on Image Processing. 2001. Vol. 10. P. 117–130.

8. Han K., Yu D., Tashev I. Speech Emotion Recognition Using Deep Neural Network and Extreme Learning Machine // Proc. of Interspeech. 2014. P. 223–227.

9. Horster E., Lienhart R., Slaney M. Continuous visual vocabulary models for PLSA-based scene recognition // Proceedings of ACM International Conference on Image and Video Retrieval. 2008. P. 319–328.

10. Ulrich-Lai Y. M, Herman J. P. Neural regulation of endocrine and autonomic stress responses // Nat Rev Neurosci. 2009. No. 10. P. 397–409.

11. Two-stage segmentation method for context-sensitive image analysis / A. V. Alekseev, Y. A. Orlova, V. L. Rozaliev, A. V. Zaboleeva-Zotova // JCKBSE. CCIS, 2014. Vol. 466. P. 331–340. DOI: 10.1007/978-3-319-11854-3_28.

12. Image classification based on mixed deep learning model transfer learning / X. B. Shi, X. J. Fang, D. Y. Zhang, Z. Q. J. Guo // System Simu. 2016. No. 28. P. 167–182.

13. Feng S., Xu D. Transductive multi-instance multi-lable learning algorithm with application to automatic image annotation // The Journal of Expert Systems with Applications. 2010. No. 37. P. 661–670.

14. Topouzelis K., Psyllos A. Oil spill feature selection and classification using decision tree forest on SAR image data // ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing. 2012. No. 68. P. 135–143.

15. Schuller B., Rigoll G., Lang M. Hidden Markov Model-based Speech Emotion Recognition // Proc. of the IEEE ICASSP. 2003. P. 401–404.

16. Research and application of Object-oriented remote sensing image classification based on decision tree / P. Dou, L. Zhai, H. Y. Sang, W. H. Xie // Proceedings of the 2013 The International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. 2013. No. 31. P. 26–28.

17. The Method for Searching Emotional Content in Images Based on Low-Level Parameters with Using Neural Networks / V. Rozaliev, R. I. Gushchin, Yu. A. Orlova, A. V. Zaboleeva-Zotova, V. L. Berdnik // 9th Annual International Conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA 2018), Prague, Czech Republic, 22-24 August 2018 / ed. by A. Samsonovich. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019. P. 260-265. DOI: 10.1007/978-3-319-99316-4_34.

18. General Approach to the Synthesis of Emotional Semantic Information from the Video / V. L. Rozaliev, Yu. A. Orlova, R. I. Gushchin, V. V. Verichev // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Second Conference, CIT&DS 2017 (Volgograd, Russia, September 12-14, 2017): Proceedings / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, Peter Groumpos. Springer International Publishing AG, 2017. P. 201-214.

19. Hochberg J., Brooks V. Pictorial recognition as an unlearned ability: A study of one child's performance // The American Journal of Psychology. 1962. Vol. 75, no. 4. P. 624–628.

20. Liang L. A., Yang M. H., Li Y. F. Hyperspectral remote sensing image classification based on ICA and SVM algorithm // Spectroscopy and Spectral Analysis. 2010. No. 30. P. 2724–2728.

21. Detailed analysis of postures and gestures for the identification of human emotional reactions / V. L. Rozaliev, A. S. Bobkov, Y. A. Orlova, A. V. Zaboleeva-Zotova, A. S. Dmitriev // World Appl. Sci. J. 2013. No. 24(24). P. 151–158.

22. Kuruvilla J., Gunavathi K. Lung cancer classification using neural networks for CT images // Comput. Methods Programs Biomed. 2014. No. 113. P. 202–209.

23. Han M., Zhu X. R., Yao W. Remote sensing image classification based on neural network ensemble algorithm // Neurocomputing. 2012. No. 78. P. 133–138.

Reference

1. Alekseev A., Rozaliev V., Orlova Y. Automatization colorize grayscale images based intelligent scene analysis. 11th International Conference of Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-11-2013), September 23-28, 2013, vol. I, pp. 151–154.

2. Tomakova R. A. Metod obrabotki slozhnosegmentiruemykh izobrazhenii s ispol'zovaniem mnogosloinykh morfologicheskikh operatorov [method for processing complex segmented images using multilayer morphological operators]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2012, no. 2-2, pp. 158-164. (In Russ.)

3. Filist S. A., Dabagov A. R., Tomakova R. A., eds. Mnogosloinye morfologicheskie operatory dlya segmentatsii slozhnostrukturiruemykh rastrovykh polutonovykh izobrazhenii [multi-layer morphological operators for segmentation of complex-structured raster halftone images]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 3(32), pp. 44-63. (In Russ.)

4. Fernández-Delgado M., Cernadas E., Barro S., Amorim D. Do we need hundreds of classifiers to solve real world classification problems? *J. Mach. Learn. Res*, 2014, no. 15, pp. 3133–3181.

5. Ducinskas K., Stabingiene L., Stabingis G. Application of Bayes linear discriminant functions in image classification. *Pattern Recognition Letters*, 2012, no. 33, pp. 278–282.

6. Gao T., Li G., Hou J. Retrieving image resource technique based on bayes semantic classification and visual feature extraction. *J. Inter. Tech*., 2013, no. 14, pp. 929–934.

7. Vailaya A., eds. Image classification for content-based indexing. IEEE Transactions on Image Processing 10, 2001, pp. 117–130.

8. Han K., Yu D., Tashev I. Speech Emotion Recognition Using Deep Neural Network and Extreme Learning Machine. Proc of Interspeech, 2014, pp. 223–227.

9. Horster E., Lienhart R., Slaney M. Continuous visual vocabulary models for PLSA-based scene recognition. Proceedings of ACM International Conference on Image and Video Retrieval, 2008, pp. 319–328.

10. Ulrich-Lai Y. M, Herman J. P. Neural regulation of endocrine and autonomic stress responses. *Nat Rev Neurosci*, 2009, no. 10, pp. 397–409.

11. Alekseev A. V., Orlova Y. A., Rozaliev V. L., Zaboleeva-Zotova A. V. Two-stage segmentation method for context-sensitive image analysis. JCKBSE. CCIS, 2014, vol. 466, pp. 331–340. doi: 10.1007/978-3-319-11854-3_28

12. Shi X. B., Fang X. J., Zhang D. Y., Guo Z. Q. *J.* Image classification based on mixed deep learning model transfer learning. *System Simu*, 2016, no. 28, pp. 167–182.

13. Feng S., Xu D. Transductive multi-instance multi-lable learning algorithm with application to automatic image annotation. *Journal of Expert Systems with Applications*, 2010, no. 37, pp. 661–670.

14. Topouzelis K., Psyllos A. Oil spill feature selection and classification using decision tree forest on SAR image data. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing*, 2012, no. 68, pp. 135–143.

15. Schuller B., Rigoll G, Lang M. Hidden Markov Model-based Speech Emotion Recognition. Proc of the IEEE ICASSP, 2003, pp. 401–404.

16. Dou P., Zhai L., Sang H. Y., Xie W. H. Research and application of Object-oriented remote sensing image classification based on decision tree. Proceedings of the 2013 The International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, 2013, no. 31, pp. 26–28.

17. Rozaliev V., Gushchin R. I., Orlova Yu. A., Zaboleeva-Zotova A. V., Berdnik V. L. The Method for Searching Emotional Content in Images Based on Low-Level Parameters with Using Neural Networks. 9th Annual International Conference on Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA 2018), Prague, Czech Republic, 22-24 August 2018; ed. by A. Samsonovich. Cham, Springer Nature Switzerland AG, 2019, pp. 260-265. doi: 10.1007/978-3-319-99316-4_34

18. Rozaliev V. L., Orlova Yu. A., Gushchin R. I., Verichev V. V. General Approach to the Synthesis of Emotional Semantic Information from the Video. Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Second Conference, CIT&DS 2017 (Volgograd, Russia, September 12-14, 2017): Proceedings; ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, Peter Groumpos. Springer International Publishing AG, 2017, pp. 201-214.

19. Hochberg J., Brooks V. Pictorial recognition as an unlearned ability: A study of one child's performance. *The American Journal of Psychology*, 1962, vol. 75, no. 4, pp. 624–628.

20. Liang L. A., Yang M. H., Li Y. F. Hyperspectral remote sensing image classification based on ICA and SVM algorithm. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, no. 30, pp. 2724–2728.

21. Rozaliev V. L., Bobkov A. S., Orlova Y. A., Zaboleeva-Zotova A. V., Dmitriev A. S. Detailed analysis of postures and gestures for the identification of human emotional reactions. *World Appl. Sci. J.*, 2013, no. 24(24), pp. 151–158.

22. Kuruvilla J., Gunavathi K. Lung cancer classification using neural networks for CT images. *Comput. Methods Programs Biomed*, 2014, no. 113, pp. 202–209.

23. Han M., Zhu X. R., Yao W. Remote sensing image classification based on neural network ensemble algorithm. *Neurocomputing*, 2012, no. 78, pp. 133–138.

Информация об авторах / Information about the Authors

Орлова Юлия Александровна, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой «Программное обеспечение автоматизированных систем», Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация
e-mail: yulia.orlova@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4854-7462

Yulia A. Orlova, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Department "Software Engineering", Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation
e-mail: yulia.orlova@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4854-7462

Гущин Роман Игоревич, аспирант кафедры «Программное обеспечение автоматизированных систем», Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация
e-mail: poas@vstu.ru

Roman I. Guschin, Post-Graduate Student of Software Engineering Department, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation
e-mail: poas@vstu.ru

Розалиев Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования и поискового конструирования», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация
e-mail: vladimir.rozaliev@gmail.com

Vladimir L. Rozaliev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department "Computer aided design and search engine design systems", Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation
e-mail: vladimir.rozaliev@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.396.933

Современные направления развития систем диагностики и прогностики технического состояния перспективных летательных аппаратов

Д. С. Коптев[1] ✉, И. Е. Мухин[1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Резюме

Целью исследования *является предложение апробированной стратегии развития систем диагностики и прогностики технического состояния перспективных летательных аппаратов на примере вертолетов, показавшей свою эффективность при осуществлении мониторинга параметров авиационных комплексов у таких производителей авионики, как АО «Авиаавтоматика» им. В. В. Тарасова», г. Курск.*

Методы. *Решение задач диагностики и прогностики сложных авиационных комплексов в условиях постоянно повышающейся сложности летательных аппаратов и средств их автоматизации требует соответствующего увеличения функциональных возможностей средств контроля технического состояния, а также учёта всего многообразия связей системы «авиационный комплекс – система диагностики». В качестве базового метода исследования выбран системный подход, сущность которого заключается в поэтапном выполнении процедур синтеза систем диагностики и прогностики технического состояния авиационного комплекса, начиная с процедуры структурного синтеза и заканчивая параметрическим синтезом и разработкой опытного образца.*

Результаты. *Состав датчиков для диагностического контроля узлов и агрегатов вертолёта определяется после анализа необходимых и достаточных параметров для контроля в реальном масштабе времени основных групп и узлов вертолёта. Этапы проектирования систем диагностики и прогностики должны включать в себя имитационное и полунатурное моделирование. На основе результатов полунатурного моделирования уточняются характеристики и алгоритмы контроля. После этого проводятся исследования в области подтверждения достоверности результатов диагностического контроля и тем самым даётся оценка эффективности системы диагностики и прогностики технического состояния авиационного комплекса в целом.*

Заключение. *На сегодняшний день наблюдается противоречие между постоянно растущей потребностью повышения степени функциональной насыщенности средств диагностики и прогностики текущего состояния летательных аппаратов (ЛА) и ограниченными техническими возможностями подобных средств. Указанное противоречие ещё более обостряется вследствие постоянно повышающейся сложности летательных аппаратов и средств их автоматизации, что требует соответствующего увеличения функциональных возможностей средств контроля технического состояния. Всё это приводит к неоправданному увеличению массогабаритных показателей диагностических средств, что существенно отражается на технико-экономических показателях при эксплуатации летательных аппаратов.*

© Коптев Д. С., Мухин И. Е., 2020

Базовой концепцией создания систем диагностики и прогностики является разделение функций этой системы на бортовую и наземные компоненты.
Целью бортовой компоненты является обеспечение обработки в реальном масштабе времени ограниченного объёма полётной информации непосредственно в процессе полёта с интерактивной выдачей результатов об опасном техническом состоянии ЛА как экипажу, так и в виде специальных сигналов на Землю. Наземная компонента должна обеспечивать обработку массива информации за несколько полётов и производить в отложенном масштабе времени прогноз технического состояния ЛА.
В целях максимальной унификации полученных результатов необходимо разработать обобщённый алгоритм диагностики и долговременного прогнозирования технического состояния ЛА. В данной статье предложена апробированная стратегия разработки систем диагностики и прогностики технического состояния перспективных летательных аппаратов на примере вертолетов, указана последовательность этапов разработки систем диагностики и прогностики, а также приведены математические выражения, решение которых позволяет диагностировать состояние некорректной работы или отказа авиационного комплекса.

***Ключевые слова**: система диагностики и прогностики; вертолёт; авиационный комплекс; параметрический синтез; вибродатчик; полунатурное моделирование.*

***Конфликт интересов**: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Коптев Д. С., Мухин И. Е. Современные направления развития систем диагностики и прогностики технического состояния перспективных летательных аппаратов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 94–113.

Поступила в редакцию 17.12.2019 *Подписана в печать 23.01.2020* *Опубликована 25.02.20*

Modern Directions for the Development of Diagnostic Systems and Forecasting the Technical Condition of Prospective Aircraft

Dmitry S. Koptev[1] ✉, Ivan E. Mukhin[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str., 94, Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Abstract

***Purpose of research** is to offer an approved strategy for the development of diagnostics and forecasting systems for the technical condition of promising aircraft using helicopters as an example, which has been shown to be effective in monitoring the parameters of aircraft systems at such avionics manufacturers as «JSC Aviaavtomatika named after V. V. Tarasova», Kursk.*
***Methods.** The solution of the problems of diagnostics and prognostics of complex aviation systems in the conditions of the ever-increasing complexity of aircraft and their automation requires a corresponding increase in the functionality of the means for monitoring the technical condition, as well as taking into account the whole variety of connections of the "aviation complex - diagnostic system" system. As a basic research method, a systematic approach was chosen, the essence of which is the phased implementation of synthesis procedures for diagnostic*

systems and prognostics of the technical condition of the aviation complex, starting with the structural synthesis procedure and ending with parametric synthesis and prototype development.

Results. *The composition of the sensors for the diagnostic control of helicopter components and assemblies is determined after analysis of the necessary and sufficient parameters for real-time monitoring of the main groups and components of the helicopter. The stages of designing diagnostic and prognostic systems should include simulation and semi-natural modeling. Based on the results of the semi-natural modeling, the characteristics and control algorithms are refined. After that, studies are carried out in the field of confirming the reliability of the results of diagnostic control and thereby assesses the effectiveness of the diagnostic system and prognostics of the technical condition of the aviation complex as a whole.*

Conclusions. *Today, there is a contradiction between the ever-growing need to increase the degree of functional saturation of diagnostic tools and prognostics of the current state of aircraft (LA) and the limited technical capabilities of such tools. This contradiction is even more aggravated due to the ever-increasing complexity of aircraft and their automation, which requires a corresponding increase in the functionality of the means of monitoring the technical condition. All this leads to an unjustified increase in the overall dimensions of the diagnostic tools, which significantly affects the technical and economic indicators during the operation of aircraft.*

The basic concept for creating diagnostic and forecasting systems is the separation of the functions of this system into airborne and ground-based components.

The purpose of the airborne component is to provide real-time processing of a limited amount of flight information directly during the flight, with interactive output of the dangerous technical condition of the aircraft to the crew, as well as in the form of special signals to the Earth. The ground component should provide for the processing of an array of information over several flights and produce a forecast of the technical condition of the aircraft in a delayed time scale.

In order to maximize the unification of the results, it is necessary to develop a generalized algorithm for the diagnosis and long-term forecasting of the technical condition of the aircraft.

This article proposes a proven strategy for developing diagnostic and forecasting systems for the technical condition of promising aircraft using helicopters as an example, shows the sequence of stages for developing diagnostic and forecasting systems, and also gives mathematical expressions, the solution of which allows diagnosing the state of incorrect operation or failure of the aircraft complex.

Keywords*: diagnostic and forecasting system; helicopter; aircraft complex; parametric synthesis; vibration sensor; full-scale simulation.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Koptev D. S., Mukhin I. E. Modern Directions for the Development of Diagnostic Systems and Forecasting the Technical Condition of Prospective Aircraft . *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(1): 94–113. (In Russ.)

Received 17.12.2019 *Accepted 23.01.2020* *Published 25.02.2020*

***

Введение

На сегодняшний день в современной гражданской и военной авиации произошел принципиально важный переход от раздельного проектирования планеров и узлов к проектированию авиационных комплексов (АК), представляющих единую сложную систему с множеством взаимообусловленных и взаимосвязанных целей. Это отличие в первую очередь связано с глубокой интеграцией комплексной системы управления самолетом, системой управления силовой установки и другими системами. Безусловно, такая сложная система нуждается в диагностике и проверке ра-

ботоспособности в реальном масштабе времени. Такая диагностическая система должна быть адекватной по степени сложности самому АК. В целях реализации функций диагностики, а в последующем и функций прогнозирования технического состояния АК на длительную перспективу в статье предложены методологические подходы к стратегии разработки подобных систем диагностики и прогностики технического состояния летательных аппаратов. Применение методов и средств, описанных в рамках предлагаемой в статье методологии, показало свою эффективность для осуществления мониторинга параметров авиационных комплексов у таких производителей авионики, как АО «Авиаавтоматика» им. В. В. Тарасова», г. Курск [1; 2].

Развитие современных летательных аппаратов гражданского и военного назначения характеризуется стремительным увеличением степени функциональной насыщенности, обусловленной расширением круга решаемых задач. В области военной авиации специфика этих задач обусловлена существенным расширением области боевого применения в условиях ведения противником активного противодействия. Это отличие в первую очередь связано с глубокой интеграцией комплексной системы управления летательного аппарата с системами управления силовой установки, системой управления вооружением, системой управления оружием и другими системами. Исходя из сложности и многообразия поставленных задач, решаемых уже не просто летательными аппаратами, а целыми авиационными комплексами, существенно возрастает их сложность [2].

Материалы и методы

В целях поддержания технической и боевой готовности АК с минимальными потерями на незапланированные простои назрела необходимость разработки адекватных авиационным комплексам по степени функциональной сложности систем диагностики и прогностики технического состояния АК. Традиционно эта задача решалась прямым способом, так называемым параметрическим синтезом без учета всего многообразия связей сложной системы «авиационный комплекс – система диагностики». Подобный подход на практике приводил либо к избыточности аппаратуры диагностики, либо к её недостаточной глубине контроля. Решение такой задачи в новых условиях является нетривиальным и должно основываться в первую очередь на концепции системного подхода. Сущность подхода заключается в поэтапном выполнении процедур синтеза систем диагностики и прогностики технического состояния авиационного комплекса, начиная с процедуры структурного синтеза и заканчивая параметрическим синтезом и разработкой опытного образца [2]. Этапы синтеза системы диагностики и прогностики представлены ниже (рис. 1).

Рис. 1. Этапы синтеза системы диагностики и прогностики

Fig. 1. Synthesis stages of the diagnostic and prognostic system

При этом цепочка структурного синтеза выглядит следующим образом: анализ диагностируемого объекта – разработка интегрального критерия эффективности применения системы контроля и диагностики – учет внешних и внутренних факторов – структурный синтез системы контроля и диагностики по критерию «эффективность – стоимость», то есть структура системы диагностики и прогностики должна быть такой, которая бы удовлетворяла условию достижение цели с вероятностью не ниже заданной при фиксированной цене затрат или наоборот. В математической постановке решение задачи структурного синтеза представлено выражением (1):

$$\max Э(i) = \\ = f(W_i, S_i, K_i, P_i, T_i, m_i, t_i) \Big| \; i = \overline{1, M}, \qquad (1)$$

где W_i – средние удельные потери времени из-за простоев АК и за счет несвоевременного обнаружения неисправностей при i-м варианте системы контроля;

S_i – средняя трудоемкость устранения отказов при i-м варианте системы контроля;

K_i – соотношение стоимости АК к стоимости системы контроля при i-м варианте системы контроля;

P_i – полнота контроля при i-м варианте системы контроля;

T_i – периодичность контроля при i-м варианте системы контроля;

m_i – масса системы контроля при i-м варианте системы контроля;

t_i – время контроля при i-м варианте системы контроля [2; 3; 4].

После структурного синтеза необходимо переходить к созданию инструментария диагностики, то есть параметрическому синтезу, результаты которого являются основой как для всей системы диагностики, так и для её программного обеспечения. По степени сложности система диагностики и прогностики является иерархической, позволяющей решать как относительно простые задачи порогового контроля, проводимые в процессе полёта, так и задачи сложного многофакторного корреляционного трендового анализа множества контролируемых параметров [1]. Структурная схема такой иерархиии с указанием решаемых задач приведена ниже (рис. 2).

Рис. 2. Иерархия видов диагностики и прогностики основных узлов и агрегатов вертолетов

Fig. 2. Hierarchy of types of diagnostics and forecasting of the main components and assemblies of helicopters

Необходимый и достаточный инструментарий системы диагностики и прогностики определяется в первую очередь перечнем датчиков диагностирования АК в рамках синтезированной структуры. Рассмотрим реализацию этого положения на основе одного из самых сложных АК с точки зрения механики – вертолетов.

Стратегия выбора необходимого и достаточного перечня датчиков при этом заключается в определении принадлеж-

ности систем АК к одной из четырех групп, условно разбитых по степени ответственности за безопасность полета. В первую группу должны входить агрегаты, визуальный осмотр которых не позволяет достоверно определить их техническое состояние, а отказ которых приводит к немедленному и полному нарушению работоспособности и безопасности полета (агрегаты либо отдельные узлы и детали трансмиссии, детали втулки и системы управления несущего и рулевого винтов, хвостовой вал). Ко второй группе относятся агрегаты, отказ которых мог бы привести к немедленному и полному нарушению работоспособности конструкции и безопасности полета, но имеется возможность раннего обнаружения предотказного состояния. К третьей группе относятся агрегаты, отказ которых приводит к частичной потере работоспособности конструкции и угрожает безопасности полета, но позволяет совершить вынужденную посадку без повреждения вертолета (элементы фюзеляжа, в том числе редукторная рама). К четвертой группе относятся агрегаты, отказ которых вызывает частичную потерю работоспособности вертолета с сохранением возможности продолжения полета, не влечет за собой быстрого отказа (разрушения) других агрегатов и позволяет обнаружить отказ при наземном осмотре (элементы фюзеляжа, стабилизатор и ряд аналогичных элементов конструкции).

Основными контролируемыми параметрами являются параметры напряженно-деформированного состояния планера вертолета, резонансные частоты основных узлов и агрегатов, амплитудно-частотный спектр трансмиссии вертолета. Следует отметит, что все эти параметры находятся в корреляционной связи с режимами полета, а также между собой [1; 2].

Установление таких корреляционных связей составляет одну из научно-технических задач по диагностике и прогностике технического состояния вертолетов. Многочисленными летными экспериментами установлено, что степень остаточного ресурса систем АК в существенной мере зависит от режимов полета. К таким режимам полета отнесены: руление, вертикальный взлет, вертикально-горизонтальный взлет, висение, горизонтальный полет, кабрирование, пикирование, форсаж, форсаж с разворотом, вертикальное снижение, снижение под углом к горизонту. Для каждого конкретного типа вертолета необходимо установить функциональную взаимосвязь снижения остаточного ресурса (или израсходованный ресурс) с временем налета и режимом полета. Математическая модель этой взаимосвязи должна быть заложена в алгоритм пересчета календарного израсходованного ресурса в реальный. Выполнение этого требования позволит проводить долговременную прогностику технического состояния основных узлов вертолета.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим концептуальные подходы к синтезу инструментария диагностики и прогностики технического состояния вертолета. Первым условием являет-

ся разработка подсистемы диагностирования напряженно-деформированных состояний планера вертолета. При этом необходимо придерживаться следующих принципов синтеза такой подсистемы:

1. Принцип последовательного процесса от исследования прочности конструкции к переходу диагностики технического состояния во время полета.

2. Реализации предварительной расстановки тензодатчиков, чтобы наиболее важные узлы были охвачены системой тензодатчиков.

3. Получение начального уровня при статических испытаниях напряженного состояния вертолета, который в дальнейшем должен рассматриваться как опорный.

4. Сравнение показаний тензодатчиков при контрольных полётах с опорными показаниями.

5. Сравнение результатов показаний тензодатчиков в полётах с расчётными.

6. Установка тензодатчиков в места со сложными и не вполне понятными распределениями напряжений.

7. Различие в показаниях тензодатчиков должно становиться объектом самого пристального внимания [2; 4].

Первоначальная расстановка тензодатчиков применительно к вертолету производится по следующим правилам:

– производится расстановка датчиков из общих соображений, а также в места, получившие наибольшие разрушения при статических испытаниях;

– добавляются места со сложным распределением напряжений;

– тензодатчики для фиксации нормальных и тангенциальных напряжений располагаются по отношению к строительной оси вертолета.

Расположение тензодатчиков на фрагменте планера вертолета приведено ниже (рис. 3).

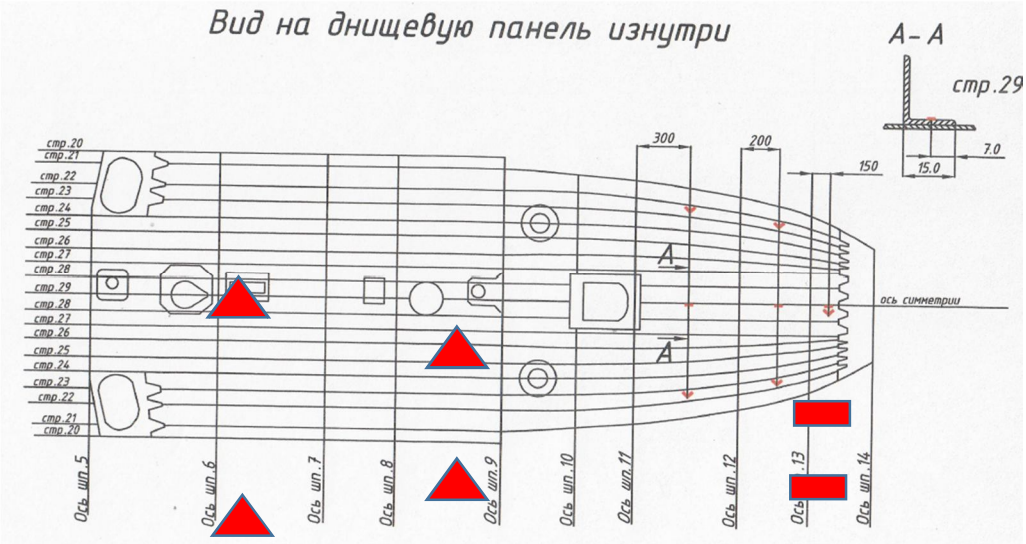

Рис. 3. Расположение тензодатчиков на фрагменте планера вертолета: тензодатчики для фиксации нормальных (отмечены треугольником) и тангенциальных (отмечены прямоугольником) напряжений по отношению к строительной оси вертолёта

Fig. 3. Location of load cells on a fragment of a helicopter glider: load cells for fixing normal (marked with a triangle) and tangential (marked with a rectangle) stresses in relation to the helicopter construction axis

В качестве тензодатчиков напряженно-деформируемого состояния планера целесообразно применять оптоволоконные датчики на основе брэгговских решеток (рис. 4).

Принцип их работы основан на преобразовании линейных изменений в изменение длины волны отраженного лазерного луча (рис. 5) [4; 5; 6].

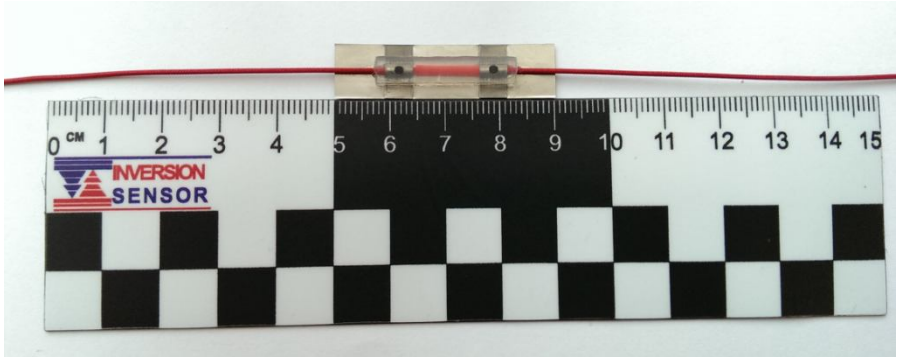

Рис. 4. Датчик Брэгга на оптоволокне

Fig. 4. Bragg sensor on fiber optic

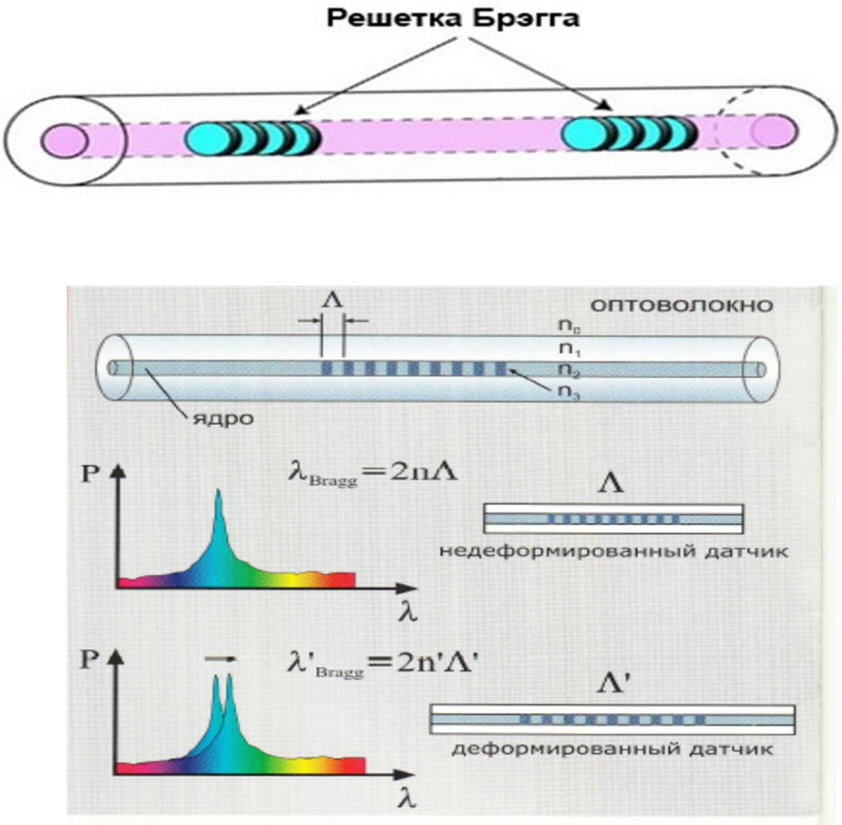

Рис. 5. Решётка Брэгга и иллюстрация принципа её работы

Fig. 5. Bragg grating and illustration of the principle of its work

Вторым непременным условием диагностики технического состояния является создание кинематической модели вертолета и определений математической модели спектра вибраций при износе или поломке элементов трансмиссии. Подходы к созданию такой модели заключаются в следующем. Например, периодическое изменение жесткости зубьев в трансмиссии и постоянная погрешность шага зацепления вызывают появление в спектре вибрации зубчатой передачи колебаний на зубцовой частоте и ее гармониках:

$$f_Z = z_1 \cdot f_1 = z_2 \cdot f_2, \qquad (2)$$

где f_1 и f_2 – частоты вращения сопряженных шестерен;

z_1 и z_2 – количество зубцов на колесах.

Переменная погрешность в шаге зацепления и нарушении соосности осей валов вызывают вибрацию на частотах вращения валов обоих шестерен на модуляционных частотах:

$$f_1^M = kf_z + nf_1 \quad \text{и} \quad f_2^M = kf_z + nf_2, \qquad (3)$$

где k, n $\subset 1, 2, ...$

Изменение в спектре вибраций трансмиссии вертолета относительно эталонной будет указывать на образование дефекта в конкретном месте трансмиссии.

Третьим условием является разработка подсистемы определения резонансных явлений в основных узлах и агрегатах вертолета на основе датчиков вибрации. Эта процедура выполнялась на основе модального анализа.

Основные узлы вертолета, которые подвергались модальному анализу, приведены в таблице.

Таблица. Основные узлы вертолёта, подвергаемые модальному анализу

Table. The main components of the helicopter subjected to modal analysis

№ эле-элемента	Наименование элемента
1	Главный редуктор
2	Двигатель левый
3	Двигатель правый
4	Угловой редуктор левый
5	Угловой редуктор правый
6	Вспомогательная силовая установка (ВСУ)
7	Опора (ВСУ)
8	Опора (шп1)
9	Опора (шп5)
10	Опора (шп9)
11	Промежуточный редуктор
12	Хвостовой редуктор
13	Стабилизатор
14	Крыло левое
15	Крыло правое
16	Пушка
17	ОПС

Для выбора мест расположения датчиков вибрации на основных узлах вертолета также применялся метод модального анализа. Сначала для каждого узла составлялась проволочная модель, внешний вид которой для главного редуктора приведен ниже (рис. 6).

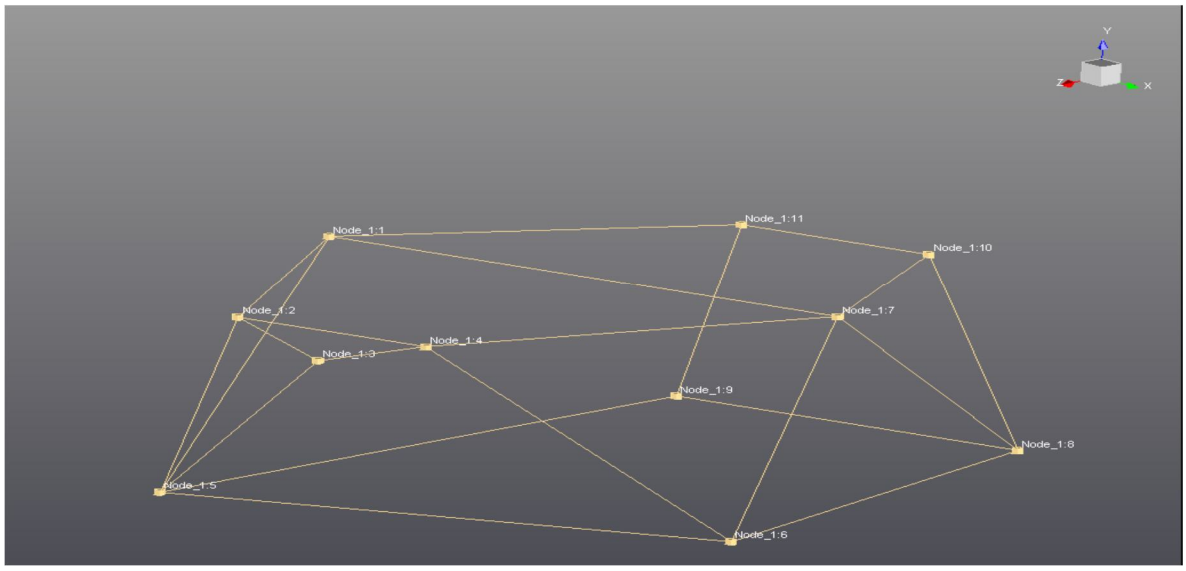

Рис. 6. Проволочная модель главного редуктора

Fig. 6. Wire model of the main gearbox

При этом методе измерялась амплитудно-частотная характеристика между спектром удара (модального молотка) и откликом трехкомпонентного датчика на каждой компоненте, определялись усредненные спектры когерентности, автоспектры мощности по каждому отклику (рис. 7).

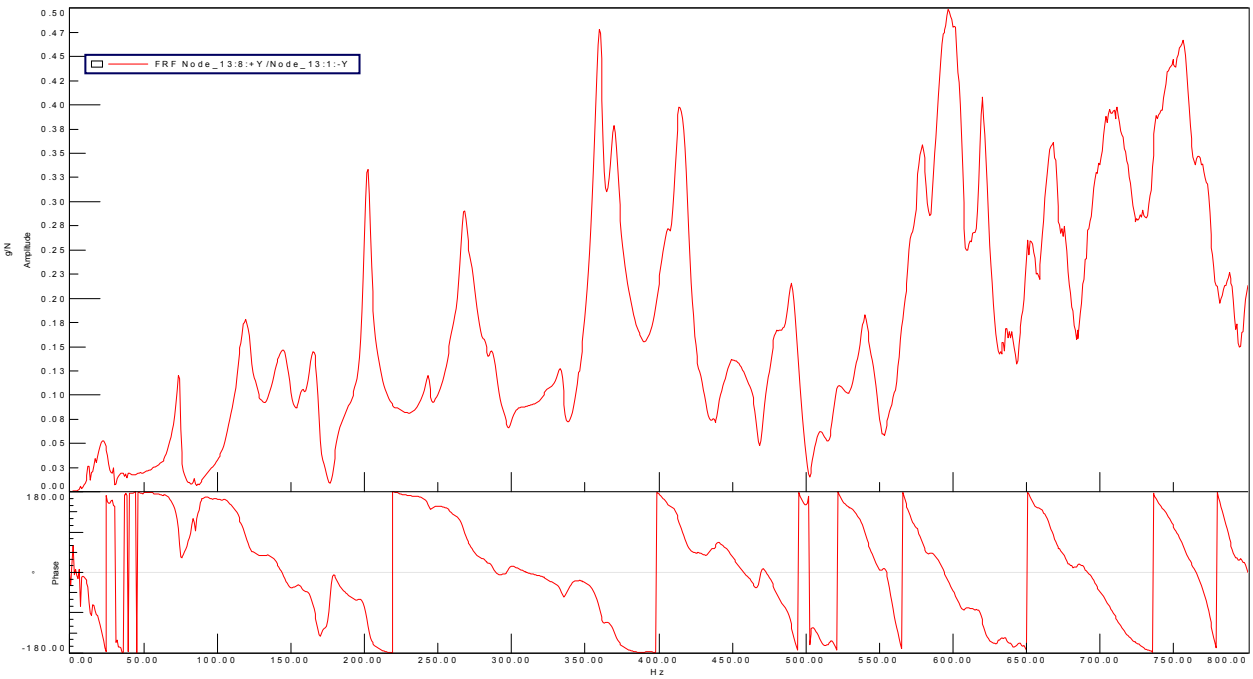

Рис. 7. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристика узла вертолёта, полученные при проведении модального анализа

Fig. 7. The amplitude-frequency and phase-frequency characteristic of the helicopter assembly obtained by modal analysis

В результате нескольких итераций определялись амплитуды и частоты резонанса в ответственных узлах вертолета. В этих местах, потенциально подверженных резонансу, производилась установка вибродатчиков с постоянным контролем амплитуды и частоты. При приближении частоты вибрации к резонансной пилоту должен выдаваться сигнал об изменении режима полета или его полном прекращении.

На рисунке 8 представлены узел вертолета с модальным молотком и реально полученные спектры при испытаниях [2; 7].

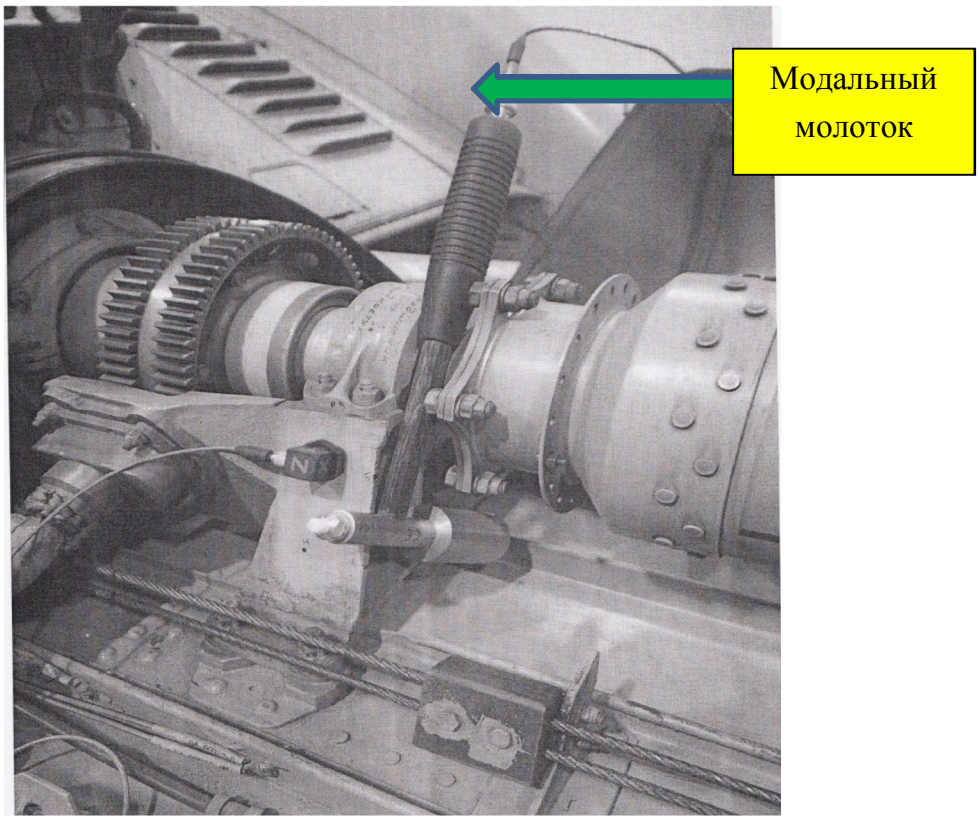

Рис. 8. Узел вертолета с модальным молотком

Fig. 8. Helicopter assembly with a modal hammer

На вертолетах вибросигналы снимаются с помощью датчиков вибрации типа МВ-45 с последующим разложением сигнала в ряд Фурье. На рисунках 9 и 10 представлены сигналы с датчиков без разложения и с разложением в ряд Фурье.

Хорошо просматриваются переходные процессы. Происходит запуск двигателей, выход на режим «Малый газ» и переход на режим «Автоматическое регулирование».

Непременным условием адекватной оценки состояния узлов и ответственных агрегатов вертолета является их контроль на стандартных режимах полета: руление, вертикальный взлет, висение, боевой разворот, форсаж, пикирование, снижение вертикальное, кабрирование, снижение под углом к гори-

зонту. На каждом из этих режимов должны быть установленные пределы изменения параметров (для заведомо исправного вертолета).

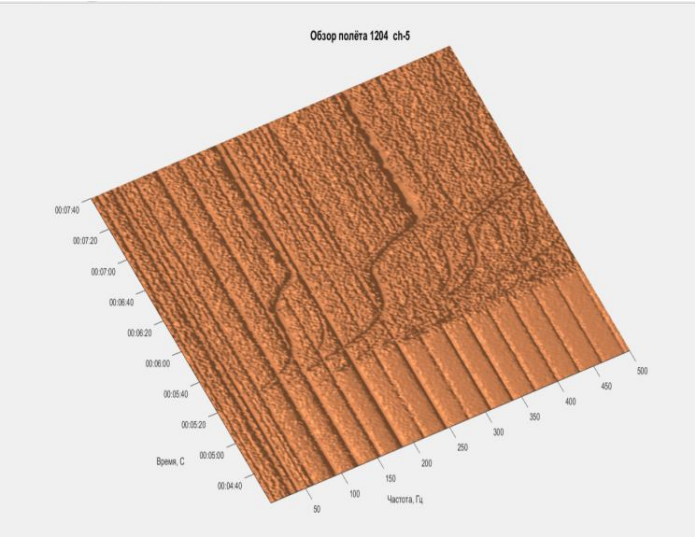

Рис. 9. Сигнал с выхода датчика виброускорения, расположенного на главном редукторе в районе привода от свободной турбины левого двигателя

Fig. 9. The signal from the output of the vibration acceleration sensor located on the main gear in the drive area from the free turbine of the left engine

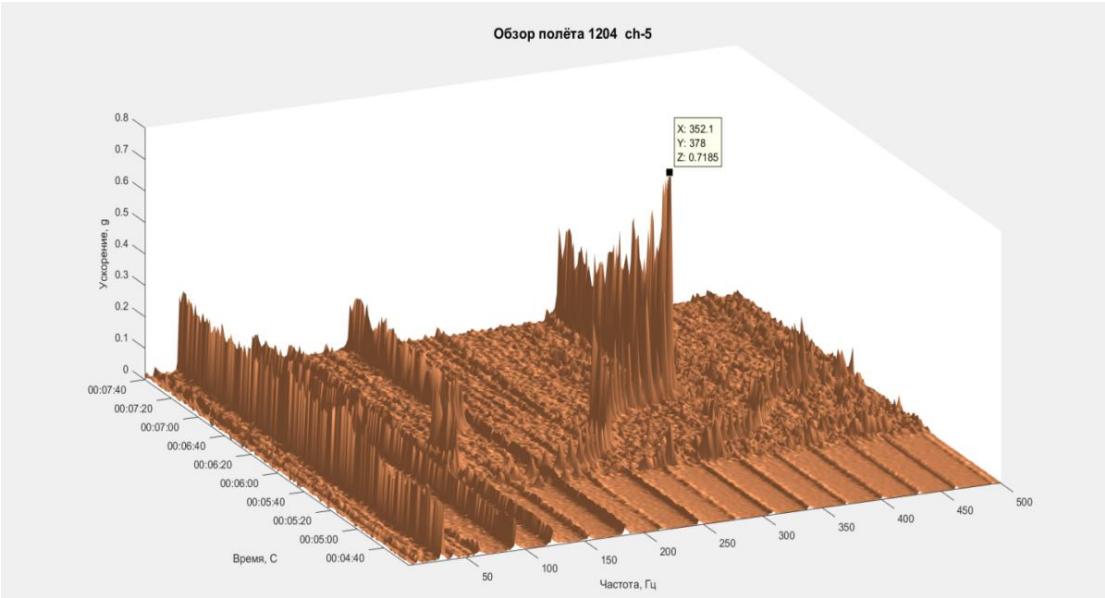

Рис. 10. Спектральный анализ сигнала с выхода датчика виброускорения

Fig. 10. Spectral analysis of the signal from the output of the vibration acceleration sensor

Таким образом, создается логика взаимодействия режимов полета с алгоритмами диагностирования нештатных ситуаций, а создавая эталон частот неисправностей и дефектов, можно создать банк данных АЧХ, однозначно связанных с потенциальными дефектами основных узлов вертолета.

Обобщенная логика взаимодействия режимов полета с алгоритмами диагностирования нештатных ситуаций на основе анализа спектра виброколебаний представлена ниже (рис. 11).

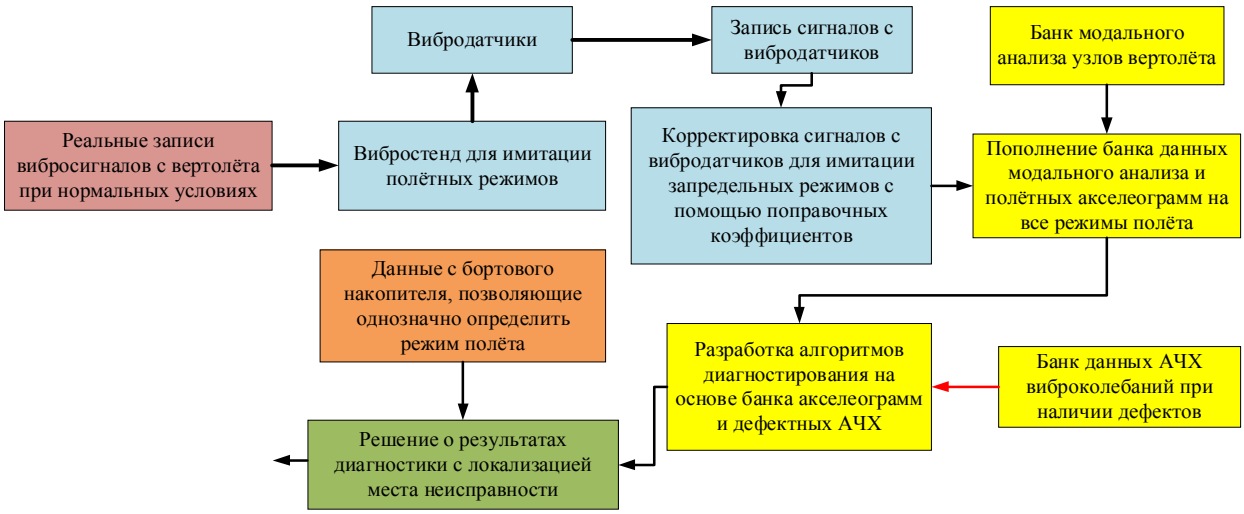

Рис. 11. Обобщенная логика взаимодействия режимов полета с алгоритмами диагностирования нештатных ситуаций на основе анализа спектра виброколебаний

Fig. 11. The generalized logic of the interaction of flight modes with algorithms for diagnosing emergency situations based on the analysis of the spectrum of vibration

Сущность этой логики заключается в том, что, используя реальные записи виброколебаний основных узлов вертолета в штатном режиме полета без перегрузок, возможно получение амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик этих колебаний при всех режимах полета со всеми возможными перегрузками при использовании результатов стенда полунатурного моделирования. В этом случае на вибрационном стенде полунатурного моделирования путем ввода управляющих файлов реальных акселерограмм происходит имитация реальных вибрационных нагрузок, полученных в ходе испытательного полёта без перегрузок. Вводя поправочные коэффициенты в управляющие файлы вибрационного стенда, однозначно связанные с типом полета и перегрузкам, возможно получение новых акселерограмм, имитирующих реальный полет с перегрузками. Эти акселерограммы вместе с матрицами спектрограмм при потенциальных дефектах в трансмиссии вертолета затем используются в банке данных для оценки реального выработанного ресурса и однозначной локализации места дефекта.

Следует отметить, что предложенные три подсистемы диагностики технического состояния вертолета позволяют осуществлять допусковый контроль контролируемых параметров и в процессе полета предоставлять пилоту информацию о критическом состоянии воздушного судна.

Для прогностики технического состояния должен применяться трендовый многофакторный контроль. Его сущность заключается в том, что диагностика тех-

нического состояния конкретного узла должна сопровождаться установлением корреляционных связей между конкретным контролируемым параметром и другими параметрами при различных режимах полета. Установление таких многофакторных корреляционных связей позволит перейти к контролю каждого параметра с установлением трендовых допусков. Поэтому одним из основных принципов создания системы прогностики является принцип объективной корреляционной связи между множеством контролируемых параметров. Изменение одного, напрямую не связанного с конкретным контролируемым параметром, может через некоторое время оказать существенное влияние на конкретный контролируемый параметр. Скорость изменения параметра в пределах трендовых допусков при реальных условиях эксплуатации позволит превентивно определить нежелательную тенденцию к ухудшению состояния воздушного судна. В выражении (4) представлена математическая модель эталонной виброскорости свободной турбины в зоне передней подвески, увязанного с режимами полета вертолета и другими коррелированными параметрами.

$$V_{\text{виб эт}} = a_0 + a_1 \cdot f(N_{\text{тк}}) + a_2 \cdot f(N_{\text{с.т}}) + \\ + a_3 \cdot f(t_\tau) + a_4 \cdot f(t_{\text{m}}) + a_5 \cdot f(M_{\text{кр}}) + \\ + a_6 \cdot f(P_{\text{с.т}}) + a_7 \cdot f(N_{\text{в.в}}), \quad (4)$$

где $N_{\text{тк}}$ – частота вращения ротора турбокомпрессора двигателя;

$N_{\text{с.т}}$ – частота вращения ротора свободной турбины;

t_τ – температура газов перед свободной турбиной двигателя;

t_{m} – температура масла на входе в двигатель;

$M_{\text{кр}}$ – крутящий момент на валу свободной турбины;

$P_{\text{с.т}}$ – мощность на валу свободной турбины;

$N_{\text{в.в}}$ – частота вращения выводного вала двигателя.

Для диагностики параметров в процессе полета очень важно знать их пределы допустимых значений. В качестве примера в выражении (5) приведена максимально допустимая виброскорость свободной турбины в зоне задней подвески.

$$V_{\text{виб max}} = V_{виб.эт} + k_{ст} \times \sigma_{\text{виб}} \times \\ \times \left(\left\| 1 \cdot f(N_{\text{тк}}) \cdot f(N_{\text{ст}}) \cdot f(t_\tau) \cdot f(t_m) \cdot f(M_{\text{кр}}) \cdot f(P_{\text{ст}}) \cdot f(t_{\text{раб}}) \right\|^T \cdot COV \cdot \left\| \begin{matrix} 1 \\ f(N_{\text{тк}}) \\ f(N_{\text{с.т}}) \\ f(t_\tau) \\ f(t_m) \\ f(M_{\text{кр}}) \\ f(P_{\text{ст}}) \\ f(t_{\text{раб}}) \end{matrix} \right\| \right)^{0,5}, \quad (5)$$

где $k_{ст}$ – доверительный интервал Стьюдента;

$\sigma_{виб\ эт}$ – среднее квадратичное отклонение виброскорости свободной турбины в зоне передней подвести от эталонного значения;

$f(.)$ – элементарные функции (линейные, квадратичные или корень) над соответствующим элементов контрольной точки (вектора);

COV – ковариационная матрица формирования допусковой зоны виброскорости свободной турбины в зоне передней подвески;

T – оператор транспонирования;

$V_{виб\ эт}$ – эталонное (для нормального вибросостояния двигателя) значение виброскорости свободной турбины в зоне задней подвески;

$t_{раб}$ – рабочая температура двигателя.

На основе показаний всех датчиков определения технического состояния производится формирование многомерного вектора состояния авиационного комплекса. При этом должна сформироваться многомерная граница Gr_S, разделяющая исправное R_1 и неисправное R_2 состояние АК, как показано на рисунке 12, где К – многомерное состояние неисправности системы в конкретный момент времени.

В общем случае можно принять множество $\Re$ состояний контролируемой системы метрическим. Тогда граница Gr_S будет описываться гиперповерхностью $Gr_S = f(r_1^1, r_1^2 \cdots r_1^n, r_2^1, r_2^2 \cdots r_2^n)$. Задачей диагностирования АК при таком описании гиперповерхности и точки К неисправностей системы является условие, отвечающее критерию

$$\min_{C_{R_2}} \left\| K - Gr_S \right\|_{\Re}. \qquad (6)$$

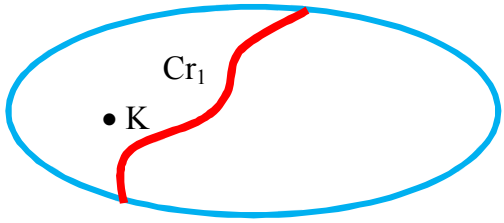

Рис. 12. Граница, разделяющая исправное и неисправное состояние АК

Fig. 12. The boundary separating the healthy and faulty state of AK

Иными словами, для решения задач диагностирования системы S должна быть выбрана такая структура К, описывающая её неисправные состояния из множества C_{R_2}, которая являлась бы наиболее ближе к границе, разделяющей исправные и неисправные состояния этой системы [8; 9; 10].

Выводы

Таким образом, в работе предложена апробированная стратегия разработки систем прогностики и диагностики авиационных комплексов на примере вертолета, позволяющая комплексно и оптимально решить эту задачу с обязательным началом этапа разработки еще на этапе создания АК или его модернизации. Состав датчиков для диагности-

ческого контроля узлов и агрегатов вертолёта определяется после анализа необходимых и достаточных параметров для контроля в реальном масштабе времени основных групп и узлов вертолёта. Этапы проектирования систем диагностики и прогностики должны включать в себя имитационное и полунатурное моделирование. На основе результатов полунатурного моделирования уточняются характеристики и алгоритмы контроля. После чего проводятся исследования в области подтверждения достоверности результатов диагностического контроля и тем самым эффективности системы диагностики и прогностики технического состояния АК в целом.

Список литературы

1. Методологические основы синтеза систем диагностики технического состояния космических и летательных аппаратов: монография / И. Е. Мухин, А. И. Мухин, С. Н. Михайлов, Д. С. Коптев; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. 212 с.

2. Коптев Д. С., Мухин И. Е. Стратегия разработки систем диагностики и прогностики технического состояния перспективных летательных аппаратов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2019. Т. 17, № 2. С. 65–70.

3. Коптев Д. С., Бабанин И. Г., Мухин И. Е. Основные направления разработки и создания интегрированных бортовых систем обеспечения безопасности полётов летательных аппаратов, включая системы контроля физиологических параметров здоровья пилота // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 2. С. 44–53.

4. Мухин И. Е., Селезнев С. Л., Исаев С. А. Интеллектуальные системы диагностирования и прогнозирования работоспособности технического состояния критических элементов вертолёта // Авиационное бортовое оборудование: сборник докладов V научно-практической конференции. М., 2017. С. 43–52.

5. Мухин И. Е., Селезнев С. Л., Коптев Д. С. Направления и практические результаты создания методов и средств диагностики и прогностики состояния авиационного комплекса «человек – машина» // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2017. Т. 7, № 3 (24). С. 46–57.

6. Хилл Э. К., Вон С. Г., Ровик К. Л. Проведение бортового диагностирования методом акустической эмиссии и нейронных сетей усталостного излома авиационных материалов. М., 2011.

7. Коптев Д. С., Мухин И. Е. Этапы разработки диагностики и прогностики технического состояния перспективных летательных аппаратов // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции / отв. ред.

В. Г. Андронов; Юго-Западный государственный унеиверситет. Курск, 2019. С. 208–215.

8. Staszewski W., Boller C., Tominson G. R. Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing. New York: Wiley, 2004. 266 p.

9. Евдокименков В. Н., Красильщиков М. Н., Ратникова Н. А. Контроль состояния воздушного судна в течение жизненного цикла на основе вероятностных критериев // Системный анализ и управление аэрокосмическими комплексами: VII Международная конференция. Евпатория, 2002. С. 74–80.

10. Андронов В. Г., Коптев Д. С., Мухин И. Е. Современные направления разработки и создания интегрированных бортовых систем обеспечения безопасности полётов летательных аппаратов // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции / отв. ред. В. Г. Андронов; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2019. С. 351–363.

Reference

1. Mukhin I. E., Mukhin A. I., Mikhailov S. N., Koptev D. S. Metodologicheskie osnovy sinteza sistem diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya kosmicheskikh i letatel'nykh apparatov [Methodological basis for the synthesis of systems for diagnosing the technical condition of space and aircraft]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2018. 212 p. (In Russ.)

2. Koptev D. S., Mukhin I. E. Strategiya razrabotki sistem diagnostiki i prognostiki tekhnicheskogo sostoyaniya perspektivnykh letatel'nykh apparatov [The development strategy of diagnostic and prognostic systems for the technical condition of promising aircraft]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information - measuring and control systems*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 65 - 70. (In Russ.)

3. Koptev D. S., Babanin I. G., Mukhin I. E. Osnovnye napravleniya razrabotki i sozdaniya integrirovannykh bortovykh sistem obespecheniya bezopasnosti poletov letatel'nykh apparatov, vklyuchaya sistemy kontrolya fiziologicheskikh parametrov zdorov'ya pilota [The main directions of the development and creation of integrated airborne flight safety systems for aircraft, including systems for monitoring the physiological parameters of pilot health]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Successes in modern radio electronics*, 2019, no. 2, pp. 44 - 53. (In Russ.)

4. Mukhin I. E., Seleznev S. L., Isaev S. A. Intellektual'nye sistemy diagno-stirovaniya i prognozirovaniya rabotosposobnosti tekhnicheskogo sostoyaniya kriticheskikh elementov vertoleta [Intelligent systems for diagnosing and predicting the operability of the technical condition of critical elements of a helicopter]. Aviatsionnoe bortovoe oborudovanie, v ramkakh yubileinoi Kh Mezhdunarodnoi vystavki vertoletnoi industrii HeliRussia. Sbornik

dokladov V nauchno-prakticheskoi konferentsii [Aviation on-board equipment, as part of the jubilee X International HeliRussia Helicopter Industry Exhibition. Collection of reports of the 5th scientific and practical conference]. Moscow, 2017, pp. 43 - 52. (In Russ.)

5. Mukhin I. E., Seleznev S. L., Koptev D. S. Napravleniya i prakticheskie rezul'taty sozdaniya metodov i sredstv diagnostiki i prognostiki sostoyaniya aviatsionnogo kompleksa "chelovek – mashina" [Directions and practical results of creating methods and means of diagnostics and prognostication of the state of the man-machine aviation complex]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2017, vol. 7, no.3 (24), pp. 46–57. (In Russ.)

6. Hill E. K., Vaughn S. G., Rovik K. L. Provedenie bortovogo diagnostirovaniya metodom akusticheskoi emissii i neironnykh setei ustalostnogo izloma aviatsionnykh materialov [Carrying out on-board diagnostics by the method of acoustic emission and neural networks of fatigue fracture of aviation materials]. Moscow, 2011. (In Russ.)

7. Koptev D. S., Mukhin I. E. Etapy razrabotki diagnostiki i prognostiki tekhnicheskogo sostoyaniya perspektivnykh letatel'nykh apparatov [Stages of the development of diagnostics and prognostics of the technical condition of promising aircraft]. Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference]; ed. by V. G. Andronov. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2019, pp. 208–215. (In Russ.)

8. Staszewski W., Boller C., Tominson G. R. Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing. New York, Wiley, 2004. 266 p.

9. Evdokimenkov V. N., Krasilshchikov M. N., Ratnikova N. A. Kontrol' sostoyaniya vozdushnogo sudna v techenie zhiznennogo tsikla na osnove veroyatnostnykh kriteriev [Monitoring the state of an aircraft during the life cycle based on probabilistic criteria]. Sistemnyi analiz i upravlenie aerokosmicheskimi kompleksami. VII Mezhdunarodnaya konferentsiya. Evpatoriya [System Analysis and Aerospace Control complexes. VII International Conference]. Evpatoriya, 2002, pp. 74–80. (In Russ.)

10. Andronov V. G., Koptev D. S., Mukhin I. E [Modern directions of the development and creation of integrated airborne flight safety systems]. Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Infocommunications and space technologies: status, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference]; ed. by V. G. Andronov. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2019, pp. 351–363. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Коптев Дмитрий Сергеевич, аспирант, преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Мухин Иван Ефимович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры космического приборостроения и систем связи, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Dmitry S. Koptev, Post-Graduate Student, Lecturer at the Department of Space Instrument Engineering and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Ivan E. Mukhin, Dr. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: d.s.koptev@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.89

Модели латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем

А. В. Киселев[1], О. В. Шаталова[1], З. У. Протасова[1], С. А. Филист[1] ✉, Н. С. Стадниченко[1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: SFilist@gmail.ru

Резюме

Цель исследования *заключается в повышении качества прогнозирования функционального состояния живых систем путем формирования моделей дополнительных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования с гетерогенными решающими модулями.*

Методы. *Для прогнозирования функционального состояния живых систем предложено дополнить гетерогенные решающие сегменты виртуальными потоками. Виртуальный поток представлен моделью латентного предиктора, отражающей скрытые связи в системе между латентными и действительными предикторами. Исходя из этого, вектор информативных признаков будет представлен двумя подвекторами. Первый будет соответствовать виртуальным потокам (латентным переменным), а второй – реальным потокам. Для построения виртуального потока используется контур обратной связи, который включает в себя последовательно соединенные вычитатель, компаратор, сумматор и блок управления. Еще один информативный признак, который будет учитывать скрытые связи в системе между компонентами пространства информативных признаков, поступающими на входы гетерогенных классификаторов, формируется на выходе сумматора.*

Результаты. *Для синтеза модели латентного предиктора разработан алгоритм и поддерживающее его программное обеспечение. Синтез модели латентного предиктора выполняется в шесть этапов. С помощью алгоритма можно сгенерировать новую обучающую выборку, размерность информативных векторов образцов которой превышает на одну компоненту размерность векторов образцов исходной обучающей выборки. Это позволяет ввести в интеллектуальную систему дополнительную обучаемую нейронную сеть и использовать ее в качестве модели виртуального потока. Апробация программного обеспечения интеллектуальной системы с виртуальными потоками проведена на задачи по классификации риска повторного инфаркта миокарда.*

Заключение. *Анализ классификаций качества принятия решений гетерогенными классификаторами по определению вероятности повторного инфаркта миокарда на репрезентативных контрольных выборках с применением ROC-кривых показал, что при использовании моделей латентных предикторов в гетерогенных классификаторах диагностическая чувствительность и диагностической специфичности повышаются на 5…8%.*

Ключевые слова: *виртуальный поток; предиктор; нейронная сеть; классификатор.*

Финансирование*: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90116.*

© Киселев А. В., Шаталова О. В., Протасова З. У., Филист С. А., Стадниченко Н. С., 2020

***Конфликт интересов**: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Модели латентных предикторов в интеллектуальных системах прогнозирования состояния живых систем / А. В. Киселев, О. В. Шаталова, З. У. Протасова, С. А. Филист, Н. С. Стадниченко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 114–133.

Поступила в редакцию 26.12.2019 *Подписана в печать 24.01.2020* *Опубликована 25.02.2020*

Models of Latent Predictors in Intellectual Systems for Forecasting the State of Living Systems

Aleksey V. Kiselev[1], Olga V. Shatalova[1], Zeynab Osama Protasova[1], Sergey A. Filist[1] ✉, Nikita S. Stadnichenko[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str., 94, Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: SFilist@gmail.ru

Abstract

Purpose of research. *The purpose of the study is to improve the quality of forecasting the functional state of living systems by forming models of additional predictors in intelligent forecasting systems with heterogeneous decision modules.*

***Methods**. To predict the functional state of living systems, it is proposed to supplement the heterogeneous decision modules with virtual flows. The virtual flow is represented by a latent predictor model that reflects hidden systemic links between real and latent predictors. As a result, the vector of informative features consists of two subvectors. One of them corresponds to real flows, the second to virtual flows (latent variables). To form a virtual stream, a feedback loop is used, which includes a series-connected subtractor, comparator, adder, and control unit. An additional informative feature that takes into account hidden systemic connections between the components of the space of informative features that are fed to the inputs of heterogeneous classifiers is formed at the output of the adder.*

***Results**. To synthesize a latent predictor model, an algorithm and supporting software have been developed. The synthesis of the latent predictor model is performed in six steps. Using the algorithm, it is possible to generate a new training set, the dimension of the informative vectors of the samples of which exceeds by one component the dimension of the vectors of the samples of the original training set. This makes it possible to introduce an additional trained neural network into the intelligent system and use it as a virtual flow model. The testing of the software of an intelligent system with virtual flows was carried out for the tasks of classifying the risk of myocardial reinfarction.*

***Conclusion**. ROC analysis of the quality of decision-making by heterogeneous classifiers for assessing the risk of myocardial infarction in representative control samples showed that when using models of latent predictors in heterogeneous classifiers, diagnostic sensitivity and diagnostic specificity increase by 5 ... 8%.*

***Keywords**: virtual flow; predictor; neural network; classifier.*

***Funding**: The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90116.*

***Conflict of interest:** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Kiselev A. V., Shatalova O. V., Protasova Z. U., Filist S. A., Stadnichenko N. S. Models of Latent Predictors in Intellectual Systems for Forecasting the State of Living Systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(1): 114–133. (In Russ.)

Received 26.12.2019 *Accepted 24.01.2020* *Published 25.02.2020*

***

Введение

При прогнозировании перехода живых систем из одного состояния в другое необходимо учитывать их латентные переменные, которые не входят в исследуемый комплект предикторов систем, на основе которых строятся их прогностические модели. Для учета этих предикторов необходима надсистемная надстройка с самоорганизующейся структурой [1; 2; 3; 4; 5]. Построение этой надстройки заключается в следующем. Если данные в системе носят поточный характер, сущность которого заключается в том, что каждый поток формируется множеством предикторов, сгруппированных по некоторому систематизирующему принципу, а затем сжатых до скаляра по некоторому формальному методу, то к имеющимся потокам может быть добавлен еще один поток, представленный своим выходом, то есть сжатыми данными, которые смоделированы тем или иным методом.

Для настройки модели виртуального потока формируется функционал качества прогнозирования интеллектуальной системы. Варьируя внутренними параметрами модели виртуального потока, можно улучшить показатели качества системы или хотя бы не ухудшить их. Таким образом, имеется возможность построить модель виртуального потока. Модель потока позволяет нам построить модель данных внутри этого потока, затем их можно объединить с данными в других потоках, которые были получены в результате экспериментальных исследований на натуральных объектах.

Для построения системной надстройки, которая реализует работу с виртуальными потоками данных и интегрирует их в данные натурного эксперимента, необходим соответствующий инструментарий, а также алгоритмы и методы, позволяющие реализовать модель виртуального потока.

Материалы и методы

В качестве инструментария для формирования виртуальных потоков используем обучаемые нейронные сети. В настоящее время широкое распространение получили экспертные системы, использующие нейросетевые классификаторы и нечеткие решающие модули, которые позволяют интегрировать результаты статистических исследований и экспертные знания, положенные в основу обучаемых классификаторов [6; 7; 8]. Экспертные знания в этих системах рационально представ-

лять по сегментам (потокам). Это позволяет экспертной системе (экспертам – специалистами в узкой области знаний) делать заключения в виде коэффициентов уверенности по выдвигаемой гипотезе в пределах одного решающего модуля. Для объединения экспертных знаний по гетерогенным решающим модулям (потокам) используются обучаемые нейронные сети [9; 10].

На выходе решающего модуля получаем скалярную величину – коэффициент уверенности для данного участка информативных признаков (частный коэффициент уверенности) [11; 12]. Агрегация частных коэффициентов уверенности производится на основе обучаемого классификатора. В роли обучаемого классификатора часто выступает нейронная сеть [6; 10]. Когда коэффициенты уверенности, полученные в результате нечетких операций в нечетком решающем модуле на основе алгоритмов нечеткого вывода, используются в качестве входных данных нейронной сети, появляются проблемы с получением необходимой точности классификации нейронной сети, которая используется на входе решающего модуля (рис. 1).

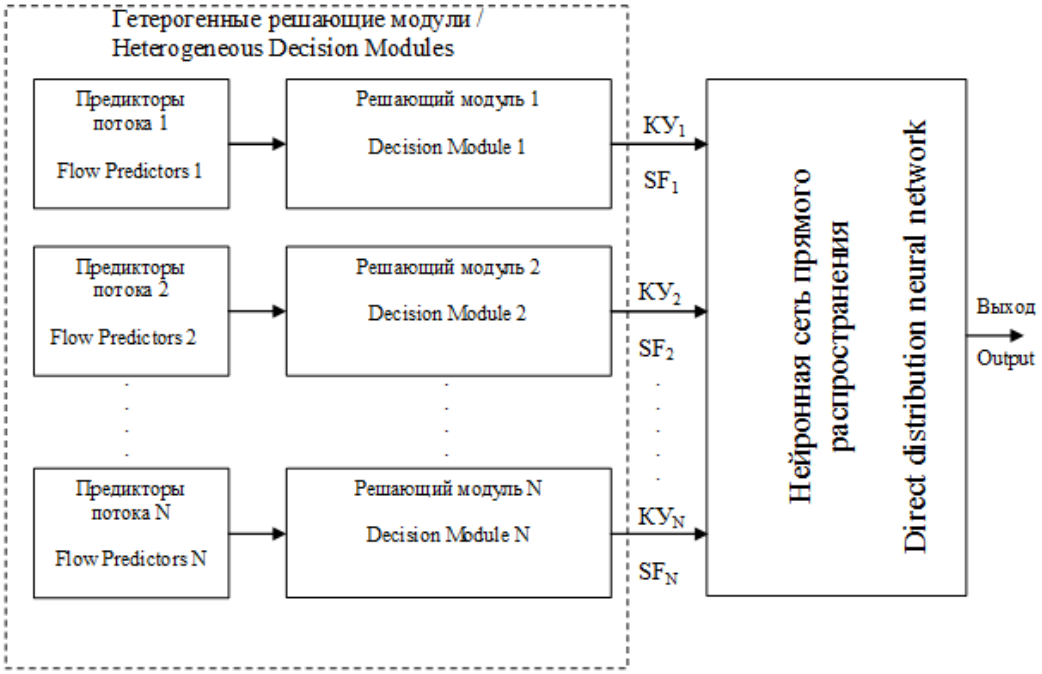

Рис. 1. Структура интеллектуальной системы для прогнозирования функционального состояния живых систем с гетерогенными решающими модулями

Fig. 1. The structure of an intelligent system for predicting the functional state of living systems with heterogeneous decision modules

Это связано с тем, что полученные на основе экспертных заключений и гипотез признаки, которые формируются на входе нейронной сети, могут неадекватно отражать внутренние процессы в исследуемой системе. Только эксперт

(ЛПР) способен определить полноту признакового пространства и релевантность самих признаков. Обучаемая нейронная сеть, на вход которой подаются эти признаки, вносит свои искажения в интерпретацию признакового пространства. В случае прогнозирования профессиональной пригодности работников экстремальных профессий особенно опасен эффект переобучения, так как сформировать достаточно большой объем выборки весьма проблематично. По этой причине в структуру (рис. 1) необходимо внести дополнительные связи, позволяющие придать больший вес статистическим данным в общем процессе синтеза интеллектуальной системы прогнозирования состояния живых систем.

Идея способа выполнения такой процедуры заключается в следующем. Признаки, подающиеся на вход нейронной сети, – коэффициенты уверенности для сегментов информативных признаков – не способны полностью отразить свойства исследуемого объекта или системы, затрагивающих сферу интересов ЛПР. Чаще всего у ЛПР отсутствуют доказательства того, что в N сегментах признаков на входах гибридных решающих модулей (рис. 1) присутствуют все релевантные предикторы, которые характеризуют исследуемый объект и относятся к области интереса решаемой задачи. Поэтому у ЛПР нет уверенности в том, что гибридные решающие модули содержат в себе все релевантные потоки.

Из этого следует предположение, что существует хотя бы один решающий модуль ($N+1$), который может включать в себя хотя бы один предиктор, коэффициент уверенности по которому, то есть по решающему модулю ($N+1$) $КУ_{N+1}$, оказывает существенное влияние на качество принимаемых решений. Следовательно, необходима процедура для формирования вектора

$$\hat{Z}_{N+1} = \left(z^1_{N+1}, z^2_{N+1}, ..., z^i_{N+1}, ..., z^M_{N+1}\right)^T \quad (1)$$

для обучающей выборки

$$\left\{Z_1, Z_2, ..., Z_i, ..., Z_M\right\}, \quad (2)$$

где

$$Z_i = \left(z^i_1, z^i_2, ..., z^i_j, ..., z^i_N\right)^T, \quad (3)$$

M – число образцов в обучающей выборке;

N – число входов нейронной сети на рисунке 1;

i – номер образца в обучающей выборке;

j – номер входа агрегирующей нейронной сети ($j = \overline{1, N}$, $i = \overline{1, M}$).

Так как в (3) $z^i_j = КУ^i_j$, то $Z_i = \left(КУ^i_1, КУ^i_2, ..., КУ^i_j, ..., КУ^i_N\right)^T$.

В нейронную сеть в общем случае (рис. 1) может быть введено неограниченное количество дополнительных входов (имеется неограниченное число латентных предикторов), но в данном случае рассматривается только один латентный предиктор.

На вход нейронной сети подается константа (единица), на основе которого в процессе обучения нейронной сети определяются весовые коэффициенты (поляризующий информационный вход) [9]. Количество поляризующих входов, введенных в структуру нейронной сети, и величина констант, которые подаются на них, не имеют значения, поэтому мы всегда можем разделить поляризующий вход на два входа. На один вход будет подаваться константа 0,5, а на второй вход, который является дополнительным, мы будем подавать случайную величину, модель которой может быть получена на основе различных парадигм аппроксимации временных рядов [13; 14; 15]. Качество классификации оцениваем через показатели чувствительности и специфичности, введенные в [16; 17].

Экспериментальные исследования выборок, сформированных искусственно, показали, что ввод («включение») дополнительного информативного признака (входа) в нейронную сеть прямого распространения с двумя входами способен увеличить точность двухальтернативной классификации до значения в 100% и выше при разнице первых моментов у третьего признака всего лишь на 10%.

Показатель качества классификации должен выбираться таким образом, чтобы он зависел как от ошибок первого, так и второго рода, а недопустимо большие ошибки хотя бы одного вида снижали бы показатель качества классификации к недопустимым значениям.

Суть метода синтеза виртуального потока состоит в том, чтобы сначала модифицировать саму обучающую выборку (вектор (2)) с помощью управления статистическими характеристиками виртуальных данных, а затем на основе уже преобразованных данных обучающей выборки (вектор (1)) производится перенастройка самой нейронной сети. Данные действия могут нести итерационный характер [16; 17].

Метод синтеза виртуального потока для нейронной сети прямого распространения (рис. 2) реализуется с помощью последовательности следующих итерационных шагов. Управление последовательностью шагов осуществляется посредством трехпозиционного ключа К.

На *первом шаге* ключ *К* в положении 2, сумматор 4 работает как повторитель, а виртуальный вход z_{N+1} исполняет функции поляризующего входа для нейронной сети *NET1*. Нейронная сеть *NET1* настраивается на обучающей выборке

$$\left\{\widetilde{Z}_1, \widetilde{Z}_2, ...\widetilde{Z}_i, ...\widetilde{Z}_M\right\}, \qquad (4)$$

где

$$\widetilde{Z}_i = \left(z_1, z_2, ..., z_j, ..., z_N, z_{N+1}\right)^T, \qquad (5)$$

$$\forall i \quad z_{N+1}^i = 0{,}5 .$$

На *втором шаге* ключ *К* в положении 3. На этом шаге происходит искус-

ственное повышение качества классификации полученной модели нейронной сети *NET1* посредством управления виртуальным входом (N+1). Улучшение показателей качества классификации достигается при помощи изменения вспомогательного информативного признака в экземплярах обучающей (контрольной) выборки, как это показано на структурной схеме (рис. 2). В схеме присутствует петля отрицательной обратной связи, которая реализована с помощью последовательного соединения блоков 1:

$$\Delta_i = Y_i - d_i, \qquad (6)$$

где Y_i – выход *NET1*;

d_i – класс, к которому относится i-й образец обучающей (контрольной) выборки.

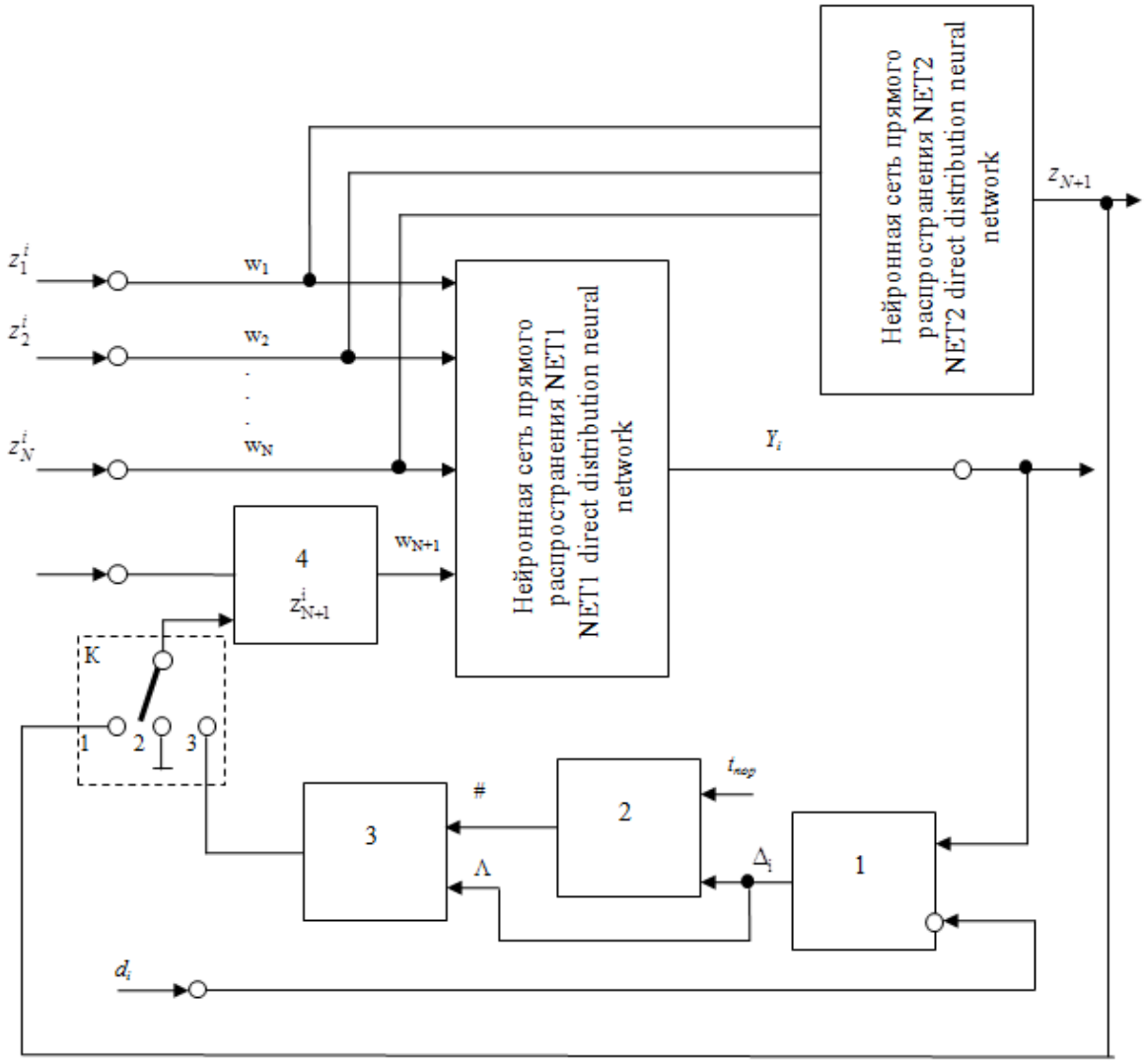

Рис. 2. Схема синтеза виртуального потока: 1 – блок вычисления ошибки; 2 – компаратор, 3 – блок управления; 4 – сумматор

Fig. 2. Synthesis scheme of a virtual thread: 1 – error calculation unit; 2 – comparator, 3 – control unit; 4 – adder

Необходимость коррекции добавочного элемента вектора информативных признаков (компоненты N+1) обусловлена тем, что в процессе поступления экземпляров обучающей (контрольной) выборки (5) на вход *NET1* в блоке 1 вычисляется ошибка классификации (6). Блок управления 3 подбирает такие значения на входе сумматора 4, чтобы минимизировать ошибку (6). При этом значение выхода блока 3, минимизирующее (6), сохраняется в виде массива

$$\hat{Z}_{N+1} = \left(z_{N+1}^{1}, z_{N+1}^{2}, \ldots, z_{N+1}^{i}, \ldots, z_{N+1}^{M}\right)^{T}, \quad (7)$$

который используется для настройки нейронной сети *NET2* в качестве функции цели.

Схема алгоритма формирования *(N+1)*-х компонентов векторов информативных признаков для *NET2* показана на рисунке 3. Рассмотрим подробнее этапы работы алгоритма. Блок 1 осуществляет загрузку обучающей (контрольной) выборки, состоящей из M экземпляров типа (3) и (5). Каждый i-й элемент выборки (3) (вектор (5)) подается последовательно на вход модели *NET1*, полученной на первом шаге реализации метода, что осуществляется посредством блока 3 алгоритма рисунок 4. В блоке 4 алгоритма рисунок 3 осуществляется классификация i-го образца. Близость образца i к заданному классу соответствует выходу нейронной сети *NET1* Y_i. В блоке 5 алгоритма рисунок 4 определяется разность между реальным значением выхода *NET1* и целью d_i. Если разность между этими значениями не превышает некоторого заранее заданного значения, то *(N+1)*-й, компонента текущего образца не подлежит изменению и алгоритм переходит к анализу следующего образца. Если же разность этих значений превышает заранее заданное значение, то в блоке 7 запускается итерационный процесс коррекции этой разности за счет изменения значения *(N+1)*-й компоненты в соответствующую сторону с помощью добавления к ней достаточно малой величины δ. На рисунке 2 показаны блок управления 3 и блок суммирования 4, на основе которых реализован данный блок. Если значение ошибки больше пороговой величины, заданной в компаратор 2, то в блоке управления 3 формируется управляющее воздействие на сумматор 4, которое направлено на снижение ошибки Δ_i. По достижении минимального значения ошибки Δ_i для данного случая с выхода блока управления 3 снимается новое значение латентного предиктора.

В блоке 11 алгоритма рисунок 4 представлено формирование новой обучающей (контрольной) выборки $\left\{\hat{Z}_i\right\}$, которая соответствует начальному этапу коррекции *(N+1)*-й компоненты векторов признаков образцов.

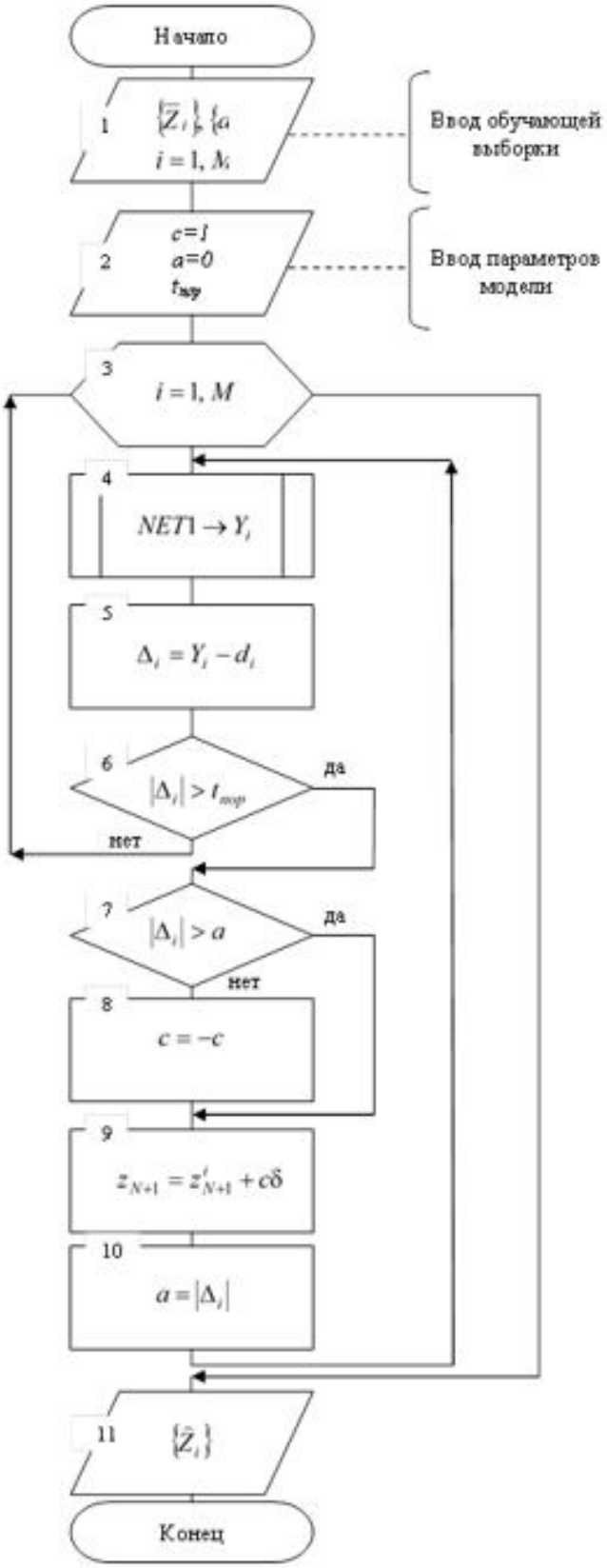

Рис. 3. Схема алгоритма второго шага метода реализации метода синтеза виртуального потока

Fig. 3. Diagram of the algorithm of the second step of the implementation method of the virtual stream synthesis method

Таким образом, на основе контрольной выборки (2) происходит формирование новой обучающей выборки (5). При формировании обучающей выборки к каждому i – му N-мерному вектору $\boldsymbol{Z_i}$ добавляется Z_{N+1} компонента, которая соответствует виртуальному потоку. Учитывая соответствие входов нейронной сети выходам гетерогенных решающих модулей, лежащих в диапазоне 0…1, присваиваем вспомогательной $(N+1)$-й координате всех экземпляров значение 0,5 независимо от класса.

На *третьем шаге* строится модель латентного предиктора. Модель строится как аппроксиматор:

$$z_{N+1}^{i} = f(z_1^i, z_2^i, ... z_N^i), \qquad (8)$$

где i – номер образца контрольной выборки (неизвестного образца).

При построении модели (7) используется нейронная сеть прямого распространения *NET2*. Полученный на втором шаге массив (7) используется в качестве обучающей выборки для обучения этой сети. В этом случае первые N компонентов векторов, принадлежащих множеству (5), являются независимыми переменными. При этом зависимой переменной (функции цели) будут являться компоненты $N+1$ векторов, принадлежащих множеству (4).

На *четвертом шаге* происходит формирование решающего модуля, который используется для классификации неизвестного образца и имеет структуру, представленную на рисунке 2. Работа модуля заключается в перемещении ключа K в положение 1, что дает нам возможность использовать две нейронные сети *NET1* и *NET2* одновременно (классификатор и аппроксиматор соответственно).

Аппроксиматор, необходимый для формирования виртуального потока в режиме «Классификация», создает вектор со структурой (1), используя вектор признаков неизвестного образца со структурой (3).

Численное моделирование (эксперимент)

В качестве прикладной задачи для интеллектуальной системы прогнозирования с виртуальными потоками решалась задача прогнозирования повторного инфаркта миокарда (ПИМ). ПИМ в реабилитационном периоде прогнозировался интеллектуальной системой со структурой, представленной на рисунке 1, в которой в качестве дополнительного решающего модуля был введен решающий модуль с виртуальным потоком, построенный согласно базовой структуры, представленной на рисунке 2. Всего в системе использовалось пять гетерогенных классификаторов, из выходов которых формировался виртуальный поток согласно вышеописанному методу [16; 17].

Для оценки качества прогнозирования интеллектуальной системы с гетерогенными классификаторами была сформирована экспериментальная

группа из больных, перенесших острый инфаркт миокарда (ОИМ). В экспериментальную группу входило 230 больных, мужчин и женщин в возрасте от 40 до 75 лет, перенесших впервые ОИМ. Исследование носило ретроспективный характер. Изначально из медицинской документации за определенный период времени были отобраны больные, которые отвечали заданным критериям включения, после чего данные этих больных регистрировались в специальной базе данных. Затем для уточнения исходов заболевания был установлен контакт с больными или их родственниками. Для этого с больными связывались по телефону, а на некоторых этапах исследования больных приглашали на консультацию в поликлинику. На основании проведенного с больными собеседования база данных пополнялась информацией о текущем состоянии больного, изучалась динамика заболевания за период, прошедший после перенесенного ОИМ, фиксировались возникшие за это время осложнения. Больные наблюдались в течение двух лет.

Оценка эффективности полученных результатов проводилась с помощью ROC-кривых (ROC – Receiver operating characteristic), что позволило дать оценить качество модели по разделению двух классов. При использовании различных показателей, характеризующих риск появления ПИМ как шкалы для построения гистограмм распределения классов ω_0 и $\omega_1 = \omega_{ИМ}$, были определены классификационные пороги, позволившие решать задачу ROC-анализа. Для решения задачи ROC-анализа были определены классификационные пороги. Для определения пороговых значений использовались показатели, характеризующие риск появления ПИМ в качестве шкал для построения гистограмм распределения классов ω_0 и $\omega_1 = \omega_{ИМ}$.

ROC-кривая отражает зависимость диагностической чувствительности (ДЧ) или количества верно классифицированных положительных примеров от количества неверно классифицированных отрицательных примеров: 1-диагностическая специфичность (ДС). Подразумевается наличие некоторого параметра классификатора, в зависимости от которого будет варьироваться соотношение ДЧ и ДС. Такой параметр или точку отсечения одного диагностируемого класса от другого иначе можно назвать порогом. Точка отсечения имеет максимальную приближенность к верхнему левому углу графика или максимально удалена от диагональной прямой линии.

Шкала ASCORE была использована как прототип для гетерогенного классификатора [18; 19; 20]. В таблице 1 приведены показатели качества прогнозирования ПИМ на контрольной выборке в модели гетерогенного классификатора с использованием всего гетерогенного пространства ИП, которые сопоставляются с аналогичными результатами, полученными на шкале ASCORE.

Таблица 1. Сравнительные экспериментальные данные по прогнозированию ПИМ, %

Table 1. Comparative experimental data for predicting RMI, %

Обследуемые Explore	Модель гетерогенного классификатора с виртуальным потоком Heterogeneous classifier model with virtual thread			Шкала ASCORE ASCORE Scale		
	ДЧ	ДС	ДЭ	ДЧ	ДС	ДЭ
$n_{\omega_1} = 100$	90	86	88	75	71	73
$n_{\omega_2} = 60$	86	90		71	75	

На рисунке 4 показан пример гистограммы гетерогенных классификаторов, используемой для построения ROC-кривых. Задаем диапазон изменения выходных значений гетерогенного классификатора ($КУ_{Пор}$). При превышении данного значения неизвестный образец будет относиться к классу ω_1. На основе чего, определив подходящий шаг изменения $КУ_{Пор}$, вычисляем показатели качества гетерогенного классификатора.

Таким образом, в данном случае ROC-кривая для каждого гетерогенного классификатора является функциональной зависимостью показателей качества классификации ДЧ и ДС от $КУ_{Пор}$. С учетом характера аппроксимации гистограмм $H_{\omega o}$ и $H_{\omega 1}$, которые представлены на рисунке 4, был выбран шаг изменения $КУ_{Пор}$, равный 0,05, а динамический диапазон – от 0,5 до 0,8.

В таблицах 2, 3 приведены результаты ROC-анализа для исследованных гетерогенных классификаторах с виртуальным потоком.

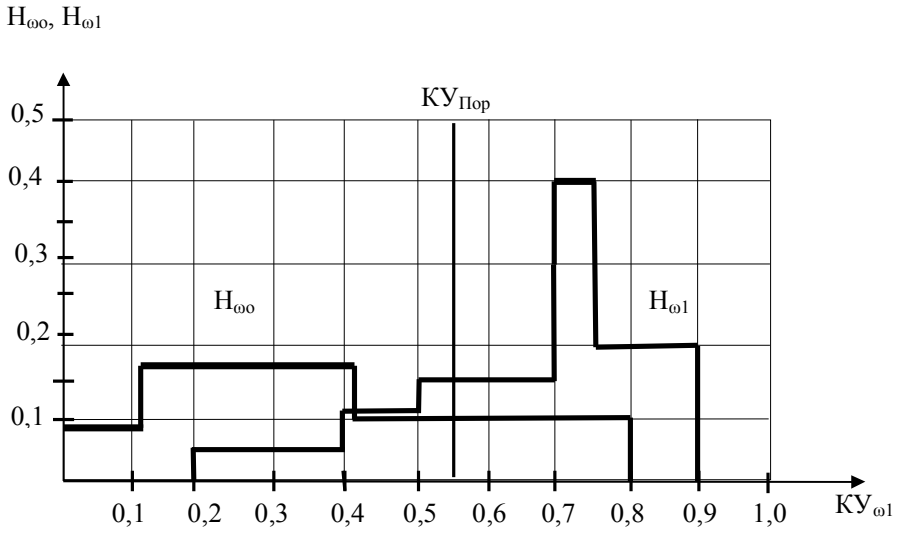

Рис. 4. Типовая гистограмма распределения классов ω_0 и ω_1 по величине $КУ_{\omega 1}$

Fig. 4. A typical histogram of the distribution of classes ω_0 and ω_1 by the value of $SF_{\omega 1}$

Таблица 2. Результаты анализа классификаций для гетерогенного классификатора, построенного по всему пространству информативных признаков с применением ROC-кривых

Table 2. Results of ROC-analysis for a heterogeneous classifier built over the entire space of informative features

Пороговый коэффициент устойчивости	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
Диагностическая чувствительность	0,62	0,75	0,83	0,9	0,92	0,94	0,95
Диагностическая специфичность	0,99	0,94	0,9	0,86	0,84	0,78	0,74

Таблица 3. Результаты анализа классификаций для гетерогенного классификатора, построенного по пространству информативных признаков без учета виртуальных потоков с применением ROC-кривых

Table 3. Results of ROC-analysis for a heterogeneous classifier, built on the space of informative features without virtual flows

Пороговый коэффициент устойчивости	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
Диагностическая чувствительность	0,65	0,72	0,78	0,84	0,88	0,91	0,94
Диагностическая специфичность	0,96	0,93	0,9	0,86	0,82	0,78	0,72

Анализ результатов использования всех шести составляющих пространства информативных признаков, которые были предложены в работе в финальном решающем правиле, показал наиболее высокое качество классификации. Однако предложенный метод требует дополнительных затрат времени и средств.

Рисунок 5 демонстрирует сравнительные характеристики гетерогенных классификаторов на ROC-плоскости. Анализ графиков сравнительных характеристик гетерогенных классификаторов, представленных на рисунке 5, относительно ROC-плоскости позволяет оценить вклад каждой группы информативных признаков в общий процесс прогнозирования.

На основании результатов проведенных наблюдений были проанализированы различные показатели, которые позволяют охарактеризовать состояние исследуемой категории больных с учетом разработанных методов и средств (работа с использованием интеллектуальной системы поддержки принятия решений врача-кардиолога) и без них. Результаты проверки на контрольной выборке эффективности работы правил

прогнозирования ПИМ в период реабилитации на основании комплексного учета информативных признаков показывают приемлемое для практики качество решения поставленных в работе целей и решаемых задач.

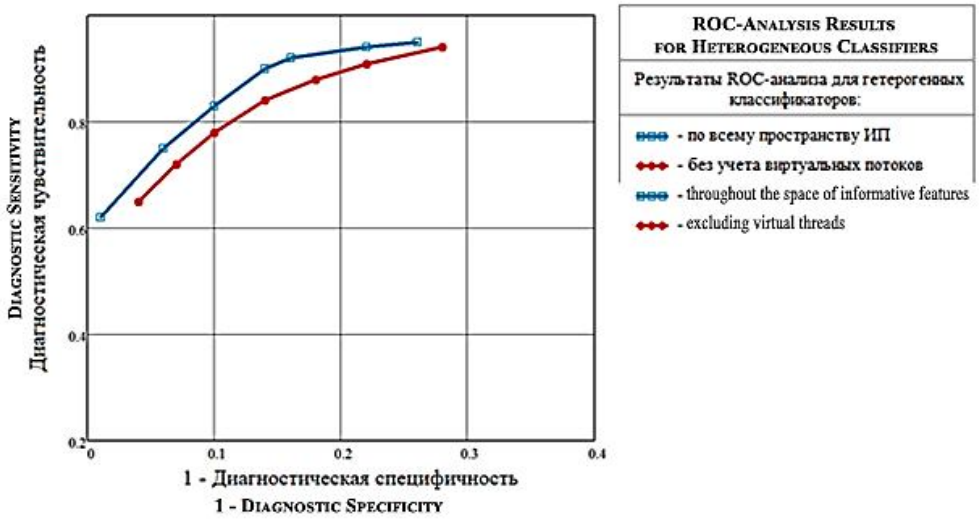

Рис. 5. ROC-кривые двух гетерогенных классификаторов

Fig. 5. ROC-curves of two heterogeneous classifiers

Результаты и обсуждение

Интеллектуальную систему прогнозирования повторных инфарктом предложено дополнит решающим модулем с виртуальным потоком. Полученная таким образом группа гетерогенных классификаторов формировала входной вектор для обучаемой нейронной сети, при этом вектор формировался двумя подвекторами. Первый формировался виртуальными потоками (латентными переменными), а второй – реальными потоками.

Метод синтеза виртуального потока предусматривает последовательное выполнение четырех шагов и включает настройки, разнесенные во времени, двух нейронных сетей. На втором этапе синтеза классификатора используется контур обратной связи, который позволяет получить на выходе вспомогательный информативный признак для учета скрытых системных связей между компонентами реальных предикторов, используемых для прогнозирования.

Выводы

Разработан алгоритм второго шага формирования виртуального потока, осуществляющий итерационный процесс синтеза виртуального потока.

Выполнен анализа классификаций качества принятия решений гетерогенными классификаторами по оценке степени риска повторного инфаркта миокарда на репрезентативных контрольных выборках с применением ROC-кривых. Проведено исследование пяти гетерогенных классификаторов с учетом последовательного роста числа ре-

шающих модулей, включенных в классификационную модель. Осуществлена сравнительная оценка качества показателей прогнозирования полученной модели классификатора с известной шкалой прогнозирования риска сердечно-сосудистых осложнений ASCORE. При использовании всех решающих модулей в гетерогенном классификаторе и диагностической специфичности 0,86 получена диагностическая чувствительность 0,90. Данный показатель в среднем на 15% выше, чем у шкалы ASCORE, и на 5-10% выше, чем у гетерогенного классификатора с отключенным виртуальным потоком.

Список литературы

1. Шуткин А. Н., Позин А. О., Филист С. А. Адаптируемые к структуре данных классификаторы в задачах прогнозирования профессиональных заболеваний // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века: сб. ст. по материалам II Всерос. науч.-практ. конф. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2017. С. 161-164.

2. Филист С. А., Волков И. И., Емельянов С. Г. Метод классификации сложных объектов на основе анализа структурных функций медленных волн // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 6-11.

3. Мохаммед А. А., Филист С. А., Шаталова О. В. Моделирование импеданса биоматериалов в среде MATLAB // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 4. С. 73-78.

4. Томакова Р. А., Шаталова О. В., Томаков М. В. Теоретико-множественный подход и теория графов в обработке сложноструктурируемых изображений: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2012. 119 с.

5. Распределенные автономные интеллектуальные агенты для мониторинга и метаанализа эффективности управления живыми системами / Т. В. Петрова, А. А. Кузьмин, Д. Ю. Савинов [и др.] // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2017. № 4 (40). С. 61-73.

6. Использование гибридных нейросетевых моделей для многоагентных систем классификации в гетерогенном пространстве информативных признаков / С. А. Филист, А. Г. Курочкин, В. В. Жилин [и др.] // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. Научно-технический журнал. 2015. № 3 (31). С. 85-95.

7. Филист С. А., Томакова Р. А., Яа Зар До. Универсальные сетевые модели для задач классификации биомедицинских данных // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4 (43), ч. 2. С. 44-50.

8. Старцев Е. А., Шаталова О. В., Уварова В. В. Двумерные нейросетевые структуры метаанализа медико-экологических данных // Искусственный интеллект в реше-

нии актуальных социальных и экономических проблем XXI века: сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. С.161-164.

9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: [пер. с англ.]. 2-е изд., испр. М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2006. 1104 с.

10. Филист С. А., Шаталова О. В., Ефремов М. А. Гибридная нейронная сеть с макрослоями для медицинских приложений // Нейрокомпьютеры. Разработка и применение. 2014. № 6. С. 35-39.

11. Теория проектирования нечетких сетевых экспертных систем для управления медико-экологической безопасностью / Н. А. Кореневский, С. А. Филист, А. Б. Красковский [и др.] // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология. Экономика. Информатика. 2009. Т. 11, № 9-1 (64). С. 146-151.

12. Способ моделирования нечетких моделей в пакете MATLAB для биомедицинских приложений / В. В. Жилин, С. А. Филист, Халед Абдул Рахим, О. В. Шаталова // Медицинская техника. 2008. № 2. С. 15-17.

13. Синтез дополнительного информативного признака для нейронной сети прямого распространения / А. О. Позин, С. А. Филист, А. Н. Шуткин [и др.] // Новые решения в области упрочняющих технологий: взгляд молодых специалистов: сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. С. 212-217.

14. Позин А. О., Филист С. А., Шуткин А. Н. Тестирующие гибридные системы с дополнительным пространством информативных признаков // Современные информационные технологии в управлении качеством: сб. ст. V Междунар. науч.-прикладной конф. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2016. С. 46-50.

15. Позин А. О., Старцев Е. А., Уварова В. В. МГУА-нейронные сети для прогнозирования состояния сложных систем с временными лагами // Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных: материалы XXIV Всероссийского семинара. Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2016. С. 50-55.

16. Нейросетевые модули с виртуальными потоками для классификации и прогнозирования функционального состояния сложных систем / А. В. Киселев, Т. В. Петрова, С. В. Дегтярев [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 4. С. 123-134.

17. Виртуальные потоки в гибридных решающих модулях классификации сложноструктурируемых данных / А. В. Киселев, С. А. Филист, О. В. Шаталова [и др.] // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2018. № 2 (42). С. 137-149.

18. Прогностические факторы развития сердечно-сосудистых осложнений во время аномальной жары 2010 г. (когортное наблюдательное исследование) / М. Д. Смирнова, Т. В. Фофанова, Ф. Т. Агеев [и др.] // Кардиологический вестник. 2016. № 11(1). С. 43-51.

19. A method for creating fuzzy neural-network models using the matlab package for biomedical applications / S. A. Filist, V. V. Zhilin, K. A. Rakhim, O. V. Shatalova // Biomedical Engineering. 2008. Vol. 42, no. 2. P. 64-66.

20. Filist S. A., Aleksenko V. A., Kuzmin A. A. Bioimpedance skin condition monitoring during therapeutic and cosmetic procedures // Biomedical Engineering. 2008. Vol. 42, no. 2. P. 97-99.

References

1. Shutkin A. N., Pozin A. O., Filist S. A. Adaptiruemye k strukture dannykh klassifikatory v zadachakh prognozirovaniya professional'nykh zabolevanii [Classifiers adaptable to the data structure in the tasks of predicting occupational diseases]. Iskusstvennyi intellekt v reshenii aktual'nykh sotsial'nykh i ekonomicheskikh problem XXI veka. Sb. st. po materialam II Vseros. nauch.-prakt. konf. [Artificial Intelligence in solving urgent social and economic problems of the 21st century. Sat. Art. based on the materials of the Second All-Russian. scientific-practical conf.]. Perm Perm. st. nat. researched Univ. Publ., 2017, pp. 161-164. (In Russ.)

2. Filist S. A., Volkov I. I., Emelyanov S. G. Metod klassifikatsii slozhnykh ob"ektov na osnove analiza strukturnykh funktsii medlennykh voln [The method of classification of complex objects based on the analysis of the structural functions of slow waves]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical electronics*, 2012, no. 4, pp. 6-11. (In Russ.)

3. Mohammed A. A., Filist S. A., Shatalova O. V. Modelirovanie impedansa biomaterialov v srede MATLAB [Modeling the impedance of biomaterials in a MATLAB environment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2013, no. 4, pp. 73-78. (In Russ.)

4. Tomakova R. A., Shatalova O. V., Tomakov M. V. Teoretiko-mnozhestvennyi podkhod i teoriya grafov v obrabotke slozhnostrukturiruemykh izobrazhenii [Set-theoretic approach and graph theory in the processing of complexly structured images]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2012. 119 p. (In Russ.)

5. Petrova T. V., Kuzmin A. A., Savinov D. Yu., eds. Raspredelennye avtonomnye intellektual'nye agenty dlya monitoringa i metaanaliza effektivnosti upravleniya zhivymi sistemami [Distributed Autonomous Intelligent Agents for Monitoring and Meta-Analysis of the Efficiency of Living Systems Management]. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2017, no.4 (40), pp. 61-73. (In Russ.)

6. Filist S. A., Kurochkin A. G., Zhilin V. V., et al. Ispol'zovanie gibridnykh neirosetevykh modelei dlya mnogoagentnykh sistem klassifikatsii v geterogennom prostranstve informativnykh priznakov [Use of hybrid neural network models for multi-agent classifica-

tion systems in a heterogeneous space of informative features]. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii. Nauchno-tekhnicheskii zhurnal = Caspian Journal: Management and High Technologies. Scientific and technical journal*, 2015, no. 3 (31), pp. 85-95. (In Russ.)

7. Filist S. A., Tomakova R. A., Ya Zar Do Universal'nye setevye modeli dlya zadach klassifikatsii biomeditsinskikh dannykh [Universal network models for the classification of biomedical data]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2012, no. 4 (43), pt. 2, pp. 44-50. (In Russ.)

8. Startsev E. A., Shatalova O. V., Uvarova V. V. Dvumernye neirosetevye struktury metaanaliza mediko-ekologicheskikh dannykh [Two-dimensional neural network structures of the metaanalysis of medical and environmental data]. Iskusstvennyi intellekt v reshenii aktual'nykh sotsial'nykh i ekonomicheskikh problem XXI veka. Sb. st. po materialam Vseros. nauch.-prakt. konf. [Artificial Intelligence in solving urgent social and economic problems of the XXI century. Collection articles based on materials from All-Russian scientific-practical conf.]. Perm, Perm. st. national researched Univ. Publ., 2016, pp. 161-164. (In Russ.)

9. Khaikin S. Neironnye seti: polnyi kurs [Neural networks: a full course]. 2th ed. Moscow, I. D. Williams Publ., 2006. 1104 p. (In Russ.)

10. Filist S. A., Shatalova O. V., Efremov M. A. Gibridnaya neironnaya set' s makrosloyami dlya meditsinskikh prilozhenii [Hybrid neural network with macro layers for medical applications]. *Neirokomp'yutery. Razrabotka i primenenie = Neurocomputers. Development and application*, 2014, no. 6, pp. 35-39. (In Russ.)

11. Korenevsky N. A., Filist S. A., Kraskovsky A. B., eds. Teoriya proektirovaniya nechetkikh setevykh ekspertnykh sistem dlya upravleniya mediko-ekologicheskoi bezopasnost'yu [The theory of designing fuzzy network expert systems for managing medical and environmental safety]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika = Scientific reports of Belgorod State University. Series: History. Political science. Economy. Computer science*, 2009, vol. 11, no. 9-1 (64), pp. 146-151. (In Russ.)

12. Zhilin V. V., Filist S. A., Khaled Abdul Rakhim, Shatalova O. V. Sposob modelirovaniya nechetkikh modelei v pakete MATLAB dlya biomeditsinskikh prilozhenii [A method for modeling fuzzy models in the MATLAB package for biomedical applications]. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Technology*, 2008, no. 2, pp. 15-17. (In Russ.)

13. Pozin A. O., Filist S. A., Shutkin A. N., eds. Sintez dopolnitel'nogo informativnogo priznaka dlya neironnoi seti pryamogo rasprostraneniya [Synthesis of an additional informative feature for a direct distribution neural network]. Novye resheniya v oblasti uprochnyayushchikh tekhnologii: vzglyad molodykh spetsialistov. Sbornik nauchnykh statei po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [New solutions in the field of hardening technologies: a look of young specialists. Collection of scientific articles based on

materials of the International Scientific and Practical Conference]. Kursk, ZAO "University Book", 2016, pp. 212-217. (In Russ.)

14. Pozin A. O., Filist S. A., Shutkin A. N. Testiruyushchie gibridnye sistemy s dopolnitel'nym prostranstvom informativnykh priznakov [Testing hybrid systems with an additional space of informative features]. Sovremennye informatsionnye tekhnologii v upravlenii kachestvom. Sbornik statei V Mezhdunarodnoi nauchno-prikladnoi konferentsii [Modern information technologies in quality management. Collection of articles of the V International Scientific and Applied Conference]. Penza, Privolzhskii Dom znanii Publ., 2016, pp. 46-50. (In Russ.)

15. Pozin A. O., Startsev E. A., Uvarova V. V. MGUA-neironnye seti dlya prognozirovaniya sostoyaniya slozhnykh sistem s vremennymi lagami [MGUA-neural networks for predicting the state of complex systems with time lags]. Neiroinformatika, ee prilozheniya i analiz dannykh. Materialy XXIV Vserossiiskogo seminara [Neuroinformatics, its applications and data analysis. Materials of the XXIV All-Russian seminar]. Krasnoyarsk, Institute of Computational Modeling SB RAS Publ., 2016, pp. 50-55. (In Russ.)

16. Kiselev A. V., Petrova T. V., Degtyarev S. V., eds. Neirosetevye moduli s virtual'nymi potokami dlya klassifikatsii i prognozirovaniya funktsional'nogo sostoyaniya slozhnykh sistem [Neural network modules with virtual flows for classification and prediction of the functional state of complex systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 4. pp. 123-134. (In Russ.)

17. Kiselev A. V., Filist S. A., Shatalova O. V., eds. Virtual'nye potoki v gibridnykh reshayushchikh modulyakh klassifikatsii slozhnostrukturiruemykh dannykh [Virtual flows in hybrid decision modules for the classification of complex data]. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2018, no. 2 (42), pp. 137-149. (In Russ.)

18. Smirnova M. D., Fofanova T. V., Ageev F. T., eds. Prognosticheskie faktory razvitiya serdechno-sosudistykh oslozhnenii vo vremya anomal'noi zhary 2010 g. (kogortnoe nablyudatel'noe issledovanie) [Prognostic factors for the development of cardiovascular complications during the abnormal heat of 2010 (cohort observational study)]. *Kardiologicheskii vestnik = Cardiological Proceedings*, 2016, no. 11 (1), pp. 43-51. (In Russ.)

19. Filist S. A., Zhilin V. V., Rakhim K. A., Shatalova O. V. A method for creating fuzzy neural-network models using the matlab package for biomedical applications. *Biomedical Engineering*, 2008, vol. 42, no. 2, pp. 64-66.

20. Filist S. A., Aleksenko V. A., Kuzmin A. A. Bioimpedance skin condition monitoring during therapeutic and cosmetic procedures. *Biomedical Engineering*, 2008, vol. 42, no. 2, pp. 97-99.

Информация об авторах / Information about the Authors

Киселев Алексей Викторович, преподаватель кафедры информационных систем и технологий, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

Aleksey V. Kiselev, Lecturer at the Department of Information Systems and Technologies, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: kiselevalexey1990@gmail.com

Шаталова Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры биомедицинской инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: shatolg@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0901-9272

Olga V. Shatalova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor, Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: shatolg@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0901-9272

Протасова Зейнаб Усама, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: zeinab.zeidan@yandex.ru

Zeynab Osama Protasova, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: zeinab.zeidan@yandex.ru

Филист Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: SFilist@gmail.ru
ORCID: 0000-0003-1358-671X

Sergey A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: SFilist@gmail.ru
ORCID: 0000-0003-1358-671X

Стадниченко Никита Сергеевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: stadnikita@gmail.com

Nikita S. Stadnichenko, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: stadnikita@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 615.8

Ультразвуковая система контроля психофизиологического состояния машиниста поезда

Д. А. Кравчук[1] ✉

[1] Институт нанотехнологий электроники и приборостроения ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» ул. Шевченко, 2, корп. «Е», г. Таганрог, 347922, Российская Федерация

✉ e-mail: kravchukda@sfedu.ru

Резюме

Цель исследования. *Машинист локомотивной бригады выполняет важную и ответственную работу. Работа машиниста локомотива также связана со значительными физическими и умственными нагрузками.*

Для успешного выполнения отдельных операций, связанных с управлением локомотива, необходимо, чтобы все его технические системы были в исправном состоянии. Машинист должен следить за состоянием всех систем локомотива и выполнять работы по техническому обслуживанию, не теряя ни одного момента дорожных условий при движении поезда.

Биолокация физического состояния машиниста предлагается в качестве основы для исследования производительности машиниста. Исследование подчеркивает важность понимания состояния познания водителя в определенное время в конкретной ситуации и конкретном контексте.

Методы. *В работе рассматриваются вопросы биолокации человека с помощью интерференционных методов. Метод биорадиолокации позволяет оценивать интегральную двигательную активность автоматически. При этом приемная и передающая антенны размещены на общем штативе.*

Результаты. *Разработаны структурная схема и алгоритм работы системы для контроля за состоянием машиниста на основе оценки дыхательной функции организма.*

Заключение. *Проведен обзор методов контроля за машинистом (оператором). Установлено, что направление исследования является перспективным и разработанная система контроля требует проведения теоретических и экспериментальных измерений.*

Ключевые слова: *ультразвук; когнитивные функции; безопасность.*

Конфликт интересов*: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Кравчук Д. А., 2020

Для цитирования: Кравчук Д. А. Ультразвуковая система контроля психофизиологического состояния машиниста поезда // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 134–143.

Поступила в редакцию 04.01.2020 *Подписана в печать 31.01.2020* *Опубликована 25.02.2020*

Ultrasonic System for Monitoring the Psychophysiological State of the Train Driver

Denis A. Kravchuk[1] ✉

[1] Institute of nanotechnologies of electronics and instrument engineering of the Southern Federal University
Shevchenko str., 2, korp. «E», Taganrog, 347922, Russian Federation

✉ e-mail: kravchukda@sfedu.ru

Abstract

The purpose of research*. The driver must distribute the orientation of his mental processes to the parallel execution of essentially two different components of activity, each of which, despite their close relationship, in some cases acts as an independent type of activity for the driver.*

For the successful implementation of certain operations associated with driving locomotives, it is necessary that all its technical systems are in good condition. The driver should monitor the condition of the unit and carry out actions for its maintenance, without losing a reference point to the traffic situation even in the movement parameters of the train itself.

The success of the operator-operator is largely due to the subjective state of the operator himself, a combination of objective and subjective moments of his activity.

Methods*. The paper discusses human biolocation using interference methods. The bio-radar method allows you to evaluate the integral motor activity automatically. In this case, the receiving and transmitting antennas are placed on a common tripod.*

Results*. A block diagram and an algorithm of the system for controlling the condition of the driver, based on an assessment of the respiratory function of the body, are developed.*

Conclusion*. A review of control methods for the driver (operator). It has been established that the research direction is promising and the developed control system requires theoretical and experimental measurements.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Kravchuk D. A. Ultrasonic System for Monitoring the Psychophysiological State of the Train Driver. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(1): 134–143. (In Russ.)

Received 04.01.2020 *Accepted 31.01.2020* *Published 25.02.2020*

***

Введение

Разрабатываемая система необходима для наблюдением за машинистом для контроля за качеством его работы. С помощью разрабатываемого устройства оператор может получать сигналы

о том, например, заснул или нет машинист, а в перспективе получать данные о его физиологических параметрах, не надевая на него никаких дополнительных устройств.

В настоящее время используются системы видеослежения, такие как Ethovision, но они предполагают наличие большую нагрузку на оператора, осуществляющего наблюдение и сложность автоматизации оценки двигательной активности. Также немаловажный недостаток такой системы – это большой объем записываемой информации, и соответственно анализ такого видеосигнала требует использования сложных алгоритмов обработки.

Определение уровня когнитивного функционирования (например, невнимательность, сонливость) является основой для предотвращения дорожно-транспортных происшествий. Исследователи в области безопасности дорожного движения постоянно работают над методами улучшения характеристик вождения путем оценки когнитивных состояний, таких как нагрузка на машиниста, невнимательность и усталость [1].

Поездная работа машиниста предъявляет высокие требования к работоспособности различных анализаторных систем организма. Это, прежде всего, относится к функции зрительного, двигательного и слухового анализаторов. Работа машиниста очень сложна и невероятно ответственна. Поэтому было бы неплохо иметь систему, которая позволит контролировать поведение машиниста.

Материалы и методы

Разрабатываемое устройство регистрирует движения грудной клетки при дыхании. При радиолокационном обнаружении дыхания человека расстояние между радаром и объектом не меняется. Это означает, что регистрируемый сигнал от дыхания всегда появляется в постоянный момент времени. Это значит, что он будет отличаться от шумовых помех. Согласно теории информации, энтропия является естественным подходом для измерения степени упорядоченности сигнала по спектру энтропии [2; 3; 4; 5; 6]. Предполагается, что амплитуда энтропии дыхания и шума будет иметь определенную разницу. Кроме того, в результате того, что радиолокационный эхо-сигнал дыхания человека является нестационарным, будем использовать вейвлет-преобразование для анализа сигнала дыхания при частотно-временном разложении. Fugui Qi et al. также использовалась вейвлет-энтропия для обнаружения апноэ в дыхательном сигнале обструктивного апноэ сна с помощью биорадара, при этом результаты наблюдения показали, что значение энтропии апноэ выше, чем у нормального дыхания [3; 4; 5; 6; 7]. Во всем вышеперечисленном вейвлет-энтропия применялась для различения, нормального дыхания и апноэ с помощью частотно-временной характеристики человеческого дыхания [8; 9; 10; 11; 12].

Разрабатываемая система необходима для наблюдения за машинистом и контроля его работы. С помощью разрабатываемого устройства можно будет получать сигналы о том, например, заснул или нет машинист, а в перспективе получать данные о его физиологических параметрах, не надевая на него никаких дополнительных устройств [13; 14; 15; 16].

Для решения поставленной задачи необходимо начинать с физиологии, а точнее от частоты движений человека, занимающегося монотонной работой [16; 17; 18; 19; 20]. Разработанная схема ультразвуковой системы контроля за машинистом приведена на рисунке 1. Схему приемника следует составить таким образом: первый блок – это преобразователь аналогового сигнала в цифровой (принимаемый сигнал), далее следует использовать усилитель (т. к. затухание звука в воздухе очень велико). Следующий блок – фазовый детектор, который будет отвечать за однородность выборки, потом фильтр полосовых частот (для более точного результата, чтобы убрать шумы рельсового транспорта или случайной помехи). Далее – детектор-формирователь, который будет сглаживать получаемый сигнал для более реалистичной картины, и последнее – устройство индикации (рис.).

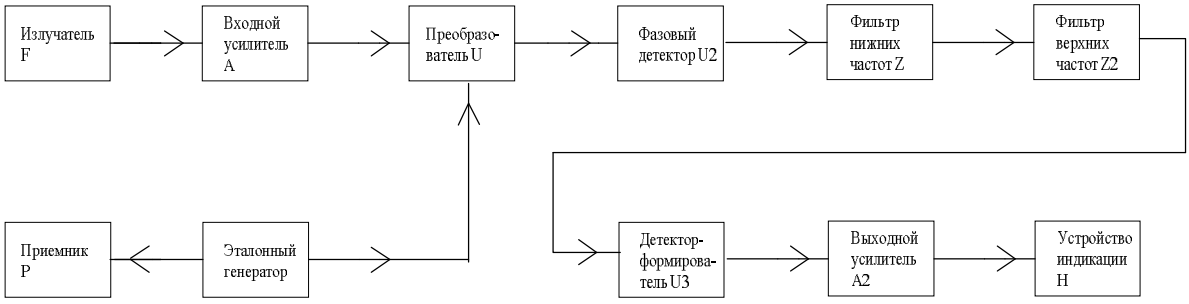

Рис. Структурная схема ультразвукового датчика

Fig. Block diagram of an ultrasonic sensor

В структуру ультразвукового датчика входят следующие блоки: излучатель F1; приемник P1; эталонный генератор G1; входной усилитель A1; преобразователь U1; фазовый детектор U2; фильтр нижних частот Z1; фильтр верхних частот Z2; детектор-формирователь U3; выходной усилитель A2; устройство индикации HI. Частоту излучения преобразователя выберем с учетом помехоустойчивости и затухания ультразвуковых колебаний в воздухе в пределах 30 кГц.

Первоначально записанный отрезок инферограммы (длительностью в 5-7 секунд) сохраняется в памяти как эталонный. Через две минуты записывается следующий (он сохраняется в оперативной памяти ПК) и сравнивается с эталонным. По принципу вычитания:

если результат равен нулю, значит, интерференционная картина не поменялась, если нет – цикл повторяется: предыдущий отрезок, прошедший контроль на несовпадения, записывается на место эталонного и так бесконечно, до совпадения или конца работы системы. Для более точной работы системы следует сравнивать отрезки длительностью в 5-7 секунд (повышает точность), которые записываются раз в минуты с учетом изменяющейся интерференционной картины.

Результаты и их обсуждение

Использование фокусирующих систем для формирования звукового изображения накладывает ряд сложностей, связанных разрешающей способностью по сравнению с оптическими методами. Для исключения интерференционных явлений необходимо использовать импульсный режим излучения, но при этом возникают искажения, аналогичные хроматическим аберрациям в световой оптике.

Психофизиологические исследования состояния человека достигли огромного прогресса в разработке методов количественной оценки когнитивных процессов. Исследование состояния машиниста – отличное применение психофизиологических методов для понимания и интерпретации того, как люди взаимодействуют с автоматизацией в естественных условиях, что, в свою очередь, может помочь интеллектуальным системам повысить эффективность и безопасность вождения. В работе приведена схема построения ультразвуковой системы наблюдения за машинистом.

Выводы

В работе авторы рассмотрели методы слежения за машинистом, включая методы биолокации, на основе которых можно наблюдать за машинистом и контролировать его работу. Разрабатываемое устройство будет получать сигналы о физиологическом состоянии машиниста без использования устройств, надетых на машиниста.

Список литературы

1. Старченко И. Б., Хроматиди А.Ф. Экспериментальные исследования эмоциональных признаков речи // Известия ТРТУ. 2004. № 6 (41). С. 127-130.

2. Shannon C. E. A mathematical theory of communication // Bell. Syst. Tech. J. 1948. No. 27. P. 379–423.

3. Qi F., Li C., Lu G. Contact-free detection of obstructive sleep apnea based on wavelet information entropy spectrum using bio-radar // Entropy. 2016. No. 18. P. 306.

4. Биорадиолокация: монография / под ред. А. С. Бугаева, С. И. Ивашова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 400 с.

5. Ивашов С. И., Бугаев А. С. Обеспечение безопасности перевозок с помощью средств дистанционного зондирования // Мир транспорта. 2018. Т. 16, № 4. С. 180-192.

6. Anishchenko L., Alekhin M., Ivashov S. Bioradiolocation: Methods and Applications // Biomedical Informatics and Technology / ed. by T. D. Pham [et al.]. Heidelberg: Springer, 2014. pp. 10-28.

7. Evaluation of sleep disordered breathing using non-contact remote bio-radiolocation method / M. D. Alekhin, L. N. Anishchenko, A. V. Zhuravlev, S. I. Ivashov, L. S. Korostovtseva, Y. V Sviryaev // Sleep Medicine. 2013. Vol. 14. P. 58.

8. Исследование диагностической информативности биорадиолокационной пневмографии в бесконтактном скрининге синдрома апноэ во сне / М. Д. Алёхин, Л. Н. Анищенко, А. В. Журавлев, С. И. Ивашов, Л. С. Коростовцева, Ю. В. Свиряев, А. О. Конради, В. Б. Парашин, А. В. Богомолов // Медицинская техника. 2013. № 2. С. 36-38.

9. Алёхин М. Д., Анищенко Л. Н., Корчагина Д. А. Метод биорадиолокации в анализе перемещений грудной клетки при спокойном дыхании // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 10. С. 56-61.

10. Бесконтактное автоматизированное выявление агрессивного поведения человека при помощи многоканального комплекса / Л. Н. Анищенко, А. В. Журавлев, В. В. Разевиг, М. А. Чиж // Биомедицинская радиоэлектроника. 2019. № 6. С. 61–70. DOI: 10.18127/j15604136-201906-10

11. Анищенко Л. Н., Васильев И. А., Чиж М. А. Радиолокатор ближнего действия с непрерывным излучением для исследования биологических объектов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. № 6. С. 20-24. DOI: 10.18127/j15604128-201806-03

12. Анищенко Л. Н., Турецкая А. В. Программно-аппаратный комплекс для бесконтактной оценки психофизиологического состояния человека // Биомедицинская радиоэлектроника. 2018. № 10. С. 61–66. DOI: 10.18127/j15604136-201810-11

13. Старченко И. Б., Тимошенко В. И., Хроматиди А. Ф. Построение моделей речевых сигналов и их анализ с точки зрения эмоционального состояния человека // Известия ТРТУ. 2000. № 4 (18). С. 42-48.

14. Кириченко И. И., Кириченко И. А., Чернов Н. Н. Выделение фонем в речевом сигнале // Экология, проблемы приморских территорий: сборник трудов Всероссийской молодежной школы-семинара / Южный федеральный университет. Таганрог, 2015. С. 126-131.

15. Кириченко И. А., Бондаренко Р. П. Биотехническая система для аудиометрии с нелинейным преобразованием речевого сигнала // Известия ТРТУ. 2006. № 11 (66). С. 160-161.

16. Starchenko I., Khromatidi A. Experimental investigation of speech emotional features // Forum Acusticum Budapest 2005: 4th European Congress on Acustics. 2005. P. 2719-2723.

17. Старченко И. Б., Хроматиди А. Ф. Комплексная БТС анализа психофизиологического состояния человека // Известия ТРТУ. 1998. № 4 (10). С. 26-28.

18. Кириченко И. А., Кириченко И. И., Чернов Н. Н. Статистическая обработка речевого сигнала // Информационные технологии, системный анализ и управление – ИТСАИУ-2013: сборник трудов XI Всероссийской научной конференции молодых ученых аспирантов и студентов / Южный федеральный университет. Ростов н/Д, 2013. С. 159-160.

19. Кумова Д. М., Кириченко И. И. Алгоритм определения типа тимпанограмм // Инновации и перспективы медицинских информационных систем ИМПИС-2016: сборник трудов V Всероссийской школы-семинара / Южный федеральный университет. Ростов н/Д, 2016. С. 43-46.

20. Рангайян Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход: [пер. с англ.] / под ред. А. П. Немирко. М.: Физматлит, 2007. 440 с.

References

1. Starchenko I. B., Khromatidi A. F. Eksperimental'nye issledovaniya emotsio-nal'nykh priznakov rechi [Eksperimental'nye issledovaniya emocional'nyh priznakov rechi]. *Izvestiya TRTU = Izvestiya TRTU*, 2004, no. 6 (41), pp. 127-130. (In Russ.)

2. Shannon C. E. A mathematical theory of communication. *Bell. Syst. Tech. J.*, 1948, no. 27, pp. 379–423.

3. Qi F., Li C., Lu G. Contact-free detection of obstructive sleep apnea based on wavelet information entropy spectrum using bio-radar. *Entropy*, 2016, no. 18, pp. 306.

4. Bioradiolokatsiya [Bioradiolokaciya]; ed. by A. C. Bugaeva, S. I. Ivashova. Moscow, Bauman Moscow st. techn. Univ. Publ., 2018, p. 400. (In Russ.)

5. Ivashov S. I., Bugaev A. S. Obespechenie bezopasnosti perevozok s pomoshch'yu sredstv distantsionnogo zondirovaniya [Obespechenie bezopasnosti perevozok s pomoshch'yu sredstv distancionnogo zondirovaniya]. *Mir transporta = Mir transporta*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 180-192. (In Russ.)

6. Anishchenko L., Alekhin M., Ivashov S. Bioradiolocation: Methods and Applications. Biomedical Informatics and Technology; ed. by T. D. Pham, eds. Heidelberg, Springer, 2014, pp. 10-28.

7. Alekhin M. D., Anishchenko L. N., Zhuravlev A. V., Ivashov S. I., Korostovtseva L. S., Sviryaev Y. V. Evaluation of sleep disordered breathing using non-contact remote bio-radiolocation method. *Sleep Medicine*, 2013, vol. 14, pp. 58.

8. Alyohin M. D., Anishchenko L. N., ZHuravlev A. V., Ivashov S. I., Korostovceva L. S., Sviryaev Yu. V., Konradi A. O., Parashin V. B., Bogomolov A. V. Issledovanie diagnosticheskoi informativnosti bioradiolokatsionnoi pnevmografii v beskontaktnom skrininge sindroma apnoe vo sne [Issledovanie diagnosticheskoj informativnosti bioradiolokacionnoj pnevmografii v beskontaktnom skrininge sindroma apnoe vo sne]. *Meditsinskaya tekhnika = Medicinskaya tekhnika*, 2013, no. 2, pp. 36-38. (In Russ.)

9. Alyohin M. D., Anishchenko L. N., Korchagina D. A. Metod bioradiolokatsii v analize peremeshchenii grudnoi kletki pri spokoinom dykhanii [Metod bioradiolokacii v analize peremeshchenij grudnoj kletki pri spokojnom dyhanii]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedicinskaya radioelektronika*, 2009, no. 10, pp. 56-61. (In Russ.)

10. Anishchenko L. N., Zhuravlev A. V., Razevig V. V., Chizh M. A. Beskontaktnoe avtomatizirovannoe vyyavlenie agressivnogo povedeniya cheloveka pri pomoshchi mnogokanal'nogo kompleksa [Beskontaktnoe avtomatizirovannoe vyyavlenie agressivnogo povedeniya cheloveka pri pomoshchi mnogokanal'nogo kompleksa]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedicinskaya radioelektronika*, 2019, no. 6, pp. 61–70. (In Russ.) doi: 10.18127/j15604136-201906-10

11. Anishchenko L. N., Vasil'ev I. A., Chizh M. A. Radiolokator blizhnego deistviya s nepreryvnym izlucheniem dlya issledovaniya biologicheskikh ob"ektov [Radiolokator blizhnego dejstviya s nepreryvnym izlucheniem dlya issledovaniya biologicheskih ob"ektov]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2018, no. 6, pp. 20-24. (In Russ.) doi: 10.18127/j15604128-201806-03

12. Anishchenko L. N., Tureckaya A. V. Programmno-apparatnyi kompleks dlya beskontaktnoi otsenki psikhofiziologicheskogo sostoyaniya cheloveka [Programmno-apparatnyj kompleks dlya beskontaktnoj ocenki psihofiziologicheskogo sostoyaniya cheloveka]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedicinskaya radioelektronika*, 2018, no. 10, pp. 61–66. (In Russ.) doi: 10.18127/j15604136-201810-11.

13. Starchenko I. B., Timoshenko V. I., Hromatidi A. F. Postroenie modelei re-chevykh signalov i ikh analiz s tochki zreniya emotsional'nogo sostoyaniya cheloveka [Postroenie modelej rechevyh signalov i ih analiz s tochki zreniya emocional'nogo sostoyaniya cheloveka]. *Izvestiya TRTU = Izvestiya TRTU*, 2000, no. 4 (18), pp. 42-48. (In Russ.)

14. Kirichenko I. I., Kirichenko I. A., Chernov N. N. Vydelenie fonem v rechevom signale [Vydelenie fonem v rechevom signale]. Ekologiya, problemy primorskikh territorii. Sbornik trudov Vserossiiskoi molodezhnoi shkoly-seminara [Ekologiya, problemy primorskih territorij. Sbornik trudov Vserossijskoj molodezhnoj shkoly-seminara]. Taganrog, Southern federal Univ. Publ., 2015, pp. 126-131. (In Russ.)

15. Kirichenko I. A., Bondarenko R. P. Biotekhnicheskaya sistema dlya audiometrii s nelineinym preobrazovaniem rechevogo signala [Biotekhnicheskaya sistema dlya audi-

ometrii s nelinejnym preobrazovaniem rechevogo signala]. *Izvestiya TRTU = Izvestiya TRTU*, 2006, no. 11 (66), pp. 160-161. (In Russ.)

16. Starchenko I., Khromatidi A. Experimental investigation of speech emotional features. Forum Acusticum Budapest 2005: 4th European Congress on Acustics, 2005, pp. 2719-2723.

17. Starchenko I. B., Hromatidi A. F. Kompleksnaya BTS analiza psikhofiziologicheskogo sostoyaniya cheloveka [Kompleksnaya BTS analiza psihofiziologicheskogo sostoyaniya cheloveka]. *Izvestiya TRTU = Izvestiya TRTU*, 1998, no. 4 (10), pp. 26-28. (In Russ.)

18. Kirichenko I. A., Kirichenko I. I., CHernov N. N. Ctatisticheskaya obrabotka rechevogo signala [Ctatisticheskaya obrabotka rechevogo signala]. Informatsionnye tekhnologii, sistemnyi analiz i upravlenie – ITSAIU-2013. Sbornik trudov XI Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh aspirantov i studentov [Information technologies, system analysis and management-ITSAIU-2013. Proceedings of the XI all-Russian scientific conference of young scientists, postgraduates and students]. Rostov-on-Don, Southern federal Univ. Publ., 2013, pp. 159-160. (In Russ.)

19. Kumova D. M., Kirichenko I. I. Algoritm opredeleniya tipa timpanogramm [Algoritm opredeleniya tipa timpanogramm]. Innovatsii i perspektivy meditsinskikh informatsionnykh sistem IMPIS-2016. Sbornik trudov V Vserossiiskoi shkoly-seminara [Innovations and prospects of medical information systems IMPIS-2016. Proceedings of the V all-Russian school-seminar]. Rostov-on-Don, Southern federal Univ. Publ., 2016, pp. 43-46. (In Russ.)

20. Rangajyan R. M. Analiz biomeditsinskikh signalov. Prakticheskii podkhod. [Analiz biomedicinskih signalov. Prakticheskij podhod]; ed. by A. P. Nemirko. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 440 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Кравчук Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент, Институт нанотехнологий электроники и приборостроения ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Таганрог, Российская Федерация
e-mail: kravchukda@sfedu.ru
ORCID: 0000-0003-0656-8919

Denis A. Kravchuk, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Institute of Nanotechnologies of Electronics and Instrument Engineering of the Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation
e-mail: kravchukda@sfedu.ru
ORCID: 0000-0003-0656-8919

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.93.12

Алгоритм аппроксимации многоэкстремальных функций для оценки результатов мониторинга гликемии

Т. В. Истомина[1] ✉, Е. В. Петрунина[1], Е. В. Копылова[2]

[1] Московский государственный гуманитарно-экономический университет
ул. Лосиноостровская, 49, г. Москва, 107150, Российская Федерация

[2] ООО «Торговый дизайн»
Старопетровский проезд 11, корп. 1, г. Москва, 125130, Российская Федерация

✉ e-mail: istom@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *В статье рассматриваются вопросы построения алгоритмических, программных и информационных средств анализа, прогнозирования и профилактики заболеваний, связанных с гликемией. Одним из важных направлений в этой области является мониторинг параметров эндокринной и сердечно-сосудистой систем. Развитие компьютерных технологий, современных методов цифровой обработки данных и актуальность клинических задач диагностики обусловили качественное усовершенствование этапов скрининга и мониторинга в медицине за счет формализации логики врача и применения статистически обоснованных алгоритмов интеллектуального анализа. Цель работы заключается в разработке алгоритма аппроксимации многоэкстремальных функций для оценки результатов мониторинга гликемии, обеспечивающего повышение эффективности оценки динамики измеряемых параметров и прогнозирования течения сахарного диабета.*

Методы. *В ходе исследований проведен анализ современного состояния научно-методических разработок в области мониторинга гликемии. При обработке экспериментальных данных используются различные математические методы сжатия информации, такие как аппроксимация полиномами, функциями специального вида, методы, основанные на применении искусственных нейронных сетей, эволюционных алгоритмов и т. д. Реализовано математическое моделирование результатов мониторинга гликемии методом аппроксимации многоэкстремальных функций с целью развития информационного обеспечения систем поддержки принятия решений врача.*

Результаты*. В данной работе предлагается алгоритм аппроксимации многоэкстремальных функций для оценки результатов мониторинга гликемии, работа которого нацелена на повышение эффективности оценки динамики измеряемых параметров и прогнозирования течения сахарного диабета и сопутствующих ему сердечно-сосудистых заболеваний.*

Заключение. *Практические результаты заключаются в разработке алгоритма аппроксимации многоэкстремальных функций для оценки результатов мониторинга гликемии с целью повышения эффективности анализа течения и прогноза развития сахарного диабета и сопутствующих ему сердечно-сосудистых заболеваний.*

Ключевые слова*: алгоритм аппроксимации многоэкстремальных функций; сахарный диабет; оценка внутрисуточной гликемии; результаты мониторинга гликемии.*

© Истомина Т. В., Петрунина Е. В., Копылова Е. В., 2020

***Конфликт интересов**: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

Для цитирования: Истомина Т. В., Петрунина Е. В., Копылова Е. В. Алгоритм аппроксиммации многоэкстремальных функций для оценки результатов мониторинга гликемии // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 143–156.

Поступила в редакцию 20.12.2019 *Подписана в печать 20.01.2020* *Опубликована 25.02.2020*

Algorithm of Approximation of Multiextremal Functions for Evaluation of the Results Monitoring of Glycemia

Tatyana V. Istomina[1] ✉, Elena V. Petrunina[1], Elena V. Kopylova[2]

[1] Moscow State Humanities and Economic University
Losinoostrovskaya str., 49, Moscow, 107150, Russian Federation

[2] Trade design JSC
Staropetrovsky passage, 11- 1, Moscow, 125130, Russian Federation

✉ e-mail: istom@mail.ru

Abstract

***Purpose of research**. The article deals with the construction of algorithmic, software and information tools for analysis, forecasting and profiling of diseases associated with glycemia. One of the important directions in this area is monitoring the parameters of the endocrine and cardiovascular systems. The development of computer technologies, modern methods of digital data processing and the relevance of clinical diagnostic tasks have led to qualitative improvement of screening and monitoring stages in medicine by formalizing the doctor's logic and using statistically based algorithms for intellectual analysis. The purpose of this work is to develop an algorithm for approximating multi-extreme functions to evaluate the results of glycemic monitoring, which provides an increase in the effectiveness of evaluating the dynamics of the measured parameters and predicting the course of diabetes.*

***Methods.** In the course of the research, an analysis of the current state of scientific and methodological developments in the field of glycemic monitoring was carried out. When processing experimental data, various mathematical methods of information compression are used, such as approximation by polynomials, special-type functions, methods based on the use of artificial neural networks, evolutionary algorithms, etc. Mathematical modeling of the results of glycemic monitoring using the method of approximation of multi-extreme functions is implemented in order to develop information support for decision-making systems of a doctor.*

***Results.** In this paper, we propose an algorithm for approximating multiex-tremal functions to evaluate the results of glycemic monitoring, which is aimed at improving the efficiency of evaluating the dynamics of the measured parameters and predicting the course of diabetes mellitus and associated cardiovascular diseases.*

***Conclusion.** Practical results include the development of an algorithm for AP-proximation of multi-extreme functions to evaluate the results of glycemia monitoring in order to improve the effectiveness of analysis of the course and prognosis of diabetes mellitus and associated cardiovascular diseases.*

***Keywords:** algorithm for approximation of multi-extreme functions; diabetes mellitus; assessment of intra-day glycemia; results of glycemia monitoring.*

***Conflict of interest:** The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Istomina T. V., Petrunina E. V. Kopylova E. V. Algorithm of Approximation of Multiextremal Functions for Evaluation of the Results Monitoring of Glycemia. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(1): 143–156. (In Russ.)

Received 20.12.2019 *Accepted 20.01.2020* *Published 25.02.2020*

***

Введение

Ишемическая болезнь сердца является основной причиной смерти в смерти в РФ, Соединенных Штатах, Европе и в большинстве промышленно развитых странах мира [1; 2]. Раннее обнаружение имеет решающее значение для эффективного лечения данного заболевания. Показатели выживания свидетельствуют о том, что положительная динамика состояния наблюдается, если лечение начинается в течение первого часа после сердечного приступа [3; 4], что подтверждает необходимость точной и своевременной диагностики.

Сахарный диабет является одним из наиболее распространенных заболеваний в мире. По данным международных исследований [5; 6; 7], пациенты, страдающие сахарным диабетом, находятся в зоне повышенного риска развития сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ). В современных исследованиях достаточно освещен вопрос влияния краткосрочной вариабельности глюкозы в плазме натощак (FPG) на возможность появления ССЗ [5], в то время как установление взаимосвязи между вариабельностью FPG на протяжении длительных периодов наблюдения и сердечно-сосудистыми заболеваниями остается актуальной задачей для клинической диагностики.

Целью исследований является разработка алгоритма аппроксимации результатов мониторинга гликемии, позволяющего повысить эффективность оценки динамики измеряемых параметров и прогнозирования развития сахарного диабета, который может быть положен в основу создания прототипа системы поддержки принятия решений (СППР) врача.

Анализ современного состояния предметной области и постановка задачи

Развитие современных средств превентивного обследования и профилактической диагностики ССЗ обусловило разработку эффективных методов мониторинга и управления уровнем глюкозы в плазме натощак (FPG). Современные исследования подтверждают влияние чрезмерно высокого или низкого уровня глюкозы, частые гипогликемические или гипергликемические эпизоды на вероятность появления ССЗ [6; 7] наряду с такими основными причинами сердечно-сосудистых заболеваний, как хроническая гипергликемия или другие традиционные факторы риска.

Независимо от среднего значения FPG и других исходных параметров, повышенная вариабельность FPG между замерами значительно увеличивает риск сердечно-сосудистых заболеваний. Измерение долгосрочной вариабельности FPG полезно для прогнозирования риска ССЗ [5].

Мониторинг гликемии дает наглядное общее представление о значениях и колебании уровня глюкозы пациента в конкретной точке измерения, относится к классу сложных задач, обусловленных поиском решений в условиях неопределенностей различного характера, связанных с недостоверностью либо неоднозначностью или неполнотой результатов измерений.

В процессе проектирования прикладных систем поддержки принятия решений врача при создании алгоритмов обработки экспериментальной биомедицинской информации часто возникает необходимость представления в сжатой форме эмпирических зависимостей между параметрами, описывающих поведение сверхсложных биологических систем и представляющих собой многоэкстремальные функции (МЭФ).

Проделанный анализ результатов мониторинга гликемии позволяет сделать вывод о соответствии их графических представлений классу МЭФ, а также о перспективности исследований с целью разработки эффективных алгоритмов аппроксимации этих функций, которые позволят повысить эффективность оценки результатов и прогнозов.

Материалы и методы

Сжатие информации в современной математике осуществляется с помощью различных методов аппроксимации экспериментальных данных, таких как аппроксимация полиномами [8] функциями специального вида, радиально-базисными функциями (РБФ), нейронными сетями, эволюционными алгоритмами [9] и т. д.

Аппроксимационные схемы с использованием РБФ популярны [8] и широко используются на практике благодаря быстрой сходимости, однако традиционные схемы могут привести к высоким вычислительным требованиям при аппроксимации на больших объемах обучающих данных. Эволюционные алгоритмы способны найти оптимальное решение и характеризуются эффективным поиском аппроксимационного решения на большом объеме данных, а также высокой точностью аппроксимации. Однако следует отметить, что построение таких аппроксимационных схем требует тщательного подбора фитнес-функций и хромосом [9].

Для рассматриваемого класса экспериментальных данных предлагается алгоритм аппроксимации МЭФ с использованием базовых функций.

Необходимо отметить, что каждая МЭФ может быть представлена как суперпозиция функций [10; 11], имеющих знакопеременные экстремумы плюс не-

которая константа Δ, т. е. если $f(\bar{x}) \in [\bar{C}]^m$, где $[\bar{C}]^m$ – класс функций, имеющих m экстремумов, а $\bar{x}$ – обобщенная координата, то

$$f(\bar{x}) = f_1(\bar{x}) + f_2(\bar{x}) + \ldots + \\ + f_i(\bar{x}) + \ldots + f_\nu(\bar{x}) + \Delta,$$

где $f_i(\bar{x}) \in [\bar{C}]^{m_{\nu i}}$, причем $m > m_1 > m_2 > \ldots > m_2 > \ldots > m_\nu$.

Далее для каждого из слагаемых $f_i(\bar{x})$, $(i = \overline{1,\nu})$ строим интерполирующий в экстремумах $f(\bar{x})$ и в полях $f'(\bar{x})$ получаем многочлен

$$\varphi_i(\bar{x}) = \sum_{k=1}^{m_i} a_k^{(i)} \psi\left[b_k^{(i)}\left(\bar{x} - c_k^{(i)}\right)\right].$$

Сумму $\overleftrightarrow{f}_0(\bar{x}) = \sum_{i=1}^{\nu} \varphi_i(\bar{x})$ принимаем за нулевое приближение к $f(\bar{x})$, т. е. будем иметь

$$f(\bar{x}) = \overleftrightarrow{f}_0(\bar{x}) + E_0(\bar{x}).$$

При заданной погрешности приближения (в той или иной метрике) изучается разность

$$E_0(\bar{x}) = f(\bar{x}) - \overleftrightarrow{f}_0(\bar{x}).$$

Если окажется, что $\|E_0(\bar{x})\| \le \Delta$, то задача решена и $\overleftrightarrow{f}_0(\bar{x})$ есть требуемое приближение. Если же $\|E_0(\bar{x})\| > \Delta$, то с функцией $E_0(\bar{x})$ поступаем так же, как и с $f(\bar{x})$. В результате получим $E_0(\bar{x}) = \overleftrightarrow{f}_1(\bar{x}) + E_1(\bar{x})$, следовательно:

$$f(\bar{x}) = \overleftrightarrow{f}_0(\bar{x}) + \overleftrightarrow{f}_1(\bar{x}) + E_1(\bar{x}).$$

Затем вновь получаем разность

$$E_1(\bar{x}) = f(\bar{x}) - \overleftrightarrow{f}_0(\bar{x}) - \overleftrightarrow{f}_1(\bar{x})$$

и т. д., пока не окажется на некотором шаге $|E_m(\bar{x})| \le \Delta$, где n – шаг ускоренного последовательного приближения.

Таким образом, весь процесс приближения состоит из последовательных операций:

– разложение функции из класса $[\bar{C}]^m$ на сумму функций из $[\bar{C}]^\nu$;

– локальной аппроксимации (интерполяции по Эрмиту) этих функций в экстремумах;

– определение и анализ погрешностей приближенных вычислений.

В качестве пространства основных функций рассматривается множество ψ_α бесконечно дифференцируемых положительных, четных, монотонно убывающих $(x > 0)$, вещественных функций, имеющих единственный ноль первой производной.

Основной задачей в рассматриваемом подходе является задача организации эффективных итерационных процедур для построения локальной аппроксимации в экстремумах по заданным абсциссам и ординатам экстремумов.

Итак, пусть $\bar{X} = \{x_1, \ldots, x_N\}$, $\bar{Y} = \{y_1, \ldots, y_N\}$ – множества абсцисс и ординат экстремумов функции $f(x) \in [\bar{C}]^N_{(\bar{x},\bar{y})}$. Из условия аппроксима-

ции экстремумов $f(x)$ комплектами вида

$$\varphi(x)=\sum_{i=1}^{m}\bar{y}_i\psi[\beta_i(x-x_i)],$$

где $\bar{X}^*=\{x_1,\dots,x_m\}$, $\bar{Y}=\{y_1,\dots,y_m\}$, $\bar{B}=\{\beta_1,\dots,\beta_m\}$ – вектора, подлежащие определению, получим систему $2n$ с $3m$ неизвестными:

$$\begin{cases}\varphi(x_j)=y_j,\\ \varphi'(x_j)=0\end{cases}$$

или

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{u}\bar{y}_i\psi\left[\beta_i\left(x_j-\bar{x}_i\right)\right]=y_i,\\ \sum_{i=1}^{m}\beta_i\bar{y}_i\lambda\left[\beta_i\left(x_j-\bar{x}_i\right)\right]\psi\left[\beta_i\left(x_j-\bar{x}_i\right)\right]=0,\end{cases}\quad(1)$$

где $\lambda(x)$ – логарифмическая производная функции $\psi(x)$; $j=1, 2, \dots, m$.

С очевидными обозначениями систему (1) перепишем в виде

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{m}\dot{y}_i\psi_{ji}=y_i,\\ \sum_{i=1}^{m}\beta_i\bar{y}_i\lambda_i\psi_{ji}=0, j=1,2,\dots,m.\end{cases}$$

При этом решать систему можно лишь, задав один из векторов $\bar{X}^*,\bar{Y}^*,\bar{B}$. Логически возможны следующие случаи:

1. Положить известным вектор $\bar{X}^*$ и решать систему относительно векторов $\bar{Y}^*,\bar{B}$.

2. Положить известным вектор $\bar{Y}^*$ и решать систему относительно векторов $\bar{X}^*,\bar{B}$.

3. Положить известным вектор $\bar{B}$ и решать относительно векторов $\bar{X}^*,\bar{Y}^*$. В качестве функций специального вида представлены функции Гаусса, Лоренса, дробно-рациональные функции и т. д.

В данном исследовании в качестве базовой функции применяется функция Гаусса:

$$\varphi_g=\frac{a_1}{e^{a_3(x0-a_2)^2}}.$$

Необходимо получить матрицу значений параметров, при подстановке которых в соответствующую функцию в результате будет получено исходное значение функции в точке.

Первоначальные данные представлены вектором значений и аргументов функции $\varphi(x_1,x_2,\dots,x_n)$, где $x-$ аргумент; $n-$ количество аргументов. Каждая $\varphi=\sum_{i=1}^{n}f_i$, а $f_i=F(p_1,p_2,\dots,p_m)$, где $F-$ одна из набора функций специального вида; $m=n+2-$ количество параметров.

Результатом работы программы является таблица, в которой содержатся следующие данные: входные данные, расчетная функция, результирующее значение, промежуточные данные на каждую итерацию алгоритма (параметры целевой функции, разницы результирующих значений).

Результаты и их обсуждение

Алгоритмическая схема аппроксимации мониторинга экспериментальных данных заключается в подборе параметров с использованием «жадного» алгоритма, при этом на каждом шаге ал-

горитма будет определяться локально-оптимальный результат.

Предлагаемый алгоритм подбора параметров жадным методом включает следующие этапы.

1. Инициализация параметров:

а) количество данных (count);

б) функция аппроксимации (num);

в) точность (e);

2. Главный цикл (количество проходов ограничено количеством точек данных):

а) поиск экстремума функции (наибольшего/наименьшего значения из набора данных и его координаты);

б) задание параметров итерации:

a1 – значение экстремума;

a2 – координата экстремума;

a3 – подбираемый параметр;

в) цикл подбора параметра a3 (количество проходов ограничено точностью вычислений).

Работа нацелена на создание и экспериментальное исследование программного и информационного обеспечения СППР врача по результатам мониторинга гликемии для превентивного обследования и профилактической диагностики СЗЗ населения и особенно лиц с ограниченными возможностями.

Поиск эффективных способов мониторинга и профилактики СД и ССЗ несомненно, актуален, так как предупредительные меры могут позволить избежать развития заболевания, сохранив трудоспособность пациента, предупредить прогрессирование патологического процесса, что в свою очередь позволит уменьшить затраты на лечение, сохранить качество жизни и увеличить продолжительности жизни.

Достижения современной лабораторной и инструментальной диагностики привели к тому, что анализ состояния углеводного обмена включает не только определение HbA1c (гликозилированный или гликированный гемоглобин), показатели глюкозы плазмы натощак (ГПН) и через 2 часа после еды (ППГ), но и непрерывное мониторирование вариабильности глюкозы на основе оценки внутрисуточной гликемии (ВГ).

Авторами предложен метод интеллектуального анализа гликемии, основанный на применении жадного алгоритма и МЭФ-аппроксимации экспериментальных данных, полученных с помощью системы постоянного мониторирования гликемии Medtronic REAL-Time (MMT 722, фирма Medtronic, США). Мониторинга проводился каждые 5 минут на протяжении 7 дней.

Гликемический профиль дает полное представление об изменении концентрации сахара в плазме крови на протяжении суток. Существуют стандартные правила, определяющие последовательность забора крови при проведении анализа [12]. Пример графика результатов мониторинга гликемии, зафиксированных системой Medtronic REAL-Time MMT 722 в течение суток, представлен ниже (рис. 1).

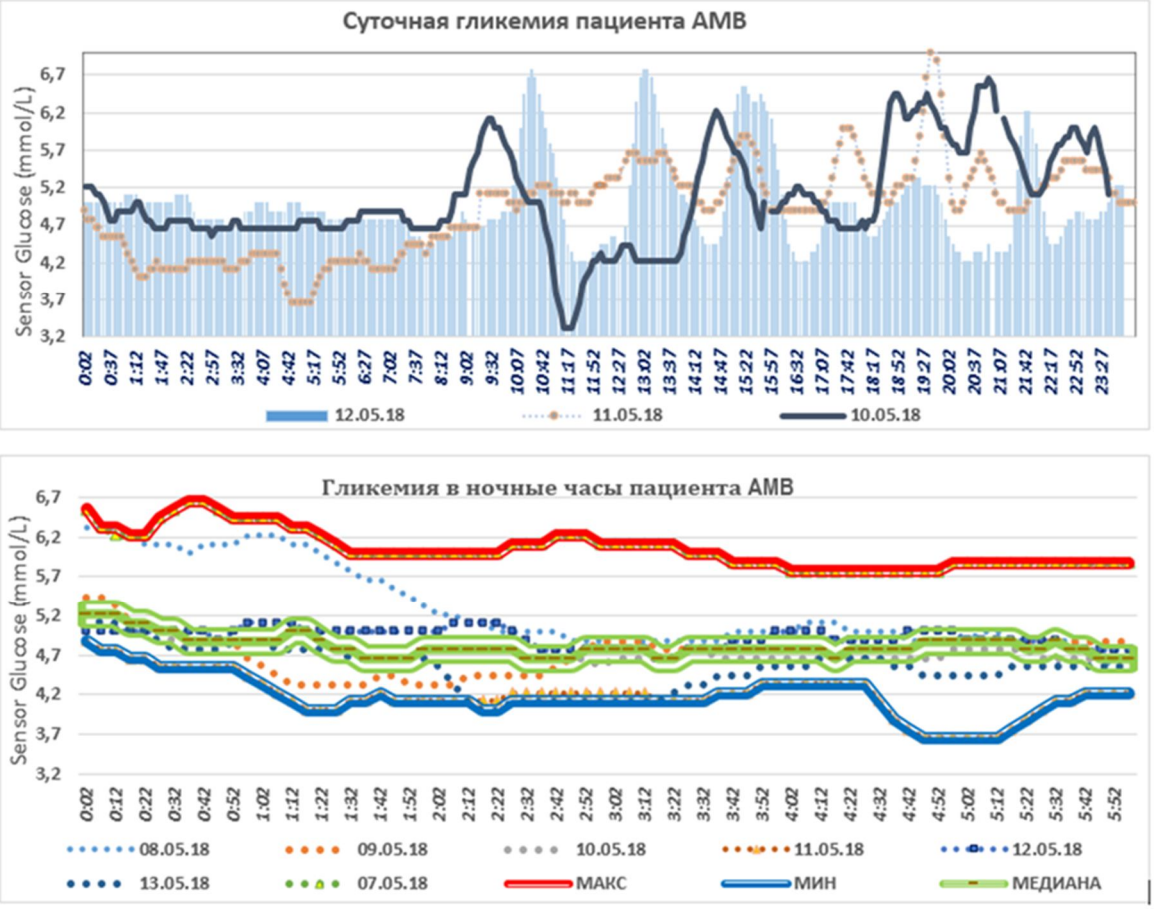

Рис. 1. Варианты графического представления длительного мониторинга огибающей гликемии: значения гликемии в заданные интервалы времени и результаты анализа параметров гликемии натощак

Fig. 1. Options for graphical representation of long- term monitoring of envelope glycemia: glycemic values at specified time intervals and results of analysis of fasting glycemic parameters

ВГ определяют на основании следующих основных показателей.

1. SD – стандартное отклонение, считается одним из основных и простых показателей ВГ, рассчитываемых по данным CGMS, либо частого самоконтроля минимум из семи показателей.

2. Индекс MAGE (mean amplitude of glycemic excursions) – средняя амплитуда колебаний гликемии [13]. Индекс считается «золотым стандартом» в исследовании ВГ и определяется как среднее значение разницы между последовательными максимальными и минимальными показаниями глюкозы крови, большими, чем одно стандартное отклонение [13].

3. MODD – показатель «межсуточных различий», рассчитывается как абсолютная разница между значениями глюкозы в один и тот же выбранный временной показатель в течение двух последовательных дней [14].

4. CONGA – показатель «непрерывного перекрывающегося гликемического эффекта», рассчитывается как аб-

солютная разница показаний в настоящий момент времени и определенное количество часов назад [14].

5. CV – коэффициент вариации, определяющий долю SD от среднего уровня глюкозы [14].

По данным исследований, ВГ является фактором риска кардиоваскулярных осложнений СД [15]. Было установлено, что менее 25% риска осложнений СД связано с HbA1c [15] и что значительный вклад в повышение ССЗ при СД вносит ВГ.

Для реализации алгоритма на ЭВМ был выбран язык программирования высокого уровня C++ и среда программирования Visual Studio 2017. Ввод данных в программу производится либо из текстового файла, либо вручную. Вывод данных производится в консоль в графическом виде и представлен на рисунках 2, 3.

При переходе от качественного графического описания прандиальной регуляция гликемии (рис. 2), то есть гликемии в ответ на приём пищи, к практическим расчетам необходим адекватный выбор аппроксимирующей функции, обеспечивающей заданную точность аппроксимации при малом числе членов разложения, во многом определяет простоту и удобство дальнейшего анализа и синтеза предикторов [16].

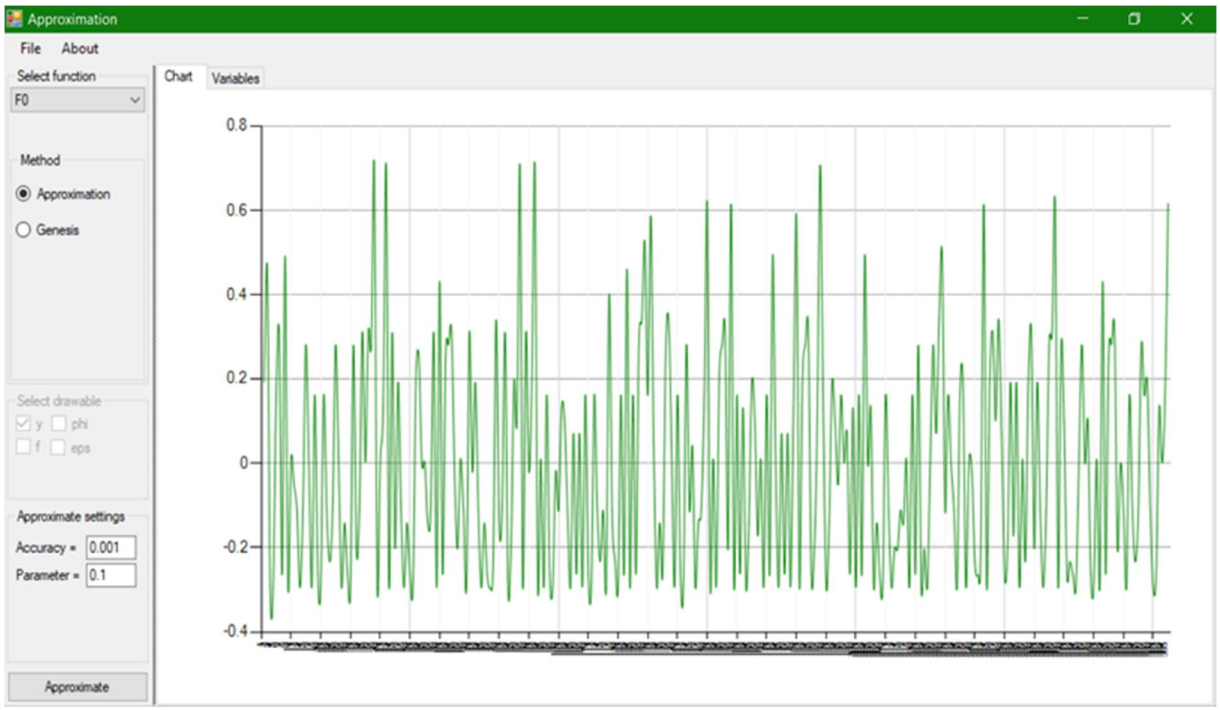

Рис. 2. Пример аппроксимации огибающей гликемии между приемами пищи в течение суток

Fig. 2. An example of the approximation of the envelope of glycemia between meals during the day

В общем случае аппроксимирующая исходную МЭФ функция имеет вид

$$F[\lambda,t]=\sum_{i=0}^{N}A_i(t)e^{-K_i(t)[\lambda-\lambda_i(t)]^2}.$$

В качестве критерия оптимальности аппроксимации целесообразно использовать критерий минимума интегральной средней квадратической ошибки аппроксимации в заданном интервале $[t_H, t_B]$:

$$\delta = \int_{t_H}^{t_B} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\Phi[\lambda, t] - \sum_{i=0}^{N} A_i(t) e^{-K_i(t)[\lambda - \lambda_i(t)]^2} \right) d\lambda \to min.$$

Разработан вариант практической реализации аппроксимации результатов суточного мониторинга, который используется для расчетов интегральных и дифференциальных предикторов СЗЗ (типа ожирения [15]), пример представлен на рисунке 3.

Предложенный алгоритм в дальнейшем может быть эффективно использован в разрабатываемой СППР врача по результатам мониторинга гликемии.

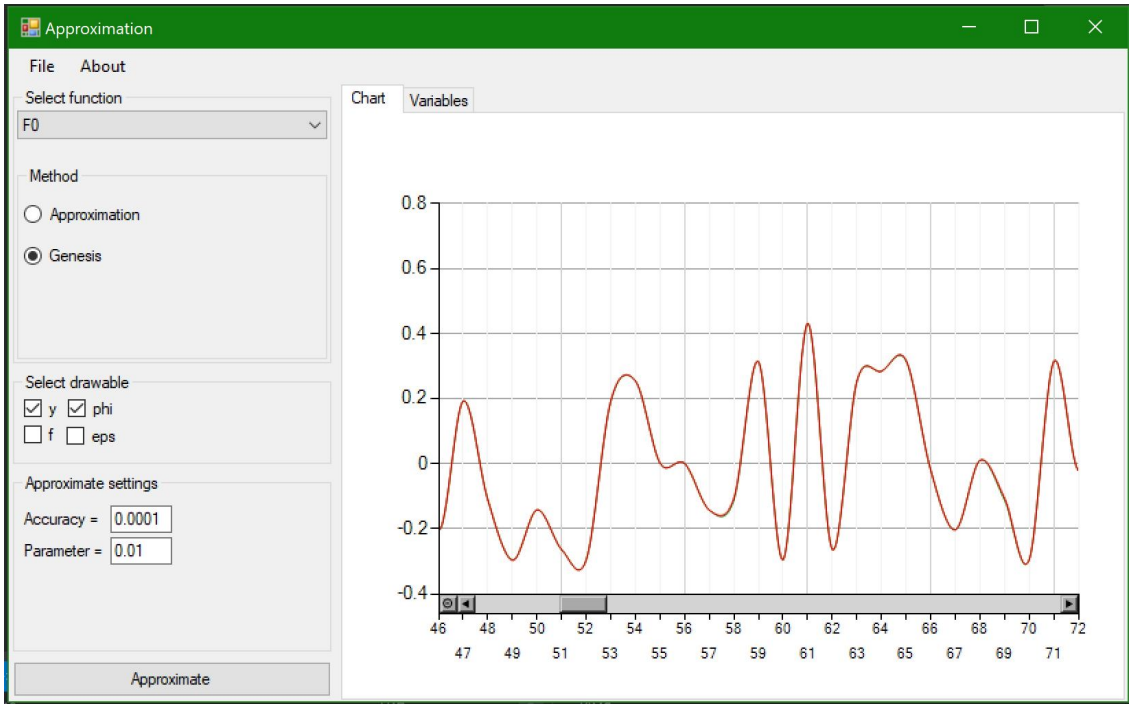

Рис. 3. Участок графика аппроксимации исходной функции

Fig. 3. Plot of the approximation graph of the original function

Методика аппроксимации экспериментальных данных многоэкстремальными функциями на основе рассмотренного алгоритма использована при разработке научно обоснованных рекомендаций, удовлетворяющих принципам превентивной терапии [17].

Выводы

В целом можно сделать вывод о том, что из-за отсутствия в настоящее

время адекватной информационной технологии проведения превентивных клинических исследований ССЗ на основе анализа параметров ВГ прогнозирования уровня сахара в крови, которая могла бы быть использована для информационной поддержки терапии и прогнозирования развития сахарного диабета, создание эффективных методических и информационных средств в составе СППР врача на основе применения предложенного алгоритма аппроксимации экспериментальных результатов мониторинга гликемии является актуальным и должно стать предметом дальнейших разработок на основе данного пилотного проекта.

Список литературы

1. Strodthoff N., Strodthoff C. Detecting and inter preting myocardial infarction usingfully convolutional neural networks // Physiological Measurement. 2019. Vol. 40, no. 1. P. 015001. DOI: 10.1088/1361-6579/aaf34d.

2. Heart disease and stroke statistics 2017 update: a report from the american heart association / E. J. Benjamin, M. J. Blaha, S. E. Chiuve, M. Cushman, S. R. Das, R. Deo, S. D. de Ferranti, J. Floyd, M. Fornage, C. Gillespie [et al.] // Circulation. 2017. Vol. 135, no. 10. P. e146–e603.

3. Reasat T., Shahnaz C. Detection of inferior myocardial infarction using shallow convolutional neural networks // IEEE Region 10 Humanitarian Technology. URL: https://arxiv.org/pdf/1710.01115.pdf/ (accessed 20.11.2019).

4. Myocardial infarction redefined – a consensus document of The Joint European Society of Cardiology/American College of Cardiology committee for the redefinition of myocardial infarction. The Joint European Society of Cardiology/American College of Cardiology Committee / E. Antman, J-P. Bassand, W. Klein, M. Ohman, J. L. L. Sendon, L. Rydйn, M. Simoons, M. Tendera // Journal of the American College of Cardiology. 2000. Vol. 36, no. 3. P. 959–969.

5. Visit-to-Visit Variability of Fasting Plasma Glucose and the Risk of Cardiovascular Disease and All-Cause Mortality in the General Population / Anxin Wang, Xiaoxue Liu, JieXu, Xiaochen Han, Zhaoping Su, Shuohua Chen, Nan Zhang // Journal of the American Heart Association. 2017. DOI: 10.1161/JAHA.117.006757

6. Low fasting plasma glucose level as a predictor of cardiovascular disease and all-cause mortality / M. Wei, L. W. Gibbons, T. L. Mitchell, J. B. Kampert, M. P. Stern, S. N. Blair // Circulation. 2000. No. 101. P. 2047–2052.

7. A prospective study of low fasting glucose with cardiovascular disease events and all-cause mortality / M. Mongraw-Chaffin, A. Z. LaCroix, D. Sears, L. Garcia, L. S. Phillips, S. Blotcher, O. Zaslavsky, C. A. M. Anderson // The Women's Health Initiative, Metabolism, 2017. P. 116–124. DOI: 10.1016/j.metabol.2017.02.010.

8. Stolbunov V., Nair P. B. Sparse radial Basis Function Approximation with Spatially Variable shape Parameters // Applied Mathematics and Computation. 2018. Vol. 330. P. 170-184.

9. Baqais A. Genetic Algorithm for Function Approximation: an Experimental Investigation // International Journal of Artificial Intelligence and Applications (IJAIA). 2016. Vol. 7, no. 3.

10. A Successive Multi-Extremum Approximation Algorithms Based on Special Functions in the Enviromental Impacts Researches on Technogenic Systems / E. Petrunina, A. Nicolskiy, A. Beloglazov, D. Pecherskij // 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018. Sofia, 2018. Vol. 18. P. 27-35.

11. Erohin A. T. Approximation technique for random processes based on special functions // Geophysics methods for environment monitoring, 1991. P. 115-125.

12. Гликемический профиль, нормальные показатели. URL: https://meramamerikankultur. com/other/glikemicheskij-profil-normalnye-pokazateli.html (дата обращения: 03.10.2019).

13. Rodbard D. Interpretation of continuous glucose monitoring data: glycemic variability and quality of glycemic control // Diabetes TechnolTher. 2009. No. 11. P. 55–67.

14. Климонтов В. В., Мякина Н. Е. Вариабельность гликемии при сахарном диабете: инструмент для оценки качества гликемического контроля и риска осложнений // Сахарный диабет. 2014. № 2. С. 76-82.

15. Nalysnyk L., Hernandez-Medina M., Krishnarajah G. Glycaemic variability and complications in patients with diabetes mellitus: evidence from a systematic review of 142 the literature // Diabetes ObesMetab. 2010. No. 12. P. 288–298.

16. Использование непрерывного мониторирования постпрандиальной гликемии в клинической практике коррекции веса у пациентов с метаболическим синдромом / В. В. Базылев, И. А. Бабкина, В. В. Соловьев, К.В. Соловьева // Вопросы диетологии. 2019. № 9(3). С. 5–15.

17. Tylee T. S., Trence D. L. Glycemic Variability: Looking Beyond the A1C // Diabetes Spectrum. 2012. No. 25(3). P. 149-153.

References

1. Strodthoff N., Strodthoff C. Detecting and inter preting myocardial infarction usingfully convolutional neural networks. *Physiological Measurement*, 2019, vol. 40, no. 1, pp. 015001. doi 10.1088/1361-6579/aaf34d

2. Benjamin E. J., Blaha M. J., Chiuve S. E., Cushman M., Das S. R., Deo R., de Ferranti S. D., Floyd J., Fornage M., Gillespie C., eds. Heart disease and stroke statistics 2017

update: a report from the american heart association. *Circulation*, 2017, vol. 135, no. 10, pp. e146–e603.

3. Reasat T., Shahnaz C. Detection of inferior myocardial infarction using shallow convolutional neural networks. IEEE Region 10 Humanitarian Technology. Available at: https://arxiv.org/pdf/1710.01115.pdf. (accessed 20.11.2019)

4. Antman E., Bassand J-P., Klein W., Ohman M., Sendon J. L. L., Rydйn L., Simoons M., Tendera M. Myocardial infarction redefined–a consensus document of The Joint European Society of Cardiology. American College of Cardiology committee for the redefinition of myocardial infarction. The Joint European Society of Cardiology. American College of Cardiology Committee. *Journal of the American College of Cardiology*, 2000, vol. 36, no. 3, pp. 959–969.

5. Anxin Wang, Xiaoxue Liu, JieXu, Xiaochen Han, Zhaoping Su, Shuohua Chen, Nan Zhang. Visit-to-Visit Variability of Fasting Plasma Glucose and the Risk of Cardiovascular Disease and All-Cause Mortality in the General Population. *Journal of the American Heart Association*, 2017. doi: 10.1161/JAHA.117.006757

6. Wei M., Gibbons L. W., Mitchell T. L., Kampert J. B., Stern M. P., Blair S. N. Low fasting plasma glucose level as a predictor of cardiovascular disease and all-cause mortality. *Circulation*, 2000, no. 101, pp. 2047–2052.

7. Mongraw-Chaffin M., LaCroix A. Z., Sears D., Garcia L., Phillips L. S., Blotcher S., Zaslavsky O., Anderson C. A. M. A prospective study of low fasting glucose with cardiovascular disease events and all-cause mortality. *The Women's Health Initiative, Metabolism,* 2017, pp. 116–124. doi 10.1016/j.metabol.2017.02.010.

8. Stolbunov V., Nair P. B., Sparse radial Basis Function Approximation with Spatially Variable shape Parameters. *Applied Mathematics and Computation*, 2018, vol. 330, pp. 170-184.

9. Baqais A. Genetic Algorithm for Function Approximation: an Experimental Investigation. *International Journal of Artificial Intelligence and Applications (IJAIA)*, 2016, vol. 7, no. 3.

10. Petrunina E., Nicolskiy A., Beloglazov A., Pecherskij D. A Successive Multi-Extremum Approximation Algorithms Based on Special Functions in the Enviromental Impacts Researches on Technogenic Systems. 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018. Sofia, 2018, vol. 18, pp. 27-35.

11. Erohin A. T. Approximation technique for random processes based on special functions. *Geophysics methods for environment monitoring*, 1991, pp. 115-125.

12. Glikemicheskii profil' normal'nye pokazateli [The glycemic profile is normal]. (In Russ.) Available at: https://meramamerikankultur. com/other/glikemicheskij-profil-normalnye-pokazateli.html. (accessed 03.10.2019)

13. Rodbard D. Interpretation of continuous glucose monitoring data: glycemic variability and quality of glycemic control. *Diabetes TechnolTher*, 2009, no. 11, pp. 55–67.

14. Klimontov V. V., Myakina N. E. Variabel'nost' glikemii pri sakharnom diabete: instrument dlya otsenki kachestva glikemicheskogo kontrolya i riska oslozhnenii [Variability of glycemia in diabetes mellitus: a tool for assessing the quality of glycemic control and the risk of complications]. *Sakharnyi diabet = Diabetes*, 2014, no. 2, pp. 76-82. (In Russ.)

15. Nalysnyk L., Hernandez-Medina M., Krishnarajah G. Glycaemic variability and complications in patients with diabetes mellitus: evidence from a systematic review of 142 the literature. *Diabetes ObesMetab*, 2010, no. 12, pp. 288–298.

16. Bazylev V. V., Babkina I. A., Solovyov V. V., Solovyova K. V. Ispol'zovanie nepreryvnogo monitorirovaniya postprandial'noi glikemii v klinicheskoi praktike korrektsii vesa u patsientov s metabolicheskim sindromom [Use of continuous monitoring of postprandial glycemia in clinical practice of weight correction in patients with metabolic syndrome]. *Voprosy dietologii = Questions of dietetics*, 2019, no. 9(3), pp. 5-15. (In Russ.)

17. Tylee T. S., Trence D. L. Glycemic Variability: Looking Beyond the A1C. *Diabetes Spectrum*, 2012, no. 25(3), pp. 149-153.

Информация об авторах / Information about the Authors

Истомина Татьяна Викторовна, доктор технических наук, Московский государственный гуманитарно-экономический университет, г. Москва, Российская Федерация
e-mail: istom@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0536-2006

Tatyana V. Istomina, Dr. of Sci. (Engineering), Moscow State Humanities and Economic University, Moscow, Russian Federation
e-mail: istom@mail.ru)
ORCID: 0000-0002-0536-2006

Петрунина Елена Валерьевна, кандидат технических наук, Московский государственный гуманитарно-экономический университет, г. Москва, Российская Федерация
e-mail: petrunina@ mggeu.ru

Elena V. Petrunina, Cand. of Sci. (Engineering), Moscow State Humanities and Economic University, Moscow, Russian Federation
e-mail: petrunina@ mggeu.ru)

Копылова Елена Владимировна, кандидат технических наук, ООО «Торговый дизайн», г. Москва, Российская Федерация
e-mail: el_ist@mail.ru

Elena V. Kopylova, Cand. of Sci. (Engineering), Trade Design JSC, Moscow, Russian Federation
e-mail: el_ist@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.396.933

Способ построения телекоммуникационной сети передачи данных с борта воздушного судна на наземный диспетчерский пункт

Р. А. Томакова[1] ✉, А. Н. Шевцов[1]

[1] ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Целью исследования *является способ построения телекоммуникационной сети передачи ограниченного объёма полётной информации с борта воздушного судна на наземный диспетчерский пункт через систему спутниковой связи.*

Методы. *В качестве базового метода исследования выбран системный подход, заключающийся в комплексном анализе характеристик каналов передачи данных с ВС на Землю, приемопередающего оборудования, анализа спутникового ретранслятора.*

Результаты. *Взяв за основу приведенный подход, была предложена топологическая схема построения сети. Доступ к получаемой информации с ВС и из других ЦОД (центр обработки данных) выполняется дистанционно с использованием IP- протокола. Связь по фидерной линии между станцией сопряжения и космическим аппаратом осуществляется в частотном диапазоне 19,4 – 19,6 ГГц, при этом скорость передачи информации – 12,5 Мбит/с, а канальный разнос – 15 МГц. Также в линии возможно применениить помехоустойчивое кодирование, которое позволит обеспечить отношение сигнал/шум не менее 10^{-6}. Межспутниковая связь в Iridium организуется в частотном диапазоне миллиметровых и сантиметровых длин волн (далее – Ка-диапазоне 23,18–23,38 ГГц). Информационный обмен на судне осуществляется при помощи комплекса связи – С-107-1, который имеет в своем составе антенну АТМ – 2, предназначенную для приемопередачи электромагнитных волн в диапазоне частот от 1200 до 1650 МГц.*

Приём сигналов на земной станции осуществляется при помощи: антенны, приёмопередатчика и спутникового модема. Для приёма сигналов выбрано антенно-фидерное устройство VSAT радиусом 90 см.

Заключение. *Проведена оценка энергетического баланса предлагаемой телекоммуникационной сети, состоящей из двух участков: «ВС – ИСЗ» и «ИСЗ – наземный диспетчерский пункт». Отношение сигнал-шум на входе демодулирующего устройства наземной станции равно 10,838 дБ. На основании графика, демонстрирующего зависимость вероятности ошибки бит на символ от среднего значения сигнал\шум на основании расчётных значений, можно утверждать, что качество сигнала не хуже 10^{-6}. Однако дальнейшее снижение вероятности оптимального приема с использованием представленного оборудования невозможно.*

Ключевые слова: *система спутниковой связи; космический аппарат; воздушное судно; система управления безопасностью полётов; телекоммуникационная сеть; архитектурная и топологическая схема сети; приёмопередающее устройство; центр обработки данных; расчёт энергетических потерь.*

Конфликт интересов*: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.*

© Томакова Р. А., Шевцов А. Н., 2020

Для цитирования: Томакова Р. А., Шевцов А. Н. Способ построения телекоммуникационной сети передачи данных с борта воздушного судна на наземный диспетчерский пункт // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 157–173.

Поступила в редакцию 10.01.2020 *Подписана в печать 31.01.2020* *Опубликована 25.02.2020*

Method for Building a Telecommunications Network for Transmitting Data From an Aircraft to a Ground Control Station

Rimma A. Tomakova[1] ✉, Alexey N. Shevtsov[1]

[1] Southwest State University
50 Let Oktyabrya str., 94, Kursk, 305040, Russian Federation

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

The purpose *of the study is a method of building a telecommunication network for transmitting a limited amount of flight information from an aircraft to a ground control room through a satellite communication system.*

Methods*. A systematic approach was chosen as the basic research method, which consists in a comprehensive analysis of the characteristics of data transmission channels from the aircraft to the Earth, receiving and transmitting equipment, and analysis of a satellite repeater.*

Results*. Taking the above approach as a basis, a topological network construction scheme was proposed. Access to the information received from the aircraft and from other data centers (data processing center) is performed remotely using the IP protocol. Communication over the feeder line between the gateway and the spacecraft is carried out in the frequency range 19.4 - 19.6 GHz, while the information transfer rate is 12.5 Mbit / s, and the channel spacing is 15 MHz. It is also possible to use noise-immune coding in the line, which will provide a signal-to-noise ratio of at least 10–6. Intersatellite communication in Iridium is organized in the frequency range of millimeter and centimeter wavelengths (hereinafter referred to as the Ka-band 23.18-23.38 GHz). Information exchange on the ship is carried out using a communication complex - S-107-1, which includes an ATM - 2 antenna, designed for receiving and transmitting electromagnetic waves in the frequency range from 1200 to 1650 MHz.*

The receiving equipment of the ground station includes a transmitter-receiver, satellite modem and antennas. Antenna feeder device VSAT with a radius of 90 cm was chosen to receive the signals.

Conclusions*. At the final stage of the work, an assessment was made of the energy balance of the proposed telecommunication network, consisting of two sections "VS - AES" and "AES - ground control room". The signal-to-noise ratio at the input of the ground station demodulator is 10.838 dB. Based on the graph showing the dependence of the bit error probability per symbol on the average signal / noise value, based on the calculated values, it makes it possible to assert that the signal quality is not worse than 10-6. However, further reduction of the probability of optimal reception using the presented equipment is impossible.*

Keywords: *satellite communication system; spacecraft; aircraft; flight safety management system; telecommunications network; architectural and topological network diagram; transceiver; data processing center ny; calculation of energy losses.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Tomakova R. A., Shevtsov A. N. Method for Building a Telecommunications Network for Transmitting Data From an Aircraft to a Ground Control Station. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2020; 10(1): 157–173. (In Russ.)

Received 10.01.2020 *Accepted 31.01.2020* *Published 25.02.2020*

***

Введение

Авиационная промышленность России является одной из наиболее наукоемких и высокотехнологичных отраслей среди оборонных отраслей по объему производства и реализации продукции. Основные усилия авиастроения были направлены на реализацию задач, определенных стратегией развития авиационной промышленности, федеральными и государственными программами по развитию отечественного судостроения в области создания, производства и обеспечения эксплуатации самолетов и вертолетов гражданской и военной авиации [1].

Наиболее актуальным в данном исследовании является разработка систем обмена сообщений между ВС (которые находятся в полёте или на взлётной полосе) и наземным пунктом управления. Данные, учавствующие в информационном обмене между воздушным судном и диспетчерским пунктом связи, содержат такую важную информацию, как: техническое состоянии ВС его скорость, крен, состояние двигателей, а также таких параметрах, как запас топлива, действия экипажа, значения перегпрузов. Достоверное получение информации диспетчером воздушного судна позволяет повысить точность эшелонирования воздушных судов, обеспечить передачу необходиомой информации между ВС и диспетчерским пунктом, а также выполняет поправки, утверждённые Президентом РФ в 2013 г., в вопросе обеспечения СУБП, чем и объясняется актуальность данной работы.

Материалы и методы

На основании проведенного анализа поправок, утверждённых Международной организацией ИКАО и подписанным законопроектом в Российской Федерации, каждое воздушное судно начиная с 2020 г. должно иметь на своем борту систему передачи сообщений и систему, обеспечивающую эшелонирование воздушного движения. Для выполнения данного ряда действий были разработаны следующие системы:

- ADS-B;
- AIS;
- ADS-C
- ACARS;
- AFIRS.

Каждая из приведенных систем используется в авивации и выступает в качестве транспоннтедров, обеспечивающих приемопередачу необходимого

объема информации. Необходимым объемом информации для передачи с ВС на наземный пункт диспетчерской связи являются:

– координаты ЛА;

– скорость посадки ($V_{посадки}$) и скорость взлёта ВС ($V_{взлёта}$);

– скорость ВС (максимальная ($V_{макс}$) и минимальная ($V_{мин}$));

– характеристика ВС в пространстве по уголу крену, тангажу и рыскание;

– высота полета ЛА ($H_{макс}$ и $H_{крейс}$ – крейсерская));

– перегрузка;

– параметрические паказатели двигателя (температура, обороты);

– достаточность топливной жидкости.

Контроль исследуемых параметров осуществляется приборами, входящими в различные системы летательного аппарата (ЛА), наименования и обозначения которых представлены ниже (табл. 1).

Таблица 1. Наименование параметров и систем их контроля

Table 1. Name of parameters and systems for their control

Наименование параметра	Обозначение	Примерный измеритель
Параметры режимов работы силовых установок		
Частота вращения	n	Измеритель частоты вращения (тахометр)
Температура в двигателе:		Термометры
перед турбиной	T_3	
за турбиной	T_4	
масла	T_M	
воздуха	T_B	
Давление в двигателе:		Манометры
топлива	P_m	
масла	P_M	
за компрессором	P_K	
в воздухезаборнике	P_{BP}	
Перепад давления на турбине	ε_m	Дифнанометр
Расход топлива:		Расходомеры
основного	G_T	
форсажного	$G_Ф$	

Проанализируем и сформулируем важнейшие задачи, которые решаются штатным радиоканалом (для бортового комплекса управления):

1. Разовые команды и их приём. Основной функцией данной команды является отражение параметров запрашиваемого действия. Повторяемость данной команды зависит от ряда

факторов, одними из которых являются загрузка диспетчера, вторым – настройка автоматического комплекса системы управления. Время между командами варьируется в пределах от 1 до 10 с.;

2. Команды, определяющие положение руля воздушного судна, его тангаж, крен, курс и высоту. От данных об угловом местоположении воздушного судна, поступающих диспетчеру, формируют частоту передачи управляющих сообщений.

3. Информация телеметрии, передаваемая с ВС, включает в себя такие данные, как: местоположение ВС его скорость, данные о необходимых системах жизнеобеспечения. Следует заметит, что частота обновления телеметрической информации оказывает прямое влияние на принятие решений диспетчера воздушного судна.

4. Гарантированная доставка сообщений между воздушным судном и диспетчерским пунктом связи [2].

Анализ сущностей каждой из перечисленных задач позволяет разделить их на две группы: без гарантии доставки и с гарантией доставки. Правильное выполнение каждой задачи управления ЛА потребует распределения пропускных способностей каналов между информационными потоками. Выдвинутое условие при симплификации радиоканала предъявляется к программному обеспечению, которое предназначено для реализации задачи связи.

С целью оптимального распределения емкости радиоканала каждой из перечисленных задач устанавливаются приоритеты важности в порядке их убывания. В таблице 2 представлены задачи, которые были проанализированы и расположены в порядке убывания приоритета важности.

Таблица 2. Кластеризация задач радиоканала «ЛА - земля» с указанием требуемого приоритета отправки

Table 2. Clusterization of the tasks of the radio channel “LA - ground”, indicating the required priority of sending

Приоритет	Характеристика информации	
	Доставка (требуется гаранти)	Доставка (гарантия НЕ требуется)
4		Команды ручного управления
3		Телеметрия
2	Разовые команды	
1	Исходные/целевые данные	

Сформулируем требования к структуре кадра, которые приведены в таблице 3.

Синхронизирующие символы соответствуют пакетной синхронизации и устанавливаются в начало заголовка

посылки. Контрольная сумма заголовка предназначена для снижения возможности ошибочной синхронизации и обеспечивает подлинность передаваемых сведений. Область «тип посылки» определяет вид ее обработки. Длина посылки характеризует объем передаваемых сведений, степень обработки этих данных в соответствии с видом посылки.

Таблица 3. Структура кадра (базовая)

Table 3. Frame structure (basic)

Заголовок посылки					
Синхронизирующие символы, 2 байта	Контролируемая сумма заголовка, 4 бита	Тип посылки, 4 бита	Длина посылки, 2 байта	Контрольная сумма данных посылки, 2 байта	Данные

Необходимая пропускная способность канала для получения команд ручного управления рассчитывается исходя из задержки на переключение режима приёмопередатчика s, этапа выдачи требуемых установок T_c, длины посылки с заданными командами l_c:

$$v_c=(l_c+s)\frac{1}{T_c}. \quad (1)$$

Для телеметрической информации

$$v_m=(l_m+s)\frac{1}{T_m}, \quad (2)$$

где l_m – длина посылки телеметрии;

T_m – период выдачи телеметрии.

С целью предоставления безопасной штатной деятельности на основе данных (табл. 2) наиболее важной установкой полагают результат стабильного значения периода передачи команд ручного управления (T_c), а также телеметрии (T_m). Метод передачи данных автоматически ликвидирует вытеснение высокоприоритетной посылки над менее приоритетной. Это осуществляется в том случае, если длительность передачи низкоприоритетной посылки меньше, чем промежуток передачи высокоприоритетных посылок [3]. Вспомогательным допущением считается равенство этапов выдачи телеметрических данных и команд ручного управления $T_c = T_m = T$. Таким образом, получаем

$$V = \frac{\mu}{T} + I, \quad (3)$$

где μ – совокупная длина пересылаемых данных для жизнеобеспечения ВС и определяется как

$$\mu = l_c + l_m + 2s. \quad (4)$$

Помимо предоставления ручного управления необходимо реализовывать гарантированную доставку данных, например начальных сведений с целью реализации работы ВС.

Следовательно, для расчёта минимальной достаточной пропускной способности радиоканала (V) необходима оценка возможной производительности передачи начальных данных. Представление рационального распределения ре-

сурсов радиоканала между обменом для жизнеобеспечения и передачей исходных данных формулируется в виде

$$l_d = V \cdot T - \mu. \quad (5)$$

Тогда требуемая пропускная способность рассчитывается как

$$V = (l_d \lambda + \mu)\frac{l}{T}, \ \lambda = \frac{n_d + n_a}{n_d}, \quad (6)$$

где l_d – выбирается и зависит от требования по неоперативности/оперативности передачи информации; λ – параметр, отражающий накладные расходы передачи через число квитанций n_a, на число посылок исходных данных n_d.

В таблице 4 и таблице 5 представлены структура посылок телеметрии и команд РУ.

Таблица 4. Типовое содержимое посылки телеметрии

Table 4. Typical Telemetry Package Content

№	Параметр	Размер, байт	Формат данных	Масштабный коэффициент (единица измерений)
1	Широта	4	float	1,0; град
2	Долгота	4	float	1,0; град
3	Высота	2	int16	0,1; метр
4	Крен	2	int16	0,1; град
5	Тангаж	2	int16	0,1; град
6	Курс	2	int16	0,1; град
	Итого	17		

Таблица 5. Типовое содержимое посылки команды ручного управления

Table 5. Typical contents of sending a manual command

№	Название параметра	Размер, байт	Тип данных
1	Руль (высоты)	1	in8
2	Элероны	1	in8
3	Руль (направления)	1	in8
4	Тяга двигателя	1	in8
	Итого	4	

Анализ приведенных таблиц 4, 5 позволяет определить длину посылки с заданными командами l_c и длину посылки телеметрии l_m :

$$l_c = 15, \ l_m = 30. \quad (7)$$

В качестве примера расчёта длительность переключения с передачи на приём (s) определяется как единица.

Временной промежуток основания телеметрии, а также команд ручного управления с учётом требования для

решения дилеммы равен 40 мс, что соответствует темпу в 25 Гц. Требуемый для передачи массив начальных данных составляет 1 Мбайт [4; 5; 6; 7; 8].

Время передачи исходных данных t_d является параметром для оптимизации при условии технологической реализуемости, получаемой в результате расчёта пропускной способности канала. В данном расчётном случайном событии величина t_d принята равной 0,8.

Проведенный анализ показывает, что передаваемыми на Землю параметрами являются высотные оценки полёта, быстроходные и угловые характеристики полёта ВС, а также параметры, описывающие режим работы мотора и турбин. Разбор конструкции кадров программного обеспечения типового авиационного набора комплексов, осуществляющего приемопередачу, позволяет установить стоимость и объем передаваемой информации с борта ВС. В приведенном примере объем передаваемой информации составил 1 Мбайт, а его периодичность с доставкой – 1 минута [3; 9; 10; 11; 12; 13].

ВЧ-радиосвязь является достаточно надёжной, но требует ввода в эксплуатацию на воздушные суда вспомогательных конструктивных порядков передачи данных HFDL. Однако этот вид передачи данных применительно к авиации требует организации сети ВЧ-связи по радио, в которой радиоцентры объединяются в совместную сеть с последовательным соединением местных центров. Такая организация связи предполагает наличие базируемых станций на всей территории ответственности с учетом перекрытий.

Распределение с передачей радиоволн ВЧ-диапазона имеет следующие недостатки:

1. Нерегулярность условий с передачей распределения радиоволн. В этом случае наблюдаемое воздействие помех разного вида приводит к необходимости выбора частот, предназначенных для установления и ведения связи.

2. Каналы связи очень высоких частот (далее – ОВЧ) производительны только в зонах прямой видимости, однако не применимы вовсе для организации связи с быстролетящими авиалайнерами на далекие расстояния. Следует также отметить невозможность расположения ретрансляционных станций в океаническом пространстве, в областях Сибири, на полюсах, что основательно ограничивает применение этого вида связи в авиационной отрасли.

Спутниковые системные конструкции связи обладают следующими преимуществами:

– значительной пропускной способностью спутниковых каналов, работающих в спектре гигагерцовых частот;

– надежностью установления качественной связи между абонентами, находящимися на больших расстояниях;

– реализуют практически полное покрытие земного шара без необходимости модернизации структуры комму-

никаций в отличие от сетей ВЧ и ОВЧ [14; 15; 16].

Ввиду того, что рассматривается передача полётной информации над территорией Российской Федерации, имеющей большую площадь (17 100 000 км^2), целесообразным является использование в качестве наземных диспетчерских пунктов центров обработки данных, находящихся в городах: Санкт-Петербург, Москва, Казань, Омск, Красноярск, Якутск, Хабаровск, Анадырь, Тикси, Воркута. Хранилища информации, расположенные в этих городах, связаны между собой единой сетью передачи информации, что позволяет решить проблему резервирования (в случае отказа) в приёме полетной информации. Таким образом, самолет московской авиакомпании, летящий над территорией Сибири (г. Хабаровск), передает информацию на спутник «Иридиум», который транслирует их на ближайший центр обработки данных. Использование внутренней корпоративной сети позволяет получить всю необходимую информацию из любого центра обработки данных.

Архитектурная схема показана ниже (рис. 1).

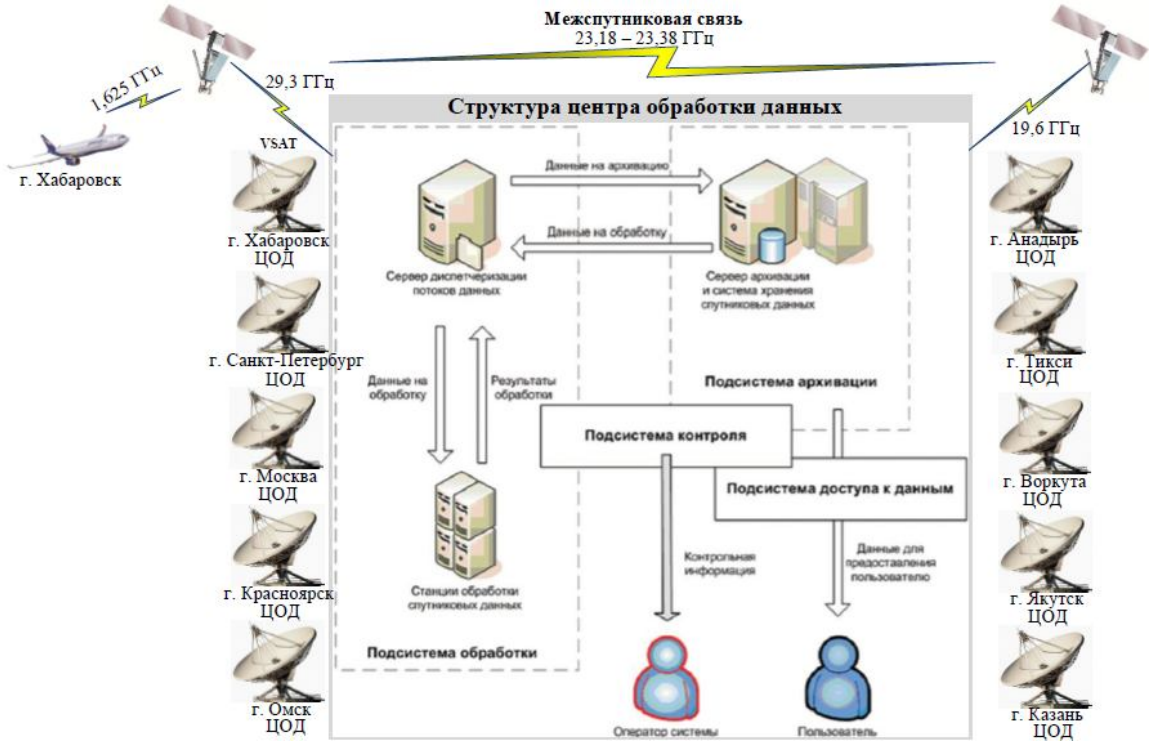

Рис. 1. Архитектурная схема сети данных

Fig. 1. Data Network Architectural Diagram

В целях организации информационного обмена между ВС и диспетчерским центром используются средства приема-передачи, представленные на рисунке 2.

Рис. 2. Устройство С-107

Fig. 2. Device C-107

Результаты и их обсуждение

Результаты выполненного анализа систем передачи информации позволяют организовать канал информационного обмена между ВС и диспетчерской станцией, а также:

– обеспечивать полное покрытие мировых воздушных трасс;

– предоставлять необходимую пропускную способность для информационного обмена;

– иметь возможность установления межспутникового канала обмена информацией [17].

Спутниковая сеть Iridium включает три основных компонента, которые включают спутниковую сеть, наземные станции и спутниковые телефоны и блоки данных.

В настоящее время спутниковые системы эффективно внедряются на воздушные суда, обеспечивая качественную высокоскоростную передачу данных в цифровом виде. Именно поэтому в результате сравнения в данной работе был выбор сделан в пользу таких систем.

Созвездие сети Iridium состоит из 66 активных спутников на орбите и дополнительных запасных спутников, которые будут обслуживаться в случае отказа. Спутники находятся на низкой околоземной орбите, на высоте примерно 781 км, имеют наклонение 86,4°. Орбитальная скорость спутников составляет приблизительно 27 000 км / ч. Спутники связываются с соседними спутниками через K-диапазон межспутниковой связи. Каждый спутник может иметь четыре межспутниковых канала: два с соседними носителями в одной и той же орбитальной плоскости и два со спутниками в соседних плоскостях с каждой стороны. Спутники обращаются от полюса к полюсу с орбитой примерно 100 минут. Такая конструкция означает, что спутниковая видимость и зона обслуживания превосходны на северном и южном полюсах, где мало клиентов.

Малая земная станция спутниковой связи VSAT (Very Small Aperture Terminal) – это наземная станция двусторонней связи, которая передает и принимает данные со спутников. VSAT

имеет высоту менее трех метров и может передавать как узкополосные, так и широкополосные данные на спутники на орбите в режиме реального времени. Затем данные могут быть перенаправлены на другие удаленные терминалы или узлы по всей планете.

VSAT может использоваться вместо большой физической сети, поскольку он отражает сигнал со спутников вместо передачи с помощью физических средств, таких как соединение Ethernet.

Поскольку сигнал должен отражаться, может возникнуть проблема с задержкой, которой не было бы в физической сети. Поэтому большинство пользователей считают, что это цена, которую абонент платит за удаленный доступ и использование меньшего количества инфраструктуры.

Погода может отрицательно сказаться на эффективности сети VSAT.

В качестве приемной антенны используется антенна VSAT радиусом 90 см. Устройство ODU-2W-KU системы VSAT используется для приема-передачи сигнала со спутника. Спутниковый модем ViaSatLinkStar S2 – это IP-терминал, использующийся для обработки информации [17; 18; 19; 20].

В рамках статьи была разработана топологическая схема (рис. 3) телекоммуникационной сети. Информацию от системы VSAT диспетчерские центры получают при помощи сети Интернет.

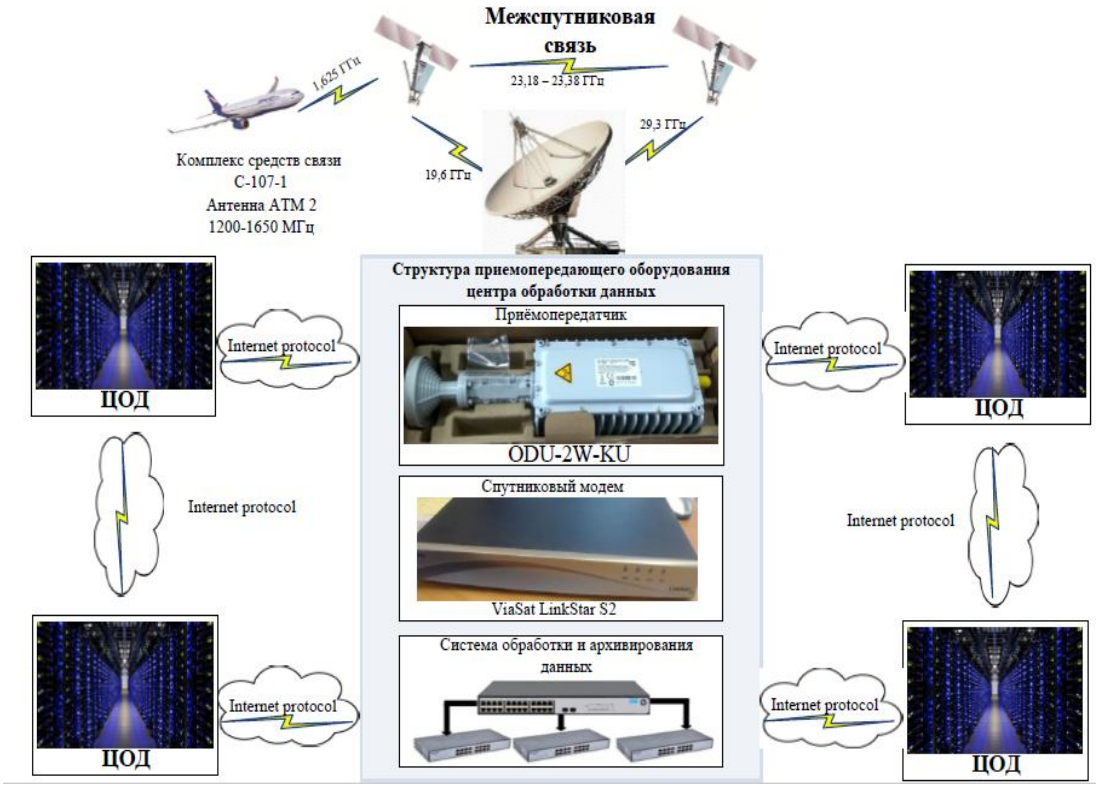

Рис. 3. Топологическая схема предлагаемой телекоммуникационной сети

Fig. 3. Topological scheme of the proposed telecommunication network

Заключительным этапом работы является оценка энергетического баланса предлагаемой телекоммуникационной сети, состоящей из двух участков: «ВС – ИСЗ» и «ИСЗ – наземный диспетчерский пункт». Результаты расчета представлены ниже (табл. 6) [17].

Был выполнен расчёт отношения сигнал/шум, усреднённое значение которого равно 10,838 дБ [17]. На рисунке 4 представлена вероятности ошибки от отношения сигнал/шум.

Данные, полученные на основании расчётных данных отношения сигнал / шум и графика вероятности ошибки от отношения С/Ш, показывают что качество сигнала, достигаемое в предлагаемой системы, будет не ниже 10^{-6}.

Таблица 6. Суммарные потери энергии сигнала для ВС

Table 6. Total signal energy loss for aircraft

Показатель	Линия ВС-ИСЗ	Линия ИСЗ-ЗС
F, ГГц	1,6265	19,6
Наклонная дальность, км	1771,33	1829,87
Угол места, град	23,6427	24,983
L_o , дБ	141,63	183,53
Lатм, дБ	3,37	14,78
Lд, дБ	1,28	11,486
Lсумма, дБ	146,28	209,8

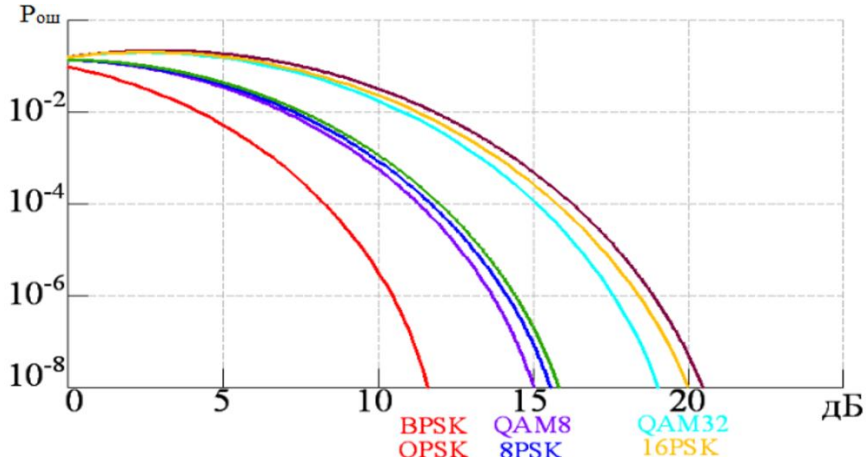

Рис. 4. Вероятность ошибки от отношения С/Ш

Fig. 4. Probability of error from the S/W ratio

Выводы

В статье рассмотрена сеть, позволяющая организовать информационное взаимодействие воздушного судна и диспетчерской станции контроля и управления воздушным движением. В статье рассмотрены архитектурная и топологические схемы построения сети

на основании оборудования, устанавливаемого на воздушные суда (С-107) и наземную станцию VSAT.

В рамках расчёта, выполненного в статье, была доказана работоспособность предлагаемой системы передачи информации.

Список литературы

1. Книвель А. 19 приложение ИКАО. М.: АвиаСоюз, 2014. С. 16–25.

2. Руководство по системе управления безопасностью полетов при АНО ФГУП: руководство по СУБП. 1-е изд. М.: Изд-во стандартов, 2014. 106 с.

3. Рытенкова О. Развитие новых трендов в области фиксированной спутниковой связи // Технологии и средства связи. 2015. № 3. С. 52–62.

4. Руководство по управлению безопасностью полетов. 1-е изд. М.: Изд-во стандартов, 2006. 364 с.

5. Руководство по управлению безопасностью полетов. 2-е изд. М.: Изд-во стандартов, 2009. 318 с.

6. Руководство по управлению безопасностью полетов. 3-е изд. М.: Изд-во стандартов, 2013. 300 с.

7. Довбня В. Г., Севрюков Е. А. Влияние нелинейных искажений на помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 3 (16). С. 49–55.

8. Новиков В. Безопасность полетов авиации обеспечивают спутники связи и навигации. Новые возможности. URL: http://www.tssonline.ru/ (дата обращения: 10.01.2019).

9. 101-я поправка Международной организации гражданской авиации (ИКАО). URL: http:// www.aviaport.ru/ (дата обращения: 09.03.2019).

10. Проведение проверок безопасности полетов при производстве полетов авиакомпаниями: программа LOSA. 1-е изд. М.: Изд-во стандартов, 2002. 67 с.

11. Бородич С. В. Антенны и фидеры. Передача информации по каналам связи. Контроль и измерения в технике связи. М.: НИИР, 2017. 100 с.

12. Анпилогов В. Р. Спутниковые системы массового обслуживания в Ka-диапазоне // Технологии и средства связи. Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание-2011». 2010. № 6-2. С. 96–98.

13. Оценка влияния неравномерности амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик спутникового радио канала на когеретный прием фазомодудированных сигналов малой позиционности / И. Г. Бабанин, А. Н. Шевцов, Д. С. Коптев, А. Н. Щитов // T-Comm, Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12 (6). С. 9–17.

14. Анализ неблагоприятных факторов, воздействующих на пилота воздушного судна в процессе полёта / И. Е. Мухин, А. Н. Шевцов, Д. С. Коптев, А. Н. Щитов // Медико-экологические информационные технологии – 2018: сборник научных статей по материалам XXI Международной научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. С. 23–30.

15. Оценка возможности интегрирования системы оперативного медицинского контроля в информационный обмен с наземными диспетчерскими пунктами / И. Е. Мухин, А. Н. Шевцов, Д. С. Коптев, В. А. Густь // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. С. 186–195.

16. Мухин И. Е., Шевцов А. Н., Коптев Д. С. Исследование влияния перегрузок на организм пилота в процессе полёта // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. С. 385–395.

17. Шевцов А. Н. Метод построения телекоммуникационной сети для передачи данных с борта воздушного судна // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения: сб. материалов / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2020. С. 212-220.

18. Анализ стандартов и зон покрытия мобильной связи Российской Федерации для определения возможности передачи информации с борта летательного аппарата на землю, удовлетворяющего требованиям 101-й поправки ИКАО / И. Е. Мухин, А. Н. Шевцов, А. В. Хмелевская, А. Н. Щитов // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. С. 428–440.

19. Выбор наиболее подходящего типа подключения для передачи необходимого количества полётной информации на трассе ВС-ЗЕМЛЯ / И. Е. Мухин, А. Н. Шевцов, А. В. Хмелевская, А. Н. Щитов // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2018. С. 448–454.

20. Мухин И. Е., Шевцов А. Н. Вариант построения телекоммуникационной сети передачи данных с борта воздушного судна на наземный диспетчерский пункт // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2019. С. 182–187.

References

1. Knievel A. 19 prilozhenie IKAO [19 ICAO Annex]. Moscow, AviaSoyuz Publ., 2014, pp. 16–25. (In Russ.)

2. Rukovodstvo po sisteme upravleniya bezopasnost'yu poletov pri ANO FGUP: rukovodstvo po SUBP [Guidelines for the safety management system at the Federal state unitary enterprise ANO: SMS Guidelines]. 1th ed. Moscow, Publishing House of Standards, 2014. 106 p. (In Russ.)

3. Rytenkova O. Razvitie novykh trendov v oblasti fiksirovannoi sputnikovoi svyazi [Development of new trends in the field of fixed satellite communications]. *Tekhnologii i sredstva svyazi = Technologies and means of communication*, 2015, no. 3, pp. 52-62. (In Russ.)

4. Rukovodstvo po upravleniyu bezopasnost'yu poletov [Guide to safety management: the SMM]. 1th ed. Moscow, Publishing House of Standards, 2006. 364 p. (In Russ.)

5. Rukovodstvo po upravleniyu bezopasnost'yu poletov [Guide to safety management: the SMM]. 2th ed. Moscow, Publishing House of Standards, 2009. 318 p. (In Russ.)

6. Rukovodstvo po upravleniyu bezopasnost'yu poletov [Guide to safety management: the SMM]. 3th ed. Moscow, Publishing House of Standards, 2013. 300 p. (In Russ.)

7. Dovbnya V. G., Sevryukov E. A. Vliyanie nelineinykh iskazhenii na pomekhoustoichivost' priema signalov s kvadraturnoi amplitudnoi manipulyatsiei [Influence of nonlinear distortions on the noise stability of receiving signals with quadrature amplitude manipulation]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2015, no. 3 (16), pp. 49-55. (In Russ.)

8. Novikov V. Bezopasnost' poletov aviatsii obespechivayut sputniki svyazi i navigatsii. Novye vozmozhnosti [Aviation safety is provided by communication and navigation satellites. New opportunity]. (In Russ.) Available at: http://www.tssonline.ru/. (accessed 10.01.2019).

9. 101-ya popravka Mezhdunarodnoi organizatsii grazhdanskoi aviatsii (IKAO) [101st amendment of the International civil aviation organization (ICAO)]. (In Russ.) Available at: http:// www.aviaport.ru/. (accessed 09.03.2019)

10. Provedenie proverok bezopasnosti poletov pri proizvodstve poletov aviakompaniyami. Programma LOSA [Conducting safety checks during flight operations by airlines. LOSA program]. 1th ed. Moscow, Publishing House of Standards, 2002. 67 p. (In Russ.)

11. Borodich S. V. Antenny i fidery. Peredacha informatsii po kanalam svyazi. Kontrol' i izmereniya v tekhnike svyazi [Antennas and feeders. The transmission of information via communication channels. Control and measurement in communication technology]. Moscow, NIIR Publ., 2017. 100 p. (In Russ.)

12. Anpilogov V. R. Sputnikovye sistemy massovogo obsluzhivaniya v Ka-diapazone [Satellite Queuing systems in the Ka-band]. *Tekhnologii i sredstva svyazi. Spetsial'nyi vypusk «Sputnikovaya svyaz' i veshchanie-2011» = Technologies and means of communication. Special issue "Satellite communications and broadcasting-2011"*, 2010, no. 6-2, pp. 96-98. (In Russ.)

13. Babanin I. G., Shevtsov A. N., Koptev D. S., Shchitov A. N. Otsenka vliyaniya neravnomernosti amplitudno-chastotnoi i fazo-chastotnoi kharakteristik sputnikovogo radio kanala na kogeretnyi priem fazo-modudirovannykh signalov maloi pozitsionnosti [Evaluation of the influence of uneven amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of satellite radio channel on coherent reception of phase-modulated signals of low positionality]. *T-Somm, Telekommunikatsii i transport = T-Comm, telecommunications and transport*, 2018, vol. 12 (6), pp. 9–17. (In Russ.)

14. Mukhin I. E., Shevtsov A. N., Koptev D. S., Shchitov A. N. [Analysis of adverse factors affecting the pilot of an aircraft during the flight]. Mediko-ekologicheskie informatsionnye tekhnologii – 2018. Sbornik nauchnykh sta-tei po materialam XXI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Medico-ecological information technologies-2018. Collection of scientific articles based on the materials of the XXI International scientific and practical conference]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2018, pp. 23-30. (In Russ.)

15. Mukhin I. E., Shevtsov A. N., Koptev D. S., Gust V. A. [Assessment of the possibility of integrating the system of operational medical control in the information exchange with ground control points]. Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Infocommunications and space technologies: status, problems, and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the II all-Russian scientific and practical conference]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2018, pp. 186-195. (In Russ.)

16. Mukhin I. E., Shevtsov A. N., Koptev D. S. [Study of the effect of overloads on the pilot's body during the flight]. Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Infocommunications and space technologies: status, problems, and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the II all-Russian scientific and practical conference]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2018, pp. 385-395. (In Russ.)

17. Shevtsov A. N. [Method of building a telecommunications network for transmitting data from an aircraft]. Programmnaya inzheneriya: sovremennye tendentsii razvitiya i primeneniya. Sbornik materialov [Software engineering: current trends in development and application. Collection of materials]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2020, pp. 212-220. (In Russ.)

18. Mukhin I. E., Shevtsov A. N., Chmielewska V. A., Shields A. N. [Analysis standards and coverage areas for mobile communications of the Russian Federation to determine

the possibility of transferring information with an aircraft on the ground, meeting the requirements of 101 amendments to ICAO]. Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoinauchno-prakticheskoi konferentsii [Infocommunications and space technologies: status, problems, and solutions. Collection of scientific articles on materials of the II Vserossiiskaya conference]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2018, pp. 428-440. (In Russ.)

19. Mukhin I. E., Shevtsov A. N., Khmelevskaya A.V., Shchitov A. N. [Selection of the most suitable type of connection for transmitting the required amount of flight information on the VS-EARTH route]. Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoinauchno-prakticheskoi konferentsii [Infocommunications and space technologies: status, problems, and solutions. Collection of scientific articles on the materials of the II all-Russian scientific and practical conference]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2018, pp. 448-454. (In Russ.)

20. Mukhin I. E., Shevtsov A. N. [Variant of building a telecommunications network for data transmission from an aircraft to a ground control station]. Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Infocommunications and space technologies: status, problems and solutions. Collection of scientific articles based on the materials of the III all-Russian scientific and practical conference]. Kursk, Southwest st. Univ. Publ., 2019, pp. 182-187. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: rtomakova@mail.ru
ORCID: 0000-0003-152-4714

Rimma A. Tomakova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: rtomakova@mail.ru
ORCID: 0000-0003-152-4714

Шевцов Алексей Николаевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация
e-mail: aleksey_shevtcsov95@mail.ru

Alexey N. Shevtsov, Post-Graduate student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation
e-mail: aleksey_shevtcsov95@mail.ru

К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;
- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.
- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);
- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. **Публикация бесплатная.**

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны-2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω, η, β, μ, ω, υ и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 *dpi* и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы**.

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: **https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/.**