ISSN 2500-316X

ЭЛЕКТРОННОЕ СЕТЕВОЕ ИЗДАНИЕ

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности

Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Микро- и наноэлектроника.
Физика конденсированного состояния

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств

Мировоззренческие основы технологии и общества

МИРЭА Российский технологический университет

ТОМ 7 № 6
2019 год

www.rtj-mirea.ru

ISSN 2500-316X

ЭЛЕКТРОННОЕ СЕТЕВОЕ ИЗДАНИЕ

РОССИЙСКИЙ технологический журнал

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
- Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
- Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
- Микро- и наноэлектроника. Физика конденсированного состояния
- Аналитическое приборостроение и технологии
- Математическое моделирование
- Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств
- Мировоззренческие основы технологии и общества

- Information Systems. Computer Sciences. Issues of Information Security
- Multiple Robots (Robotic Centers) and Systems. Remote Sensing and Non-Destructive Testing
- Modern Radio Engineering and Tele-Communication Systems
- Micro- and Nanoelectronics. Condensed Matter Physics
- Analytical Instrument Engineering and Technology
- Mathematical Modeling
- Economics of Knowledge-Intensive and High-Tech Enterprises and Industries
- Philosophical Foundations of Technology and Society

Российский технологический журнал = Russian Technological Journal
2019, том 7, № 6

Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal
2019, vol. 7, no. 6

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6

https://www.rtj-mirea.ru

МИРЭА
Российский технологический университет

https://doi.org/10.32362/2500-316X **ISSN 2500-316X (online)**

Электронное сетевое издание
Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2019, том 7, № 6
Дата опубликования 29 ноября 2019 г.

Журнал освещает вопросы комплексного развития радиотехнических, телекоммуникационных и информационных систем, электроники и информатики, а также результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

Периодичность: 6 раз в год.
Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 года издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026).

Учредитель и издатель:
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
119454, РФ, г. Москва, пр-кт Вернадского, д. 78.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ,
индексируется в
DOAJ,
РИНЦ (Science Index),
Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:
Сигов Александр Сергеевич — академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, президент МИРЭА – Российского технологического университета (РТУ МИРЭА), Москва, Российская Федерация. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Ответственный секретарь:
Есипова Ольга Валерьевна – к.х.н., доцент,
РТУ МИРЭА, член Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ),
esipova@mirea.ru.

Редакция:
Зав. редакцией Г.Д. Середина
Компьютерная верстка Л.Г. Семерня
119571, г. Москва, пр. Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-74578 от 14.12.2018 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Electronic network journal
Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2019, vol. 7, no. 6
Publication date November 29, 2019.

Journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Six issues a year are published.
The journal was founded in December 2013. The name was «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026).

Founder and Publisher:
Federal State Budget
Educational Institution
of Higher Education
«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia.

The journal is included into the List of peer-reviewed science press of the State Commission for Academic Degrees and Titles of Russian Federation.
The journal is indexed:
DOAJ, Science Index,
Ulrich's International Periodicals Directory.

Editor-in-Chief:
Alexander S. Sigov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor, President of MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russian Federation.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Executive Editor:
Olga V. Esipova – Cand. of Sci. (Chemistry), Associate Professor, RTU MIREA, member of the Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP),
esipova@mirea.ru.

Editorial staff:
Chief of the editorial staff Galina D. Seredina
Desktop publishing Larisa G. Semernya
86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Registration certificate Эл № ФС 77-74578, issued in December 14, 2018 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media of Russia.

https://www.rtj-mirea.ru

© МИРЭА – Российский технологический университет, 2019

Редакционная коллегия

Кудж Станислав Алексеевич — проф., д.т.н., ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56521711400, rector@mirea.ru.

Банис Юрас Йонович — проф., хабилитированный доктор наук, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва, Scopus Author ID 16515798800.

Боков Алексей Алексеевич — старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378.

Буслаева Татьяна Максимовна — проф., д.х.н., РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru.

Буш Александр Андреевич — проф, д.т.н., директор Института материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, http://orcid.org/0000-0003-3990-9847, bush@mirea.ru.

Вахрушев Сергей Борисович — проф., д.ф.-м.н., заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru.

Голованова Наталия Борисовна — проф., д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru.

Гуляев Юрий Васильевич — академик РАН, член Президиума РАН, проф., д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия, Scopus Author ID 35562581800.

Жуков Дмитрий Олегович — проф., д.т.н., заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru.

Кимель Алексей Вольдемарович — доцент, к.ф.-м.н., Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды, Scopus Author ID 6602091848.

Кондратенко Владимир Степанович — проф., д.т.н., заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru.

Крамаров Сергей Олегович — проф., д.ф.-м.н., Южный университет (ИУБиП), Ростов-на-Дону, Россия, Scopus Author ID 56638328000.

Мишина Елена Дмитриевна — проф., д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, http://orcid.org/0000-0003-0387-5016, mishina@mirea.ru.

Пасечник Сергей Вениаминович — проф., д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, http://orcid.org/0000-0002-6050-2761, pasechnik@mirea.ru.

Перно Филипп — проф., Центральная Школа г. Лилль, Франция, Scopus Author ID 7003429648.

Романов Михаил Петрович — проф., д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 14046079000, m_romanov@mirea.ru.

Савиных Виктор Петрович — член-корр. РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru.

Скотт Джеймс — проф., член Лондонского Королевского общества, Университет Кембриджа, Великобритания, Scopus Author ID 35549214200.

Соколов Виктор Васильевич — проф., д.ф.-м.н., советник по научной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru.

Тимошенко Андрей Всеволодович — проф., д.т.н., проректор по учебной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru.

Фетисов Юрий Константинович — проф., д.ф.-м.н., кафедры наноэлектроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru.

Харин Юрий Семенович — член-корр. НАН Беларуси, проф., д.ф.-м.н., директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546, kharin@bsu.by.

Цветков Виктор Яковлевич — проф., д.т.н., советник ректората РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru.

Editorial Board

Stanislav A. Kudzh Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56521711400, rector@mirea.ru.

Yuras Banis Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania, Scopus Author ID 56521711400.

Alexei A. Bokov Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378.

Tatyana M. Buslaeva Dr. of Sci. (Chemistry), Professor, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru.

Alexander A. Bush Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Materials of Solid State Electronics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, http://orcid.org/0000-0003-3990-9847, bush@mirea.ru.

Sergey B. Vakhrushev Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru.

Nataliya B. Golovanova Dr. of Sci. (Economics), Professor, Deputy First Vice-Rector of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru.

Yury V. Gulyaev Academician of the RAS, Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 35562581800.

Dmitry O. Zhukov Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru.

Alexey V. Kimel Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848.

Vladimir S. Kondratenko Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru.

Sergey O. Kramarov Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Professor, Southern University (IMBL), Rostov-on-Don, Russian Federation, Scopus Author ID 56638328000.

Elena D. Mishina Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, http://orcid.org/0000-0003-0387-5016, mishina@mirea.ru.

Sergey V. Pasechnik Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, http://orcid.org/0000-0002-6050-2761, pasechnik@mirea.ru.

Philippe Pernod Professor, Dean of Research, University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France, Scopus Author ID 7003429648.

Mikhail P. Romanov Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Cybernetics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 14046079000, m_romanov@mirea.ru.

Viktor P. Savinykh Corr. Member of the RAS, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru.

James F. Scott Professor, Fellow of the Royal Society of London, Cambridge University, United Kingdom, Scopus Author ID 35549214200.

Viktor V. Sokolov Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Professor, Adviser on Scientific Work of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru.

Andrey V. Timoshenko Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Vice Rector for Academic Affairs of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru.

Yury K. Fetisov Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Nanoelectronics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru.

Yury S. Kharin Corr. Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus, Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546, kharin@bsu.by.

Viktor Ya. Tsvetkov Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Councilor of the Administration of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАТИКА. ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Басок Б.М., Рожанская А.Н., Френкель С.Л.
О тестировании удобства использования веб-приложений **9**

Зуев А.С., Файчук Д.В.
Ультразвуковой программно-аппаратный комплекс учета пассажиров общественного транспорта **25**

Изергин Д.А., Еремеев М.А., Магомедов Ш.Г., Смирнов С.И.
Оценка уровня информационной безопасности мобильной операционной системы Android **44**

Nazarov A.N.
Processing streams in a monitoring cloud cluster **56**

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ. ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Романов А.М.
Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 2. Сервисная робототехника **68**

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Калигин Н.Н., Увайсов С.У., Увайсова А.С., Увайсова С.С.
Инфраструктурный обзор распределенной телекоммуникационной системы дорожного движения и ее протоколов **87**

Nguyen Minh Tuong, Nefedov V.I., Kozlovsky I.V., Malafeev A.V., Selenya K.A., Mirolyubova N.A.
Analysis of the Raman spectrum of high-power amplifiers of wireless communication systems **96**

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Кик М.А., Богомолов Г.Д., Сигов А.С., Шиляев А.А., Завьялов В.В., Вербицкий С.С., Целебровский А.Н.
Многоэлементный приемник для субмиллиметрового диапазона с пленочным чувствительным элементом на основе полуметаллов в тепловизорах смотрящего типа **106**

СОДЕРЖАНИЕ

Кик М.А., Голоколенов И.А., Сигов А.С., Шиляев А.А., Завьялов В.В., Вербицкий С.С., Целебровский А.Н.
Термочувствительные тонкопленочные элементы на основе полуметаллов для приемников электромагнитного излучения **122**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Анфёров М.А.
Генетический алгоритм кластеризации **134**

МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И ОБЩЕСТВА

Кудж С.А., Цветков В.Я.
Тринитарные системы **151**

CONTENTS

INFORMATION SYSTEMS. COMPUTER SCIENCES. ISSUES OF INFORMATION SECURITY

Basok B.M., Rozhanskaya A.N., Frenkel S.L.
On web-applications usability testing **9**

Zuev A.S., Faichuk D.V.
Ultrasonic software-hardware complex for tracking public transport passengers **25**

Izergin D.A., Eremeev M.A., Magomedov S.G., Smirnov S.I.
Information security evaluation for Android mobile operating system **44**

Nazarov A.N.
Processing streams in a monitoring cloud cluster **56**

MULTIPLE ROBOTS (ROBOTIC CENTERS) AND SYSTEMS. REMOTE SENSING AND NON-DESTRUCTIVE TESTING

Romanov A.M.
A review on control systems hardware and software for robots of various scale and purpose. Part 2. Service robotics **68**

MODERN RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Kaligin N.N., Uvaysov S.U., Uvaysova A.S., Uvaysova S.S.
Infrastructural review of the distributed telecommunication system of road traffic and its protocols **87**

Nguyen Minh Tuong, Nefedov V.I., Kozlovsky I.V., Malafeev A.V., Selenya K.A., Mirolyubova N.A.
Analysis of the Raman spectrum of high-power amplifiers of wireless communication systems **96**

MICRO- AND NANOELECTRONICS. CONDENSED MATTER PHYSICS

Kik M.A., Bogomolov G.D., Sigov A.S., Shilyaev A.A., Zavyalov V.V., Verbitsky S.S., Tselebrovsky A.N.
Multi-element receiver with semimetal film sensing element for the submillimeter thermal imagers of viewing type **106**

CONTENTS

Kik M.A., Golokolenov I.A., Sigov A.S., Shilyaev A.A., Zavyalov V.V., Verbitsky S.S., Tselebrovsky A.N.
Thin-film heat-sensitive elements on the basis of semimetals for receivers electromagnetic radiation **122**

MATHEMATIC MODELING

Anfyorov M.A.
Genetic clustering algorithm **134**

PHILOSOPHICAL FOUNDATIONS OF TECHNOLOGY AND SOCIETY

Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya.
Trinitarian systems **151**

ISSN 2500-316X (Online)

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-9-24

CC BY

УДК 004.415.53(075)

О тестировании удобства использования веб-приложений

Б.М. Басок[1,@], А.Н. Рожанская[1], С.Л. Френкель[2]

[1]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[2]Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление», Российская академия наук, Москва 119333, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: basok@mirea.ru

В статье рассматривается задача организации тестирования удобства использования находящихся в опытной или промышленной эксплуатации веб-приложений (юзабилити-тестирование). Описываются методика юзабилити-тестирования, объединяющая разработку, отладку и выполнение тестовых сценариев, и анализ полученных данных тестирования. Разработка тестовых сценариев основывается на использовании накопленного опыта пользователей, уже работавших с этим приложением, или с другим, схожим по функциональному назначению, на применении средств веб-аналитики, которые могут предоставить сценарии поведения данных пользователей на сайте, на использовании статистических данных по посещениям конкретных страниц. Одновременно с данным подходом при построении тестов используется другой подход, основывающийся на разработке тестов, ориентированных на выявление предполагаемых в программе дефектов. Отладка и выполнение тестовых заданий осуществляется аналогично тому, как это реализуется при выполнении функционального тестирования веб-приложений с использованием средств автоматизации тестирования. Кроме того, анализ полученных при эксплуатации данных с помощью средств веб-аналитики позволяет сформировать группу тестировщиков-респондентов, возможности которых отражают возможности всей совокупности вероятных пользователей данного веб-приложения. Изложенные в работе подходы были реализованы на практике. В статье в качестве примера приводятся данные тестирования страницы приемной комиссии МИРЭА – Российского технологического университета – priem.mirea.ru. Полученные экспериментальные данные показали, что, несмотря на тестирование удобства использования программного обеспечения на этапах разработки, некоторые ошибки при эксплуатации веб-приложений остаются необнаруженными. Цена обнаружения и ликвидации

данных ошибок при этом существенно возрастает, поэтому в работе рекомендуется повышать уровень юзабилити уже на ранних этапах разработки. В частности, для оперативного предсказания уровня юзабилити желательно иметь математические средства моделирования поведения проектируемой системы и пользователя.

Ключевые слова: веб-приложение, юзабилити-тестирование, методика тестирования, средства веб-аналитики.

Для цитирования: Басок Б.М., Рожанская А.Н., Френкель С.Л. О тестировании удобства использования веб-приложений. *Российский технологический журнал.* 2019;7(6):9-24. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-9-24

On web-applications usability testing

Boris M. Basok[1,@],
Alena N. Rozhanskaya[1],
Sergey L. Frenkel[2]

[1]MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[2]Federal Research Center "Computer Science and Control," Russian Academy of Sciences, Moscow 119333, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: basok@mirea.ru

The paper discusses the task of organizing the usability testing of web applications that are in pilot or industrial operation. A usability testing technique is described that combines the development, debugging and execution of test scenarios, and analysis of the received test data. The development of test scenarios is based: on the use of the accumulated experience of users who have already worked with this application or with another, similar in functionality; on the use of web analytics, which can provide scenarios of the behavior of user data on the site; and on the use of statistical data on visits to specific pages. Simultaneously with this approach, a different approach is used in the construction of tests. It is based on the development of tests aimed at identifying defects in the program. Debugging and execution of test tasks is carried out in the same way as it is realized when performing functional testing of web applications using testing automation tools. In addition, the analysis of the data obtained during the operation using web analytics makes it possible to form a group of respondent testers, whose capabilities reflect the capabilities of the entire set of probable users of this web application. The approaches outlined in the work were put into practice. As an example, the article provides test data for the page of the admissions committee of MIREA – Russian Technological University – priem.mirea.ru. The obtained experimental data showed that, despite testing the usability of software at the development stages, some errors in the operation of web applications remain undetected. The cost of detecting and eliminating these errors increases significantly. Therefore, it is recommended in the work to increase the level of usability already in the early stages of development. In particular, for the operational prediction of the level of usability, it is desirable to have mathematical tools for modeling the behavior of the designed system and the user.

Keywords: web application, usability testing, testing methodology, web analytics.

For citation: Basok B.M., Rozhanskaya A.N., Frenkel S.L. On web applications usability testing. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):9-24 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-9-24

Введение

Важнейшей характеристикой любой интерактивной системы является удобство ее использования. Удобство использования (*usability*), определяемое в стандарте ISO/IEC 25066-2016[1] как степень, в которой система, продукт или услуга могут использоваться пользователями для достижения определенных целей с эффективностью, результативностью и удовлетворенностью в определенном контексте применения. Удобство использования (в дальнейшем – юзабилити) графического интерфейса пользователя в программных системах – это качественный признак, который определяет, насколько интерфейс пользователя удобен в эксплуатации. Другими словами, интерфейс считается удобным в том случае, когда для выполнения необходимых действий пользователю требуется достаточно малые затраты времени для чтения, изучения и анализа.

Согласно опытным данным [1], на обеспечение юзабилити тратится до десяти процентов бюджета проекта. Повышенное внимание к юзабилити, начиная с ранних стадий разработки программных продуктов, позволит на этапе их эксплуатации добиться увеличения производительности, продаж и доходов, уменьшения затрат на обучение, развитие и обслуживание.

На уровень юзабилити программных систем, как следует из его определения, влияют эффективность, результативность и удовлетворенность, поэтому его оценка, в конечном счете, сводится к оценке данных свойств анализируемой системы. Существует множество методов оценки юзабилити, но основной из них и самый полезный – это метод тестирования. Благодаря юзабилити-тестированию удается с помощью эксперимента измерить основные характеристики взаимодействия пользователя с системой.

В данной работе рассматривается задача организации юзабилити-тестирования веб-приложений, находящихся в опытной или в промышленной эксплуатации, описывается методика тестирования, основывающаяся на классических подходах к тестированию программных систем [1, 2]. В основу данной методики положены разработка и отладка тестовых сценариев, ориентированных на выявление ошибок пользователей и используемых ими программ. Предлагаемая методика одновременно использует совокупность различных методов юзабилити-тестирования с учетом их достоинств и недостатков, в том числе анкетирование и опрос пользователей. В данной методике широко используются средства автоматизации тестирования и веб-аналитики. В работе приводятся некоторые экспериментальные данные применения разработанных авторами подходов.

1. Основные понятия и определения

Прежде чем рассматривать вопросы тестирования удобства использования веб-приложений, приведем несколько определений и понятий с учетом стандарта ISO/IEC 25066-2016:

Под эффективностью (*effectiveness*) понимается связь между достигнутым результатом и использованными ресурсами. В качестве показателей эффективности юзабилити можно использовать:

- скорость работы пользователя;
- скорость обучения;
- количество человеческих ошибок.

Под результативностью (*efficiency*) понимается степень реализации запланированной деятельности и достижения запланированных результатов. К показателям результативности юзабилити можно отнести:

[1] Международный стандарт ISO/IEC 25066:2016. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Common Industry Format (CIF) for Usability – Evaluation Report.

- соотношение выполненных и невыполненных заданий;
- уровень нагрузки на пользователя. Этот показатель сложно измерить непосредственно, но косвенно он проявляется в показателях эффективности, например, в зависимости скорости работы от интенсивности нагрузки.

Под удовлетворенностью юзабилити понимается отсутствие дискомфорта и положительное отношение к использованию продукции.

Дефект удобства использования (*usability defect*) – это свойства продукта, которые приводят к несоответствию между намерениями и/или действиями пользователя, а также системными свойствами и поведением.

Типичные дефекты удобства использования включают:

- дополнительные шаги, не требуемые как часть выполнения задачи;
- наличие информации, вводящей в заблуждение пользователя;
- недостаточную информацию о пользовательском интерфейсе;
- неспецифицированные в документации неожиданные системные ответы;
- ограничения в навигации;
- неэффективные механизмы восстановления ошибок использования;
- физические характеристики пользовательского интерфейса, которые не подходят для физических характеристик пользователя.

Юзабилити-тестирование (в дальнейшем ЮТ) – это набор методов и инструментов, позволяющих обнаружить приведенные выше дефекты и измерить отмеченные характеристики взаимодействия пользователя с продуктом (в нашем случае – с программным продуктом, веб-приложением) для оценки уровня пользовательских свойств. Цель ЮТ – обнаружить и объяснить поведение человека в сложных системах при специфических обстоятельствах, «неэффективное» с той или иной точки зрения, а также свойства продукта, которые приводят к несоответствию между намерениями и/или действиями пользователя, а также системными свойствами и поведением.

Таким образом, в соответствии с вышесказанным ЮТ содержит:

а) проверки для выявления дефектов удобства использования и потенциальных проблем удобства использования, включая:

– отклонения объекта оценки от определенных критериев, таких как требования пользователей, руководящие принципы проектирования или установленные договоренности;

– потенциальные проблемы удобства использования при попытке выполнить одну или несколько задач с целью оценки;

б) наблюдение за пользователями, включая:

– наблюдение за поведением пользователей для определения фактических результатов использования;

– измерение производительности и реакции пользователя (например, время, затрачиваемое на выполнение задачи, количество ошибок использования, проводимость кожи или расширение глазного зрачка);

в) опросы пользователей, включая:

– выявление проблем, мнений и впечатлений от пользователей (качественные опросы пользователей);

– измерение уровня удовлетворенности или восприятия пользователя, например, оценочные значения шкалы для удовлетворения или для субъективно воспринимаемой эффективности или результативности (количественные опросы пользователей);

– другие данные, сообщенные пользователем (например, данные, полученные от человека в сочетании с данными наблюдений).

ЮТ выполняется как на этапе разработки программного продукта (промежуточное тестирование), так и во время его эксплуатации, по требованию пользователей (полное тестирование) [3].

В данной работе рассматривается задача полного ЮТ программного продукта, находящегося в опытной или промышленной эксплуатации.

2. Методы юзабилити-тестирования и постановка задачи

Среди известных методов, используемых в процедурах полного ЮТ, следует выделить [4]: метод экспертной оценки, метод сегментации пользовательской аудитории, метод оценки производительности, анализ рабочих заданий и метод, известный как «Мысли вслух». Коротко рассмотрим эти методы.

Экспертная оценка

Данный метод предполагает привлечение к тестированию экспертов в области юзабилити и профессиональных дизайнеров интерфейсов. В ходе исследования продукта они выявляют имеющиеся, на их взгляд, проблемы. Эксперт способен определять основные проблемы благодаря знанию стандартов интерфейсов, как официальных, так и неофициальных (например, корпоративных). Также опыт работы позволяет находить проблемы, которые ранее встречались при тестировании других продуктов. Качество экспертной оценки можно улучшить, увеличив количество экспертов.

Однако данный метод обладает своими недостатками. Основной – субъективность оценки. Также экспертная оценка зависит от опыта эксперта, что может привести либо к низкому качеству тестирования, либо к высокой оплате услуг эксперта.

Сегментация пользовательской аудитории

Сегментирование целевой аудитории – это разделение аудитории на группы, где они объединены по признаку схожих потребностей (запросов). В рамках этого метода вся пользовательская аудитория делится на различные группы по определенным похожим характеристикам их представителей. Это необходимо для понимания целей пользователей каждой группы. Для формирования репрезентативной выборки необходимо создать «портрет» представителей каждой группы целевой аудитории, персонифицировать их. В результате должна быть получена выборка, отражающая потребности всех возможных пользователей, для которых был разработан продукт. В работе [5] показано, что достаточно использовать выборку из 5–8 респондентов. При этом при использовании выборки из пяти респондентов находят в среднем 85% проблем, а при использовании выборки из восьми респондентов фиксируется почти 95% проблем. В работах [6–8] рекомендуется увеличить размер выборки до двенадцати. По мнению авторов, таким образом можно обеспечить более полное представительство различных групп целевой аудитории и тем самым сделать ЮТ более эффективным.

Оценка производительности

Данный метод в большей степени направлен на получение количественных данных. Пользователи (выбранные респонденты) выполняют определенный набор заданий, в ходе которых замеряются показатели затраченного времени, количество выполненных задач, совершенных действий, совершенных ошибок. Важно отметить, что общение между организатором и респондентом должно быть сведено к минимуму, без вмешательства

в процесс работы пользователя. Для получения данных об удовлетворенности от работы с системой рекомендуется провести небольшую беседу или анкетирование после выполнения заданий. Также можно попытаться сделать выводы при наблюдении за пользователем в ходе тестирования по косвенным признакам и реакциям.

Особо важной частью этого метода является анализ полученной информации. Количественные данные могут помочь определить области, в которых сосредоточены основные недостатки интерфейса. Стоит учитывать, что найденная ошибка может быть вызвана не проблемами продукта, а невнимательностью данного респондента. Кроме того, необходимо учитывать модель поведения пользователя. Дело в том, что пользователь может выбрать сознательно при исполнении заданий не оптимальный по времени путь. Это может быть связано с его личными качествами или недостаточной подготовкой для работы с данным интерфейсом. Из этого следует необходимость подробного исследования ошибок для определения вызвавших их причин.

Анализ рабочих заданий

Данный метод – это набор заданий в форме анкетирования или интервью для получения представления о том, как люди в настоящий момент выполняют конкретные задания.

«Мысли вслух»

Метод заключается в том, что респондент проговаривает все возникающие у него мысли в течение работы с тестируемым продуктом. Благодаря этому можно понять, как именно пользователь воспринимает продукт и чем могут быть обусловлены его действия. В ходе выполнения задания допускается помощь наблюдателя с использованием наводящих вопросов, но не прямых подсказок касательно интерфейса. Данный метод может показывать высокую эффективность даже с небольшим количеством респондентов, однако он не направлен на получение точных количественных данных. Причина в том, что потребность в озвучивании своих мыслей снижает скорость работы. Также важно отметить, что такой подход может повлиять на пользователей, побуждая их действовать логично и обдуманно, завышая результаты выполнения заданий.

В целом, анализ рассмотренных методов показал, что, несмотря на ряд исследований и достижений, в данной области отсутствует универсальная методика оценки юзабилити программных приложений, применение которой позволит инженеру-тестировщику достаточно эффективно организовать ЮТ. В данной работе предлагается такая методика, основывающаяся, с одной стороны, на сочетании рассмотренных выше методов ЮТ, а с другой стороны, использующая стратегию классического тестирования программных средств.

3. Основные положения методики юзабилити-тестирования

В соответствии с классическим подходом к тестированию программных продуктов рассматриваемая методика ЮТ состоит из следующих разделов:

- определение целей исследования – объектов тестирования;
- создание команды тестирования и распределение обязанностей;
- разработка и отладка системы тестов;
- создание среды тестирования;
- выполнение тестов;
- документирование результатов тестирования;
- анализ полученных данных и выработка рекомендаций по повышению качества.

Рассмотрим каждый из данных разделов.

Цели исследования формируются согласно поведению посетителей сайта. Определение целей начинается с определения основных пользовательских задач сайта. Последние представляют собой задачи, которые ставят перед собой пользователи в ходе применения продукта. Для определения этих задач можно использовать инструменты веб-аналитики, например, сервис Яндекс.Метрика [9, 10], предназначенный для сбора статистики посещений, с включенным в него инструментальным средством вебвизор, одна из полезных функций которого – запись всех действий пользователя на сайте [11].

Из полученного списка задач далее выбираются ключевые цели для проведения тестирования. В процессе выбора следует руководствоваться двумя принципами:

- задачи должны быть реальными, обычными для пользователя. Делать задания слишком сложными не имеет смысла – не стоит искать проблему, с которой никто не сталкивался.
- протестировать абсолютно все пользовательские задачи представляется маловероятным. Тестировать стоит только важные задачи, а именно, популярные задачи и те, при выполнении которых предположительно возможны ошибки.

Результатом выполнения данного этапа является подлежащий тестированию список целей.

В соответствии с классическим подходом к тестированию программ основными участниками процесса тестирования являются разработчики тестов и исполнители-тестировщики. При ЮТ функции разработчика тестовых сценариев выполняет юзабилити-специалист, который выбирает подходящие сценарии для определенных целей тестирования и составляет для них описания, которые будут переданы в качестве заданий тестировщикам. Кроме того, этот специалист должен уметь пользоваться средствами автоматизации тестирования и веб-аналитики.

Выбор тестировщиков при ЮТ имеет свои особенности. Это должны быть представители типичных для пользователей групп (сегментов целевой аудитории), определяемых с помощью средств веб-аналитики. При этом на выбор тестировщиков также должны влиять:

- опыт работы с продуктом. Рекомендуется набирать половину респондентов с опытом работы для определения проблем, связанных с переучиванием, а половину – без опыта работы, для определения скорости обучения;
- уровень компьютерной грамотности. Рекомендуется соблюдать такую пропорцию: три четверти – с уровнем, совпадающим с опытом целевой аудитории, у одной четвертой уровень ниже, благодаря чему можно определить большее количество проблем;
- возраст тестировщиков. Рекомендуется три четверти тестировщиков выбирать возраста целевой аудитории, а оставшуюся четверть – вне пределов этого возраста.

Кроме перечисленных критериев, на выбор тестировщиков должна влиять их эмоциональная открытость, благодаря которой при опросах и оценке удовлетворенности можно получить необходимую для анализа информацию.

Как уже упоминалось в предыдущем разделе, количество тестировщиков можно ограничить примерно десятком человек, которые смогут обнаружить до 95% имеющихся проблем.

Важнейшим этапом ЮТ является разработка тестовых сценариев, поскольку от качества тестов зависит, в конечном счете, оценка удобства использования программного продукта. Тестовые сценарии должны соответствовать выбранным ранее целевым задачам. При их успешном выполнении должна быть получена конкретная, заранее известная требуемая информация (сообщения, рисунки, таблицы, результаты вычислений и т. д.). При этом следует отметить, что тестовые задания при ЮТ существенно отличаются от

классических тестовых заданий. Дело в том, что при классическом тестировании тестовые задания реализуются строго по шагам, указанным в сценарии, в то время как при ЮТ в сценарии приводятся общая постановка задачи, ее конечная цель и действия, необходимые для начала тестирования. В остальном тестировщику предоставлена полная свобода действий.

Для разработки тестовых сценариев можно использовать накопленный опыт пользователей, уже работавших с этим приложением или с другим, схожим по функциональному назначению. Для этого можно провести устный опрос этих пользователей, выяснить, что они ждут от данного приложения, на какие его возможности рассчитывают в первую очередь. Результат опроса – разработка тестовых сценариев, демонстрирующих эти возможности.

Кроме того, можно воспользоваться средствами веб-аналитики, которые могут предоставить сценарии поведения данных пользователей на сайте. Например, вебвизор может продемонстрировать все действия, совершенные пользователем за конкретный сеанс, из чего можно сделать вывод о том, какие цели он преследовал на сайте. Также в составлении сценариев может помочь статистика по посещениям конкретных страниц.

Однако не стоит всецело полагаться на данные, полученные из сервиса. Статистика показывает успешно достигнутые цели, но отображает и то, чего пользователи искали, но не нашли. Поэтому в данном случае разработчик тестов выбирает подходящие сценарии для определенных целей тестирования и составляет для них описания, которые будут поставлены в качестве заданий перед тестировщиками.

Третий подход к составлению тестовых сценариев – это самостоятельная работа разработчика тестов на основе прилагаемой документации и накопленного опыта работы с программным продуктом.

Созданные вышеописанными способами тестовые сценарии объединяются в совокупность тестов проверки удобства использования. Затем происходит минимизация их количества путем сокращения схожих по своему назначению сценариев. После определения совокупности тестов все указанные в них задания выполняются разработчиком тестов.

Тестовые процедуры тщательно контролируются, выполняются неоднократно, ошибки исправляются, а полученные таким образом данные, например, такие, как время прохождения теста, количество совершенных переходов и т. п., можно считать эталонными при оценке действий тестировщиков.

Затем осуществляется окончательная проверка сценариев с использованием небольшой группы тестировщиков, например, состоящей из одного-двух представителей от каждой группы целевой аудитории. Главная цель этого тестирования – убедиться, что тестировщики правильно понимают поставленные задачи, что они не вызывают никаких трудностей. Низкая оценка сценария может служить основанием для его переработки. При этом на данном этапе осуществляется экспресс-оценка удобства использования анализируемого веб-приложения. Эта проверка является некоторым аналогом смоук-тестирования при классическом тестировании программ [1, 2].

По завершении окончательной проверки все тестовые сценарии вновь выполняются разработчиком тестов. При этом все действия запоминаются путем их автоматической записи с помощью Selenium IDE – инструмента для автоматизации действий в браузере в режиме Записи / Воспроизведения (Recorder / Player) [12]. Сценарии сохраняются в формате HTML. Таким образом, получаются копии тестовых сценариев, которые можно в любой момент запускать в автоматическом режиме.

Полученный автотест может в дальнейшем использоваться для повторной проверки сценария в случае каких-либо проблем при проведении тестирования. Например, если у тестировщика появились трудности во время выполнения задания и он не может достичь цели. В этом случае путем запуска нужного автотеста можно убедиться, что цель либо достижима, либо сайт был изменен, а цель находится в другом разделе сайта или уже недоступна.

При выполнении тестов тестировщики последовательно проходят на сайте подготовленные сценарии. Можно разделить все задания между участниками так, чтобы часть выполняла их согласно методу «Мысли вслух», озвучивая все свои рассуждения в ходе выполнения заданий, а другая часть – без рассуждений, с простым замером количественных данных с использованием метода «Оценка производительности». Очевидно, что первая группа должна быть существенно меньше второй, поскольку, как указывалось выше, в первом случае требуются при выполнении дополнительные затраты времени на проговаривание мыслей, а действия тестировщика становятся более разумными. При этом использование метода «Мысли вслух» позволит лучше понять, как воспринимается программный продукт пользователем, а оценка времени выполнения тестов определяется путем сравнения данных, полученных с использованием метода «Оценки производительности».

Для оценки уровня удовлетворенности и для получения дополнительных данных по завершении выполнения заданий тестировщики проходят ряд опросов или анкетирование.

Один из наиболее простых, но не самых надежных способов оценки удовлетворенности – анкета по словам [7, 8]. Тестировщику предоставляется список случайно подобранных прилагательных, половина которых носит позитивную оценку, а другая – негативную, например, «эффективный», «нечеткий», «неудобный», «бесполезный», «последовательный», «качественный» и т. д. Все слова располагаются в случайном порядке. Участник должен выбрать те слова, которые, на его взгляд, описывают продукт. По завершении подсчитывается разница между числом негативных и позитивных слов.

Еще один способ – формальная анкета. В отличие от предыдущего, это менее универсальный способ, поскольку анкета требует адаптации под конкретный проект. Она содержит несколько вопросов или положений. Например, анкета может включать следующие положения: «Я доволен скоростью своей работы», «Во время выполнения заданий я чувствовал себя вполне уверенно», «В любой момент времени я понимаю, что должен сделать дальше». Ответы пользователя представляются в виде оценки по пятибалльной шкале от –2 до +2 баллов [7, 8].

В завершение в форме опроса или в форме беседы можно получить развернутый ответ на интересующие вопросы. Например, на следующие:

- Какие задания были для Вас наиболее сложными?
- Что бы Вы хотели поменять в сайте?
- Какие Вы можете предложить улучшения?
- Какие решения, наоборот, кажутся Вам удачными?

Не стоит забывать, что при проведении тестирования не исключается возможность обнаружения проблем, не найденных ранее, что послужит причиной возвращения к этапу разработки тестовых сценариев для исправления. Среди таких проблем могут быть, например, некорректное понимание заданий большинством участников, изменение сайта.

После завершения выполнения тестовых заданий выполняется анализ полученных результатов. Итогом данного этапа будут выводы или гипотезы об уровне удобства исполь-

зования тестируемой версии сайта. Формируются они следующим образом. Количественные данные, такие как количество совершенных действий, успешность выполнения заданий, количество ошибок, сравниваются с эталонным значением по каждому заданию, выполненному как с использованием метода «Оценка производительности», так и с использованием метода «Мысли вслух». Серьезная разница у большинства участников может говорить о наличии дефектов удобства использования при выполнении конкретных заданий.

Оценка времени выполнения заданий путем сравнения с эталонными данными осуществляется только для тех тестировщиков, которые реализовали тестовые сценарии методом «Оценка производительности».

Уровень удовлетворенности определяется согласно выбранной анкете. Обычно в качестве эталонного результата берется максимальное значение, которое можно получить в анкете. Низкий показатель уровня удовлетворенности конкретного тестировщика может быть основанием более подробного изучения качественных данных, полученных от него. Однако при этом не стоит забывать, что могут проявляться и какие-то личные качества, не зависящие от объекта тестирования.

Анализ качественных данных, всех видео- и аудиоматериалов, а также опросов требуют иного подхода. Проблемы, с которыми сталкиваются тестировщики в этом случае, отображаются наглядно. Однако они могут быть индивидуальными, например, из-за личной невнимательности. Идентификация такой ситуации возможна с помощью вебвизора – возможно, кто-то из реальных посетителей также столкнулся с этой проблемой. Явно обозначит дефект юзабилити и повторяющаяся среди тестировщиков ошибка.

При опросе, релевантном как опыту тестировщиков, так и рассматриваемым дефектам, респонденты также могут указать на то, что они считают неудобным, или на то, что, по их мнению, можно улучшить.

Все найденные проблемы необходимо зафиксировать и присвоить им приоритеты. Описание проблемы должно быть точным и лаконичным, мало отличающимся от описания дефектов при классическом функциональном тестировании программ [13]. В этом описании должны быть указаны: краткое содержание проблемы, тестовые задания, при выполнении которых эта проблема была обнаружена, среда, в которой осуществлялась тестирование. Для воспроизведения данной проблемы разработчиками веб-приложения, возможно, стоит добавить перечень пройденных шагов от начала выполнения тестового задания до шага, на котором возникает рассматриваемая проблема, а при необходимости приложить соответствующие аудио- и видеоматериалы. Оптимальный перечень приоритетов можно описать так:

- критическая ошибка – мешает выполнению задачи;
- серьезная ошибка – вызывает сложности у большинства пользователей;
- незначительная ошибка – вызывает раздражение, но особых затруднений не создает.

Используя результаты анализа, юзабилити-специалист должен предложить рекомендации по улучшению удобства использования веб-приложений и передать их разработчикам сайта.

4. Особенности реализации и некоторые результаты

Предложенная методика была использована при оценке удобства использования priem.mirea.ru – страницы приемной комиссии МИРЭА – Российского технологического университета (РТУ МИРЭА). Основную функцию сайта можно определить, как информационную. В большинстве случаев он посещается с целью найти нужную информацию.

Сайт используется для поиска информации о подходящих программах и направлениях обучения, о порядке подачи документов в Приемную комиссию. Поэтому цель исследования – узнать, насколько легко пользователю найти нужную ему информацию.

Согласно данным, полученным с помощью Яндекс.Метрики, удалось определить четыре основные группы пользователей-посетителей данного сайта. Эти группы объединяют в своем составе порядка 90% всех пользователей сайта. Первую группу образуют посетители моложе 18 лет (абитуриенты), вторую и третью – пользователи в возрасте 18–24 лет (студенты РТУ МИРЭА и студенты других вузов), четвертую группу образуют пользователи в возрасте 35–54 лет (родители абитуриентов).

Уровень компьютерной грамотности каждой группы подразумевается как средний или выше среднего, то есть предполагается, что работа респондента с компьютером является частью обычной деятельности в течение двух или более лет. Подразумевается, что опыт работы с сайтом есть у группы студентов из РТУ МИРЭА. В состав остальных групп включены респонденты, которые уже пользовались сайтами других университетов. Также для исследования юзабилити в каждую группу было включено хотя бы по одному представителю, кто не имел опыта работы с подобными сайтами вообще.

Исходя из поставленных целей и сформированной целевой аудитории, к тестированию было привлечено 12 пользователей – по три представителя от каждой группы, среди которых были респонденты с указанными выше особенностями.

Для составления актуальных сценариев поведения пользователей на сайтах университетов был проведен небольшой опрос среди целевой аудитории. Для составления сценариев также использовались статистические данные просмотров страниц сайта, полученные с использованием возможностей веб-аналитики. При этом, на основе изучения данных веб-аналитики, до начала ЮТ были выявлены потенциальные дефекты. В частности, по данным карты кликов сайта priem.mirea.ru можно предположить, что пользователям не очевидно назначение ссылки «Гид по специальностям» как способа выбора подходящей специальности. В то время как большой популярностью пользуются ссылки «Программы обучения, число мест».

На основании полученных таким образом данных были сформированы следующие задания:

1. Найти направление(-я) бакалавриата с подходящими предметами, проходными баллами и ценой обучения;
2. Найти подробную информацию о направлении магистратуры;
3. Найти подробную информацию о направлении аспирантуры;
4. Найти подробную информацию о программах среднего профессионального образования;
5. Найти перечень необходимых документов для поступления в магистратуру;
6. Найти расписание приема документов;
7. Найти свидетельство государственной аккредитации университета;
8. Найти информацию о предоставлении общежития;
9. Найти информацию о порядке зачисления на программы бакалавриата;
10. Найти, где задать вопрос приемной комиссии;
11. Найти дату ближайшей встречи по вопросам поступления;
12. Найти информацию о порядке перевода в МИРЭА из других вузов.

Каждый тестировщик (табл. 1) получил по 2 задания, при выполнении которых он озвучил свои мысли согласно методу «Мысли вслух». Еще 4 задания выполнялись согласно методу «Оценка производительности». Задания у каждого тестировщика не повторялись. Не было повторений при распределении заданий по методам в рамках группы.

Таблица 1. Распределение заданий между тестировщиками

Группа	Метод «Мысли вслух»	Метод «Оценка производительности»
Абитуриенты	1, 7	2, 6, 8, 11
	6, 10	3, 5, 9, 12
	2, 8	1, 4, 7, 10
Студенты других вузов	5, 11	1, 4, 7, 10
	3, 9	2, 6, 8, 12
	4, 12	3, 5, 9, 11
Студенты РТУ МИРЭА	1, 5	2, 6, 8, 11
	3, 7	4, 5, 9, 12
	9, 11	1, 3, 7, 10
Родители	2, 6	1, 7, 10, 11
	4, 8	2, 6, 9, 12
	10, 12	3, 4, 5, 8

В соответствии с предлагаемой методикой было проведено предварительное (пилотное) тестирование. Для его реализации было выделено два тестировщика. В ходе тестирования с первым респондентом были скорректированы формулировки некоторых задач на более конкретные. В остальном же оба респондента не столкнулись с какими-либо трудностями.

Далее все задания были многократно выполнены вручную разработчиком тестов – юзобилити-специалистом. Полученные таким образом данные (время прохождения каждого теста, количество выполненных шагов, маршруты переходов по ссылкам и т. д.) будут использоваться как эталонные и рекомендуемые при выполнении заданий тестировщиками. Кроме того, с помощью Selenium IDE были записаны все действия юзабилити-специалиста и получены таким образом 12 автоматических тестов, которые всегда можно запустить для анализа действий тестировщиков и проверки отсутствия изменений в содержимом рассматриваемого сайта.

После того, как каждый тестировщик в индивидуальном порядке выполнил все отведенные ему задания, были получены следующие количественные результаты, приведенные в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Время выполнения заданий, мин:с

№ задания	Метод «Мысли вслух»		Метод «Оценка производительности»			
1	3:31	1:07	2:54	1:05	5:21	1:24
2	2:56	1:49	1:12	0:39	4:51	3:12
3	1:44	2:41	3:16	0:46	0:54	1:50
4	0:57	1:35	4:51	1:29	0:37	0:58
5	5:23	0:33	0:16	0:17	0:15	0:28
6	0:51	0:28	0:34	0:51	1:27	1:03
7	1:32	0:58	1:40	0:35	2:08	0:41
8	2:08	1:23	0:31	0:47	2:03	0:25
9	0:48	0:38	0:37	1:03	0:10	0:41
10	0:42	0:20	0:56	0:11	0:39	0:49
11	0:46	3:37	5:04	0:22	0:38	1:40
12	1:07	0:31	0:19	0:50	0:35	0:27

Таблица 3. Количество ошибок при выполнении заданий

№ задания	Метод «Мысли вслух»		Метод «Оценка производительности»			
1	2	1	2	1	3	1
2	3	1	1	1	3	2
3	1	1	2	1	0	2
4	1	0	2	3	0	0
5	2	0	0	0	0	0
6	1	0	0	1	0	1
7	1	1	1	2	1	1
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	2	3	0	0	3
12	0	0	0	0	0	0

Больше всего ошибок было допущено при выполнении заданий с 1 по 4. Данные задания образуют группу, связанную с получением информации о направлениях обучения. Стабильное совершение ошибок при выполнении заданий, а также существенные затраты времени при выполнении этих заданий респондентами в рамках метода «Оценка производительности» говорят о наличии дефекта юзабилити.

Для получения качественной информации об уровне удовлетворенности при работе с сайтом был проведен небольшой опрос, с помощью которого можно узнать сформированное отношение к сайту, наиболее сложные или, наоборот, простые задания, какие решения в дизайне сайта являются удачными, получить предложения по улучшению сайта. Респонденты проходили опрос по завершении основной части тестирования. Опрос включал следующие вопросы:

- Какие задания были наиболее сложными?
- Что бы хотели поменять в сайте?
- Какие можете предложить улучшения?
- Какие решения, наоборот, кажутся удачными?

Также была использована формальная анкета со следующими вопросами:

- Мне нравится внешний вид сайта – Нет/Да
- Во время заданий я не столкнулся с существенными трудностями – Нет/Да
- Во время выполнения заданий я не ошибался – Нет/Да
- Я доволен своей скоростью работы – Нет/Да
- Всякий раз, когда я ошибался, я с легкостью замечал и исправлял ошибку – Нет/Да

Кроме того, каждый пункт приведенной в предыдущем разделе анкеты для определения уровня удовлетворенности оценивался, как указывалось выше, по пятибалльной шкале от –2 до +2 (максимальный средний уровень удовлетворенности соответственно равен 10).

После выполнения всех тестовых заданий, опроса и анкетирования были получены следующие результаты:

- При тестировании было выявлено 6 серьезных и 3 незначительных дефекта, критических дефектов не обнаружено.
- Среди найденных серьезных дефектов можно назвать, например, неудачное расположение ссылки «Гид по специальностям». Только двое респондентов с самого начала

воспользовались ссылкой на главной странице. Остальные находили ссылку на него внизу страниц «Программы обучения, число мест». Большинство, даже пролистав страницу до конца, не заметили ссылку. Двое из респондентов заметили ее только на странице программ обучения среднего профессионального образования, из-за короткой таблицы направлений. Как отметили респонденты, назначение «Гида» непонятно, пока его не загрузишь. Таким образом, тестирование подтвердило гипотезу о редком использовании данной ссылки после анализа сайта с помощью средств веб-аналитики.

- Среди незначительных ошибок следует упомянуть ошибку, связанную с выполнением задания 11 («Найти дату ближайшей встречи по вопросам поступления»). Для трех из шести выполнявших это задание респондентов была непонятна сама формулировка задания и его назначение. Также все отметили, что долго не обращали внимания на нужную для выполнения данного задания кнопку, поскольку видели первое слово «Вебинары» и поэтому отбрасывали данный вариант и продолжали ее искать.
- Средний уровень удовлетворенности в ходе работы с сайтом на основании формальной анкеты равен 6 из 10 возможных баллов. Среди всех 12 тестировщиков подсчет уровня удовлетворенности не был ниже 0, что говорит о том, что в большей степени отношение к сайту у тестировщиков положительное. Большинство отметило, что данный сайт – один из самых понятных, которые доводилось посещать, среди сайтов других университетов.

Заключение

В статье рассмотрена методика полного юзабилити-тестирования веб-приложений, находящихся в опытной или промышленной эксплуатации. Данная методика использует возможности методов классического тестирования и ЮТ программных средств, а также возможности средств автоматизации тестирования и веб-аналитики. Предлагаемая методика была успешно реализована и использовалась при оценке качества страницы приемной комиссии priem.mirea.ru сайта РТУ МИРЭА.

Полученные экспериментальные данные показали, что, несмотря на тестирование удобства использования программного обеспечения на этапах разработки, некоторые ошибки остаются необнаруженными. Это говорит о том, что необходимо повышать уровень юзабилити уже на начальных этапах разработки. В частности, для оперативного предсказания уровня юзабилити желательно иметь математические средства моделирования поведения проектируемой системы и пользователя. Поскольку поведение пользователей весьма вариативно (как в виду различных личностных характеристик, так и разного уровня осведомленности в конкретной предметной области), разумно использовать вероятностно-статистические модели. Можно использовать модель цепи Маркова в запросах к серверу, в которой состояния представляют веб-страницы, а переходы между состояниями представляют активности работы с гипертекстом. Схема перемещения посетителя на веб-сайте может рассматриваться как последовательность переходов из одного состояния в другое с добавлением дополнительного состояния, чтобы обозначить случай, когда посетитель находится за пределами веб-сайта.

Разработка таких моделей, на наш взгляд, является перспективным направлением в области юзабилити-тестирования веб-приложений.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-07-00669 и 18-29-03100).

Литература:

1. Басок Б.М., Красовский В.Е. Тестирование программного обеспечения. М.: МИРЭА, 2010. 120 с. ISBN 978-5-7339-08 07-6

2. Куликов С.А. Тестирование программного обеспечения. Базовый курс [Электронный ресурс]. – URL: http://svyatoslav.biz/software_testing_book/ (дата обращения: 20.08.2019).

3. Нильсен Я., Лоранжер Х. Web-дизайн: удобство использования Web-сайтов: пер. с англ. / ред. В.С. Иващенко. М.: Вильямс, 2009. 368 с. ISBN 978-5-8459-1222-0

4. Сергеев С.Ф. Методы тестирования и оптимизации интерфейсов информационных систем. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 117 с.

5. Nielsen J., Landauer T.K. A mathematical model of the finding of usability problems // Proceed. of the INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems. Amsterdam, the Netherlands, April 24-29, 1993. P. 206-213. https://doi.org/10.1145/169059.169166

6. Руководство по юзабилити-тестированию – опыт Mail.Ru Group. [Электронный ресурс]. – URL: https://vc.ru/flood/19132-ux-testing-mrg (дата обращения 20.08.2019).

7. Rubin J., Chisnell D. Handbook of usability testing: How to plan, design, and conduct. Second ed. New York: John Wiley & Sons, 2008. P. 15–53. ISBN 978-0-470-18548-3

8. Головач В.В. Юзабилити-тестирование по дешевке. [Электронный ресурс]. – URL: https://medium.com/usethics-doc/%D1%8E%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B8-%D1%82%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%BF%D0%BE-%D0%B4%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%B2%D0%BA%D0%B5-2e853250960f (дата обращения 20.08.2019).

9. Google Analytics vs Яндекс.Метрика. [Электронный ресурс]. – URL: https://blog.sibirix.ru/2016/07/06/ga-vs-yam/ (дата обращения 20.08.2019).

10. Яндекс.Метрика. [Электронный ресурс]. – URL: http://znet.ru/instrumenty/yandeks-metrika/ (дата обращения 20.08 .2019).

11. Вебвизор – анализ поведения пользователей на сайте. [Электронный ресурс]. – URL: https://webliberty.ru/vebvizor-sayt-glazami-polzovatelya/ (дата обращения 20.08.19).

12. Selenium / WebDriver. Автоматизация веб-приложений через браузер. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.selenium2.ru/docs/selenium-ide (дата обращения 20.08.2019).

13. Басок Б.М., Головин С.А. Тестирование готового к использованию программного продукта. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2019. 96 с. ISBN 978-5-7339-1469-5

References:

1. Basok B.M., Krasovsky V.E. Software testing. Moscow: MIREA Publ., 2010. 120 p. (in Russ). ISBN 978-5-7339-08 07-6

2. Kulikov S.A. Software testing. Basic course. [Electronic resource] – URL: http://svyatoslav.biz/software_testing_book/ (accessed August 20, 2019) (in Russ).

3. Nielsen J. Prioritizing Web Usability. Berkeley, Calif.: New Riders, 2006. [Nielsen J., Laurent H. Web design: Usability of Web sites: transl. from Engl. Moscow: Villyams Publ., 2009. 368 p. (in Russ.)]

4. Sergeev S.F. Testing methods and optimization of information systems interfaces. Saint Petersburg: ITMO Publ., 2013. 115 p. (in Russ.).

5. Nielsen J., Landauer T.K. A mathematical model of the finding of usability problems. *Proceed. of the INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems.* Amsterdam, the Netherlands, April 24-29, 1993. P. 206-213. https://doi.org/10.1145/169059.169166

6. Usability Testing Guide – Mail.Ru Group Experience. [Electronic resource]. – URL: https://vc.ru/flood/19132-ux-testing-mrg (August 20, 2019) (in Russ).

7. Rubin J., Chisnell D. Handbook of usability testing: how to plan, design, and conduct. Second ed. New York: John Wiley & Sons, 2008. P. 15-53. ISBN 978-0-470-18548-3

8. Golovach V.V. Usability testing at a low price. [Electronic resource]. – URL: https://medium.com/usethics-doc/%D1%8E%D0%B7%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B8-%D1%82%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%BF%D0%BE-%D0%B4%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%B2%D0%BA%D0%B5-2e853250960f (accessed August 20, 2019) (in Russ).

9. Google Analytics vs Yandex.Metrika. [Electronic resource]. – URL: https://blog.sibirix.ru/2016/07/06/ga-vs-yam/ (accessed August 20, 2019) (in Russ).

10. Yandex.Metrika. [Electronic resource]. – URL: http://znet.ru/instrumenty/yandeks-metrika/ (accessed August 20, 2019) (in Russ).

11. Webvisor – analysis of user behavior on the site. [Electronic resource]. – URL: https://webliberty.ru/vebvizor-sayt-glazami-polzovatelya/ (accessed August 20, 2019) (in Russ).

12. Selenium / WebDriver. Automate web applications through a browser. [Electronic resource]. – URL: https://www.selenium2.ru/docs/selenium-ide (accessed August 20, 2019).

13. Basok B.M., Golovin S.A. Testing a ready-to-use software product. Moscow: RTU MIREA Publ., 2019. 96 p. (in Russ). ISBN 978-5-7339-1469-5

Об авторах:

Басок Борис Моисеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 6602074818, ResearcherID X-6744-2019, https://orcid.org/0000-0002-8935-4248.

Рожанская Алена Николаевна, бакалавр кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Френкель Сергей Лазаревич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН) (119333, Россия, Москва, ул. Вавилова, д.44-2). Scopus Futhor ID 36865996500, https://orcid.org/0000-0002-2150-7236.

About the authors:

Boris M. Basok, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Chair of Mathematical Software and Standardization of Information Technology, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 6602074818, Researcher ID: X-6744-2019, https://orcid.org/0000-0002-8935-4248.

Alena N. Rozhanskaya, Bachelor of Computer Science of the Chair of Mathematical Software and Standardization of Information Technology, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Sergey L. Frenkel, Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher of FRC “Computer Sciences and Control” Russian Academy of Sciences (44-2, Vavilova ul., Moscow 119333, Russia). Scopus Author ID 36865996500, https://orcid.org/0000-0002-2150-7236.

ISSN 2500-316X (Online)

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-25-43

CC BY

УДК 656.072

Ультразвуковой программно-аппаратный комплекс учета пассажиров общественного транспорта

А.С. Зуев@,
Д.В. Файчук

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: zuev_a@mirea.ru

В статье приведено описание разработанного авторами бортового бесконтактного программно-аппаратного комплекса учета пассажиров общественного транспорта, позволяющего в режиме реального времени: фиксировать показания ультразвукового дальномера о движении объектов на вход и выход через дверной проем; обрабатывать полученные наборы значений и определять численность вошедших и вышедших людей на остановках; отправлять данные через штатные модули связи транспортного средства с целью формирования информационного обеспечения специализированных сервисов мониторинга пассажиропотоков и движения общественного транспорта, а также решения соответствующих задач предиктивной аналитики. Выполнен обзор существующих аналогов, основанных на применении лазерных датчиков, тепловизоров, технологий компьютерного зрения и элементов регистрации воздействий на пол, выделены как их преимущества, так и недостатки, ограничивающие массовое применение. Для предложенного программно-аппаратного комплекса приведены: результаты сравнения с аналогами и обоснование возможностей внедрения на пассажирском транспорте; описание аппаратной составляющей — состава основных использованных комплектующих (контроллер STM32, ультразвуковой дальномер, инфракрасный дальномер); методы обработки показаний ультразвукового дальномера с целью определения численности вошедших и вышедших пассажиров, в том числе в условиях их скопления по обе стороны дверного проема и чередования движений на вход и выход группами и по одиночке; варианты исполнения модулей по форм-фактору корпуса, а также по составам и количеству используемых комплектующих; варианты комплектования модулями и описания схем их установки в соответствии с особенностями задач его применения для контроля дверных проемов различной, в том числе произвольной ширины.

Ключевые слова: учет пассажиров, пассажиропоток, общественный транспорт, транспортная система, ультразвуковой дальномер.

Для цитирования: Зуев А.С., Файчук Д.В. Ультразвуковой программно-аппаратный комплекс учета пассажиров общественного транспорта. *Российский технологический журнал*. 2019:7(6):25-43. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-25-43

Ultrasonic software-hardware complex for tracking public transport passengers

Andrey S. Zuev[@],
Dmitriy V. Faichuk

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: chesalin_an@mail.ru

The article provides the description of an on-board no-touch software-hardware complex for tracking public transport passengers. The complex was designed by the authors. It allows carrying out the following actions in real time: writing down the readings of an ultrasound range finder on objects entering and exiting the door frame; processing the accumulated sets of data and determining the number of people that entered and exited the vehicle during stops; sending out the data through standard connection modules of the vehicle in order to provide specialized monitoring services with information on passenger flow, as well as solving corresponding tasks of predictive analytics. The article overviews existing analogs that are based on using laser detectors, thermal scopes, computer vision technology and floor impact detectors. Their advantages as well as weaknesses that limit their mass use are highlighted. The article also provides the following for the offered software-hardware complex: comparison results, grounds for implementing it on public transport; a description of the hardware part – the composition of the main accessories used (an STM32 controller, an ultrasound diastimeter, an infrared diastimeter); methods for processing the data given by the ultrasound range finder in order to determine the number of passengers that entered and exited the vehicle, including situations when there are many of them on both sides of the door frame, including alternating motions to enter and exit in groups as well as one by one; options of module performance according to the case's form factor, as well as according to compositions and the number of accessories used; options of compiling modules and describing their installation schemes according to the specifics of the tasks of use to control door frames of various width, including random width.

Keywords: passenger tracking, passenger flow, public transport, transportation system, ultrasound range finder.

For citation: Zuev A.S., Faichuk D.V. Ultrasonic software-hardware complex for tracking public transport passengers. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):25-43 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-25-43

Введение

Объективной и исторически сложившейся закономерностью становления и развития любого государства является формирование в его составе урбанизированных территорий, в которых сконцентрированы производственные, транспортные и инженерные сооружения, обеспечивающие рациональную географическую локализации материальных, трудовых, энергетических и финансовых ресурсов.

Усиление проявлений данной закономерности обусловливается научно-техническим прогрессом, историческим процессом смены технологических укладов [1] и интенсифицируется в процессе четвертой технологической революции [2]. Например, для государств с индустриальной и постиндустриальной экономикой характерно формирование городских агломераций как моноцентрического, так и полицентрического типов [3].

Одной из ключевых задач развития любых городских агломераций является совершенствование их транспортных систем [4] и, в частности, системы общественного транспорта [5], предоставляющей услуги физическим лицам в условиях усиливающейся маятниковой миграции населения и, как следствие, реализующей пассажиропотоки с возрастающей мощностью.

Исходными данными, необходимыми и достаточными для анализа параметров пассажиропотоков всех видов общественного транспорта и, как следствие, для выработки решений по развитию данной системы, являются значения численности пассажиров, вошедших в каждое отдельное транспортное средство и покинувших его на остановках и в транспортно-пересадочных узлах. Агрегирование данных значений по различным комбинациям таких параметров, как время суток, день недели и месяц, конкретная остановка, часть маршрута или маршрут транспорта, состав маршрутов с пересечением в конкретном транспортно-пересадочном узле и т. п., позволяет обеспечить полную осведомленность лиц, принимающих решения, о параметрах пассажиропотоков системы общественного транспорта.

В статье приводится обзор существующих систем учета пассажиров, основанных на применении оборудования с различными физическими принципами функционирования (лазерные датчики, тепловизоры, компьютерное зрение, регистрация изменений веса), выделяются их преимущества и исследуются недостатки, ограничивающие возможности массового применения. Авторами предлагается программно-аппаратный комплекс, встраиваемый в состав штатной бортовой аппаратуры транспортного средства, позволяющий в режиме реального времени решать задачу учета пассажиров с применением ультразвукового дальномера и в результате – формировать информационное обеспечение для задач анализа и предиктивной аналитики параметров пассажиропотоков.

Обзор существующих систем анализа наличия и перемещения людей

Любая бесконтактная система учета пассажиров основывается на применении оборудования с конкретными физическими принципами функционирования для анализа наличия и перемещения людей в некотором контролируемом пространстве. В настоящее время могут быть выделены классы систем, основанных на лазерных сенсорах, тепловизорах, компьютерном зрении и регистрации воздействий на пол (изменений веса) [6].

Системы с применением лазерных сенсоров. Применение лазерных сенсоров является одним из самых распространенных подходов к решению задачи мониторинга перемещения людей. Соответствующие системы могут быть классифицированы по следующим признакам:

1. По способу определения наличия объекта: на основе измерения дистанции; на основе прерывания луча.
2. По месту размещения (рис. 1): горизонтальные и вертикальные (сенсоры монтируются соответственно на стенах и на потолке).
3. По способности определять направление перемещения объекта: однонаправленные – на основании показаний одного датчика фиксируется факт прохода объекта через контролируемую зону; двунаправленные – на основании показаний нескольких датчиков анализируется направление (траектория) перемещения объекта.

Наиболее распространенными являются горизонтальные системы с использованием двух сенсоров дистанции, расположенных на некотором удалении друг от друга (и иногда на противоположных стенах): проходящий через контролируемую зону объект

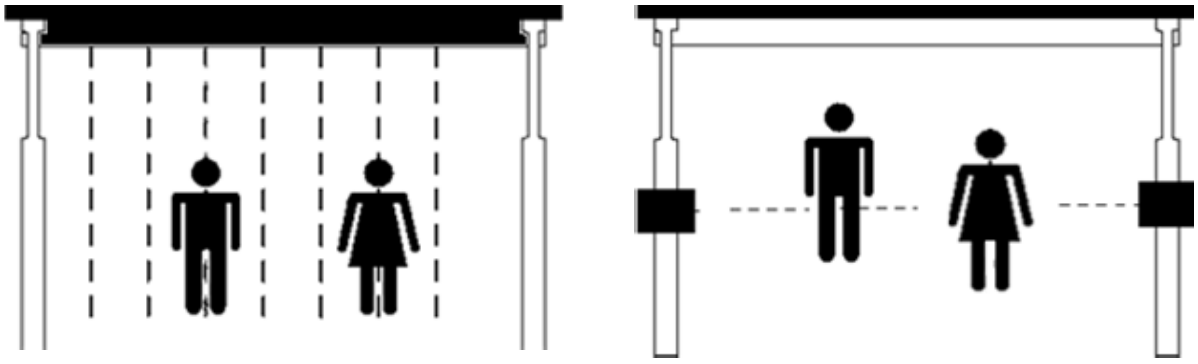


Рис. 1. Вертикальная и горизонтальная схемы размещения датчиков.

будет зарегистрирован обоими датчиками с некоторым лагом времени, на основании последовательности их срабатывания определяется направление перемещения, а значения дистанции до объекта от каждого из датчиков позволяют регистрировать факты одновременного прохода двух объектов. Менее распространены вертикальные системы с матрицей (набором полос) датчиков дистанции, показания которых формируют карту высот контролируемого пространства и позволяют выделять перемещающиеся в нем объекты.

Достоинствами систем с лазерными сенсорами являются низкая стоимость датчиков с прерыванием луча, простота использования и монтажа, малое энергопотребление и возможность автономного питания, высокая точность регистрации одного и двух объектов. Среди недостатков могут быть выделены: высокая стоимость датчиков с определением дистанции, отсутствие возможности мониторинга потока объектов малым количеством датчиков, потребность в обеспечении расстояния между горизонтально установленными датчиками не менее 0.5 м (исключает возможность установки в общественном транспорте). Объективные ограничения применения систем с лазерными сенсорами дистанции при распознавании входа и выхода пассажиров в общественном транспорте обусловлены особенностями оптического принципа локации объектов [7]:

- наличие интенсивного солнечного света;
- углы падения луча сильно отличаются от 90º;
- наличие шершавых рассеивающих поверхностей;
- наличие поглощающих темных (черных) поверхностей;
- запотевание, загрязнение фокусирующей линзы.

В рассматриваемом классе систем целесообразно отдельно выделить системы с применением технологии LIDAR (лидар, *Light Identification Detection and Ranging* – обнаружение, идентификация и определение дальности с помощью света), например, MS Kinect [8]. Оптический локатор испускает множество неколлинеарных световых пучков, фиксирует время их распространения, позволяет получать облака точек в пространстве и на их основе анализировать окружающую обстановку. На рис. 2 представлен пример изображения пространства, получаемого с лидара.

Основным преимуществом данного подхода является в разы бóльшая разрешающая способность по сравнению с одиночными датчиками. Но сопутствующие недостатки – крайне высокая стоимость, сложность эксплуатации и обработки получаемых данных, невозможность использования в ограниченном пространстве – ограничивают сферы возможного применения, в том числе исключают возможность установки на общественном транспорте.

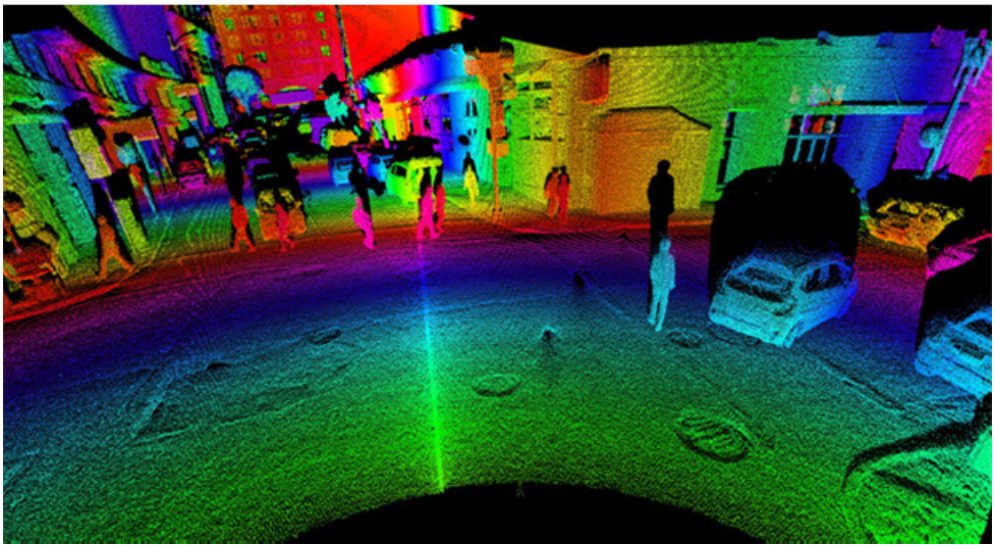


Рис. 2. Пример изображения, получаемого с лидара.

Системы с применением оборудования теплоизмерения. Применение тепловизоров является альтернативным подходом к построению карты высот контролируемого пространства: формируется тепловая карта, четкость которой зависит от разрешения матрицы устройства (рис. 3). Обзор задач применения оборудования тепловизионного контроля и идентификации наличия и перемещения людей изложен, в частности, в [9].

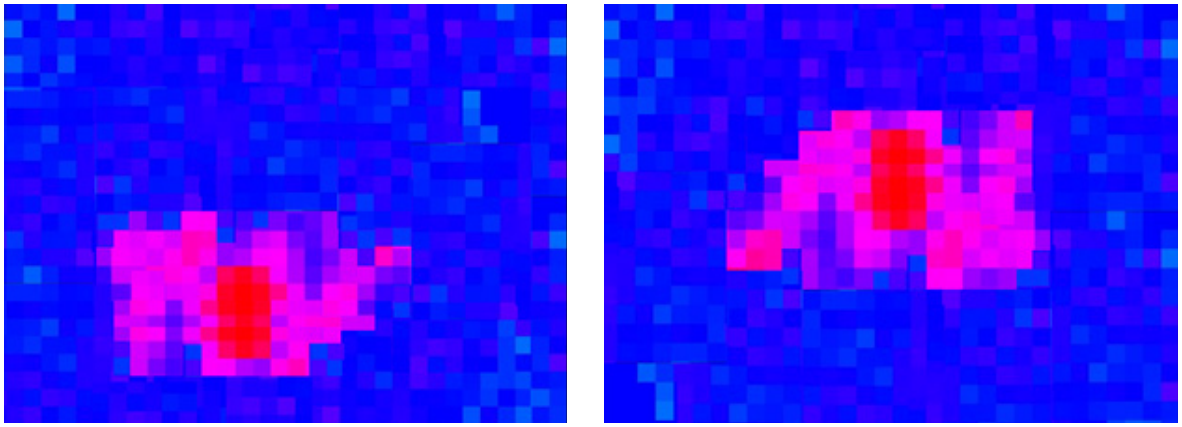


Рис. 3. Пример тепловой карты проходящего человека, разрешение 32×24.

Достоинствами систем с тепловизорами являются: высокая точность при высоком разрешении матрицы; возможность отличать маленьких детей от багажа и ручную кладь от частей тела человека; отсутствие влияния погодных условий; полная невосприимчивость к структуре, отражающей (излучающей) поверхности. Среди недостатков могут быть выделены: крайне высокая стоимость тепловизора даже при слабой разрешающей способности матрицы; слабая разрешающая способность даже по сравнению с самыми простыми камерами видеонаблюдения; засветы от поверхностей с температурой выше 36 ºС (характерны для общественного транспорта с круговым остеклением в теплое время года); необходимость установки на значительной высоте для охвата всей контролируемой зоны (исключает возможность установки в общественном транспорте).

Системы с регистрацией изменений веса. В общем виде данные системы представляют собой набор напольных тензопластин, осуществляющих измерение оказываемого

на них давления и передающих данные в модуль контроля (рис. 4). По последовательности зафиксированных воздействий на пластины определяется маршрут перемещения человека в контролируемом пространстве. Достоинствами данных систем являются низкая стоимость, простота в использовании, поддержке и обработке поступающих данных. Среди недостатков могут быть выделены: наличие механических элементов, имеющих ограниченное число рабочих циклов; чувствительность к вибрации (оказывающей постоянное воздействие в условиях движения); невозможность однозначной идентификации людей и багажа; нецелесообразность установки в низкопольном подвижном составе вследствие отсутствия ступеней, позволяющих определить направление прохода пассажиров (исключает целесообразность применения в современном общественном транспорте).

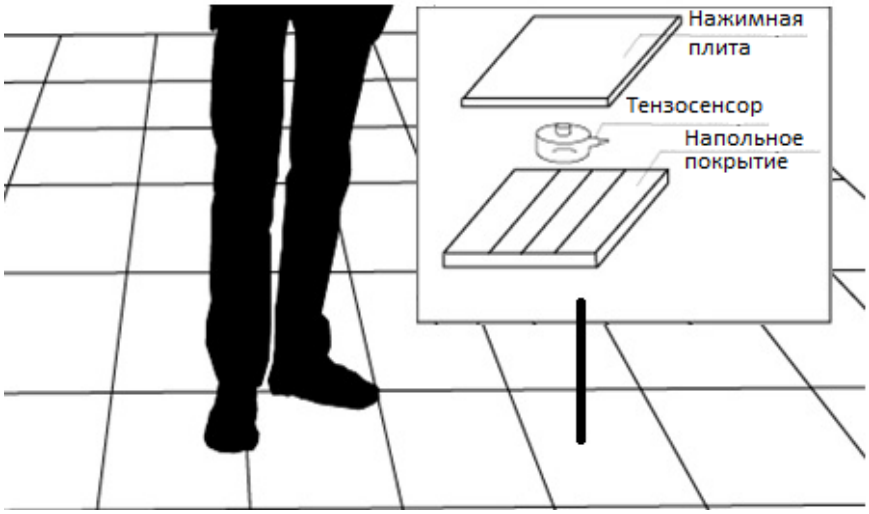


Рис. 4. Системы с регистрацией изменений веса.

Системы с применением компьютерного зрения. Данные системы основаны на применении камер видеонаблюдения и специализированных алгоритмов выделения объектов, например, лиц, из видеопотока [10], а их точность и быстродействие напрямую зависят от возможностей программного и технических характеристик аппаратного обеспечения. На рис. 5 приведен пример отслеживания головы пассажира в видеопотоке методами компьютерного зрения. Соответствующие системы могут быть классифицированы по следующим признакам:

1. По способу расположения модуля видеофиксации: зенитно – перпендикулярно полу; наклонно – под некоторым углом к потолку; горизонтально – параллельно полу.
2. По количеству модулей видеофиксации: одиночные и многомодульные (в состав модуля может входить одна или несколько камер).
3. По составу модулей видеофиксации: одиночные камеры или стереокамеры – комплексы из двух или более объективов, создающих отдельные кадры в один и тот же момент времени.

При использовании одиночной камеры применяются алгоритмы, основанные на нахождении разницы в последовательности кадров и выделении на ее основе движущихся объектов. Стереокамера позволяет определять расстояния до наблюдаемых объектов [11]: положение далеких объектов на изображениях не будет отличаться, тогда как положение близких будет иметь расхождение, величина которого напрямую зависит от дистанции между объективами и фокусного расстояния камер. Используя расстояние до объектов как новую координату – глубину, можно строить карту глубин (высот) и использовать эту информацию, чтобы отличать людей от прочих движущихся объектов, таких как тени или багаж.

Рис. 5. Пример распознавания головы пассажира системой компьютерного зрения.

Достоинствами систем с компьютерным зрением являются: высокая точность выделения целевых объектов в видеопотоке; возможность полного совмещения с системами видеонаблюдения [12]. Среди недостатков могут быть выделены: низкая точность в условиях ограниченного пространства; сложность монтажа и технического обслуживания; высокая стоимость и большой объем обрабатываемой информации; необходимость установки отдельных камер для контроля посадки и высадки через каждый дверной проем; в случае использования для учета пассажиров штатной системы видеофиксации в транспортном средстве – необходимость полной проверки численности пассажиров во время движения между каждой парой остановок; чувствительность к динамическим изменениям освещения и окружающей обстановки в условиях общественного транспорта с круговым остеклением.

Выводы об ограничениях применения существующих систем. Рассмотренные выше классы систем учета пассажиров имеют следующие ключевые недостатки:

1. Системы с применением лазерных сенсоров – высокая стоимость датчиков с определением дистанции, ограниченные возможности установки в условиях малого пространства.
2. Системы с применением оборудования теплоизмерения – высокая стоимость, зависимость от параметров окружающей обстановки, отсутствие возможностей мониторинга ограниченного пространства.
3. Системы с применением компьютерного зрения – чувствительность к освещению, большой объем обрабатываемой информации, высокая стоимость.
4. Системы с регистрацией изменений веса – наличие механических элементов, чувствительность к вибрации, нецелесообразность установки в низкопольном подвижном составе.

Структура и примеры функционирования разработанного комплекса

Перечисленные выше недостатки существующих классов систем учета пассажиров определили направление работы авторов – был разработан монтируемый на потолок дверного проема программно-аппаратный комплекс, основанный на применении ультразвукового дальномера (рис. 6), отличающийся минимально возможной себестоимостью по

сравнению с аналогами, стабильностью функционирования в условиях пассажирского транспорта и допускающий реализацию с защитой вплоть до IP67 без потери точности. Полученная разработка может применяться в любых задачах мониторинга потоков людей, например, входящих и выходящих из локаций, а также перемещающихся в пределах контролируемых территорий, в том числе в случаях, когда задачей контроля является не только регистрация факта открытия двери, но и учет количества и направления прохода людей.

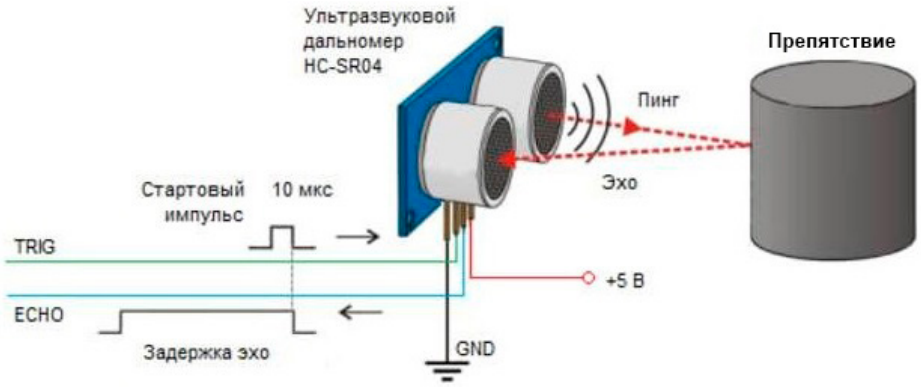


Рис. 6. Общая схема функционирования ультразвукового датчика.

Достоинствами системы учета пассажиров, основанной на ультразвуковых датчиках, являются низкая себестоимость, невосприимчивость к погодным условиям, малая чувствительность к параметрам отражающих поверхностей, большой диапазон рабочих углов и большой угол обзора, возможность использования в ограниченном пространстве. Среди недостатков могут быть выделены: невозможность одновременного полного функционирования нескольких близкорасположенных однонаправленных датчиков и, как следствие, необходимость синхронизации их работы; частичное поглощение звуковой волны одеждой с крупным ворсом; сложности идентификации близкорасположенных объектов в плотном потоке, требующие применения специального математического обеспечения.

Далее рассмотрены примеры задач и результатов опытного применения предложенного авторами программно-аппаратного комплекса. Его работоспособность апробирована и подтверждена результатами обработки исходных данных, фиксируемых ультразвуковым дальномером при движении на вход и выход различных выборок людей, варьируемых по численности, плотности движения и антропометрическим характеристикам. В испытательном стенде имитировались условия низкопольного транспортного средства, высота дверного проема составляла 200 см, а ширина 100 см.

Задача № 1. Учет перемещений отдельных пассажиров

Постановка задачи. Через одинарный дверной проем, без скоплений в обоих направлениях, на вход и выход по очереди перемещаются люди с интервалами не менее 0.5 м между ними. Требуется вести учет количества вошедших и вышедших людей.

Предлагаемое решение. В потолочной части дверного проема размещается модуль регистрации, включающий ультразвуковой дальномер, направленный под углом к вертикали (в случае транспортного средства – наружу и под углом, обеспечивающим гарантированное получение отраженного сигнала от края его пола).

Работа комплекса. Перемещающийся человек обнаруживается в отраженном сигнале (рис. 7): при входе – с момента, когда расстояние от его ног или корпуса до даль-

номера становится меньше высоты установки модуля регистрации в дверном проеме, до момента, когда его голова выходит из зоны действия дальномера; при выходе – с момента попадания головы в область действия дальномера до момента, когда расстояние до его ног или корпуса превысит высоту установки модуля регистрации в дверном проеме.

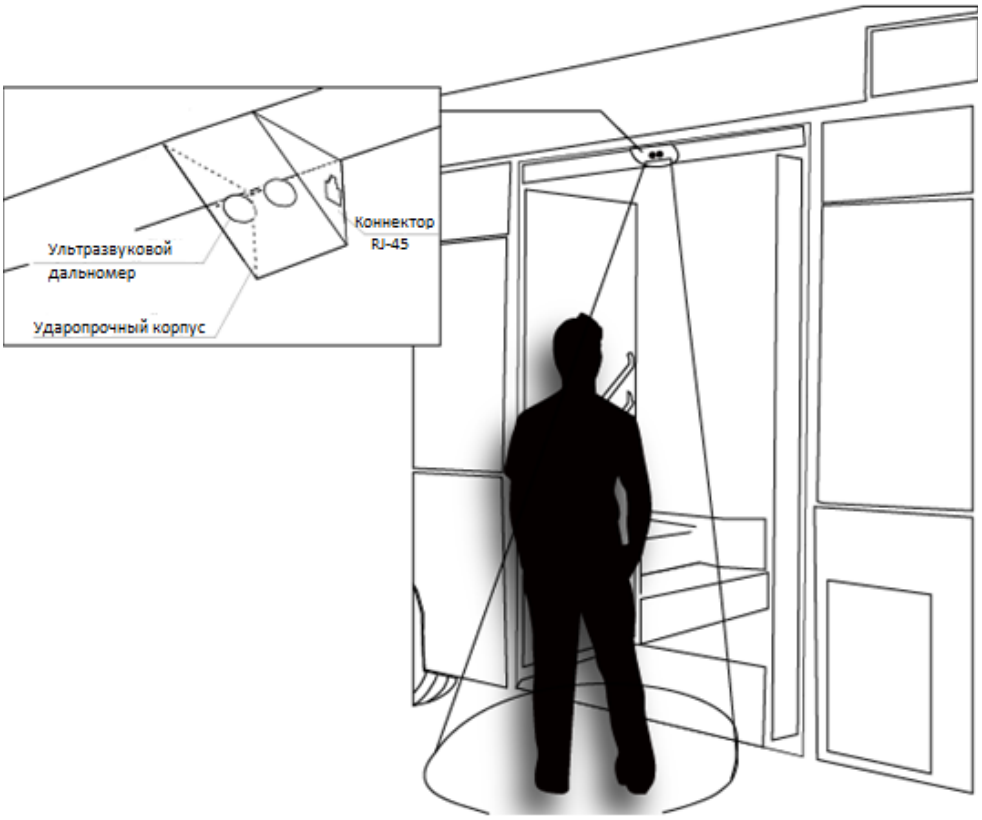
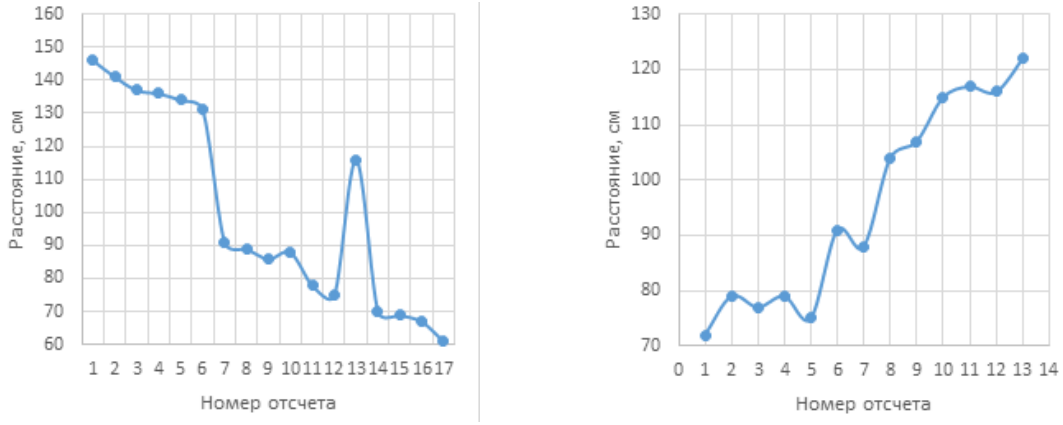


Рис. 7. Проход одного пассажира под модулем регистрации.

Модуль регистрации включается при открытии дверей транспортного средства и выключается в момент их закрытия. Каждые 10 мс дальномер проводит измерение дистанции, при этом значимыми считаются значения меньшие, чем высота установки модуля регистрации в дверном проеме. При получении последовательности значимых значений комплекс переходит в режим «отслеживание объекта» и предварительно ее обрабатывает с целью исключения фактов статичного нахождения человека рядом с дверным проемом (без изменения дистанции), например, до начала или после окончания перемещения. Формируемый в результате набор значений дистанции до человека при проходе через дверной проем будем называть целевым – подлежащим дальнейшей обработке – и заметим, что количество значений в каждом наборе зависит от скорости перемещения человека.

Определение количества и направления перемещения людей. На рис. 8 представлены примеры интерполяции целевых наборов значений – результатов измерения дистанции до человека при входе и выходе через дверной проем (с учетом погрешностей измерения). На рис. 8а можно наблюдать, как уменьшается дистанция до человека, осуществляющего посадку, а на рис. 8б – как она увеличивается при высадке пассажира.

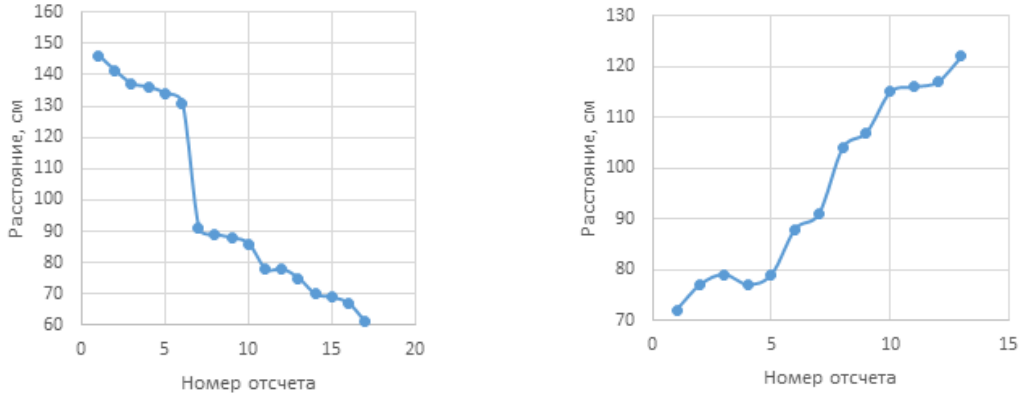
Выбросы, подобные наблюдаемому на рис. 8а значению под номером 13, требуют применения специальных методов фильтрации погрешностей. Для решения данной задачи авторами был использован медианный фильтр, воздействующий на резко выделяющиеся значения и не влияющий на монотонную составляющую их последовательности.



а б

Рис. 8. Исходные данные о дистанции до человека при входе (а) и выходе (б) из транспортного средства.

На рис. 9 представлен результат обработки анализируемых данных медианным фильтром с апертурой (окном) в 3 элемента последовательности. Как видно из рис. 9а, одиночный выброс под номером 13 подавлен, а последовательность на рис. 9б незначительно сглажена.

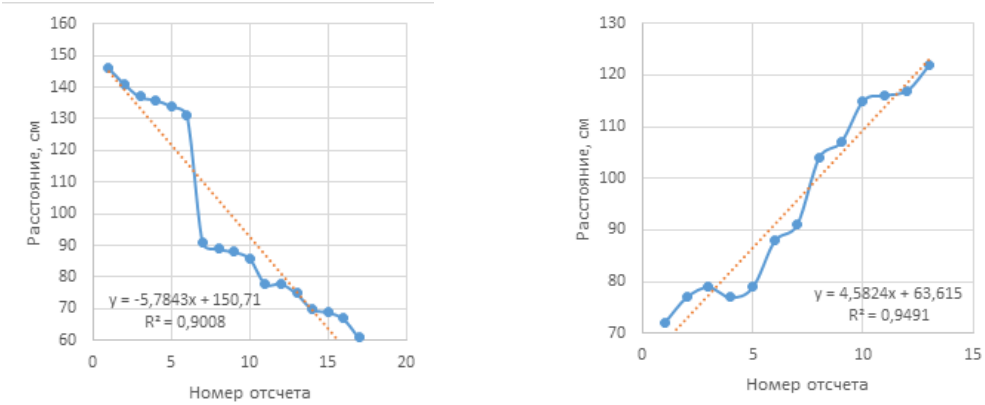


а б

Рис. 9. Обработанные медианным фильтром данные о дистанции до человека при входе (а) и выходе (б) из транспортного средства.

Анализ получаемых после применения медианного фильтра целевых наборов значений сводится к обычной задаче классификации, в которой имеются два класса, обозначающие направление прохода через дверной проем: вход и выход. В данной работе приводится подход к решению рассматриваемой задачи классификации, основанный на построении уравнения линейной регрессии (рис. 10): положительное значение тангенса угла наклона (рис. 10б) соответствует выходу, а отрицательное (рис. 10а) – входу пассажира. Заметим, что абсолютное значение тангенса угла наклона характеризует скорость перемещения человека через дверной проем, однако результаты соответствующего исследования будут изложены в следующих работах авторов.

Так как рассматриваемая задача классификации решается на основании параметра получаемого уравнения линейной регрессии, требуется оценить «качество» данной модели, например, с помощью коэффициента детерминации R^2. На основании результатов обработки тестовых наборов данных авторами установлено, что соответствующее значение для входа наблюдается в диапазоне от 0.85 до 0.91, а для выхода – от 0.9 до 0.95.



а б

Рис. 10. Результаты построения уравнений линейных регрессий по обработанным медианным фильтром данным, приведенным на рис. 9.

Задача № 2. Учет перемещений скоплений пассажиров

Постановка задачи. Через одинарный дверной проем, формируя скопления в обоих направлениях, на вход и выход по очереди группами различной численности перемещаются люди с минимальным интервалом между ними (вплотную). Требуется вести учет количества вошедших и вышедших людей.

Предлагаемое решение. В потолочной части дверного проема размещаются модуль регистрации, включающий ультразвуковой дальномер, расположенный, как и в предыдущей задаче, а также направленный вертикально вниз лазерный (инфракрасный) дальномер (ИК-сенсор).

Работа комплекса. Перемещающийся человек обнаруживается в отраженном сигнале как ультразвукового, так и лазерного дальномера, при этом показания ультразвукового дальномера позволяют определить направление перемещения людей, а инфракрасного – разделить целевые наборы значений, соответствующие каждому из пассажиров (рис. 11). Скопления людей по обе стороны дверного проема без перемещения на вход и выход всего лишь приводят к постоянной работе комплекса в режиме «отслеживание объекта», соответствующий «шум» может быть легко отфильтрован, так как ему соответствуют наборы значений без существенного изменения (менее 10 см) дальности объекта до ультразвукового дальномера.

Заметим, что в рассматриваемой постановке задачи через дверной проем могут проходить люди с существенно различающимся ростом, предварительно формирующие скопления по обе стороны относительно него, поэтому без лазерного дальномера ультразвуковой датчик не позволял бы гарантированно определить точное количество прошедших на вход и выход людей, так как учитывал бы первую приходящую отраженную волну. Одним из дальнейших направлений работы авторов будет являться разработка математического обеспечения, позволяющего решить рассматриваемую задачу с гарантированной точностью без применения ИК-сенсора.

Каждые 10 мс модуль регистрации проводит два измерения дистанции дальномерами – угловое (ультразвуковым) и вертикальное (инфракрасным). Вертикальное измерение с ИК-сенсора сохраняется только в том случае, если оно меньше порогового, например, 2/3 высоты дверного проема (не учитываются проносимая ручная кладь и пассажиры дошкольного возраста).

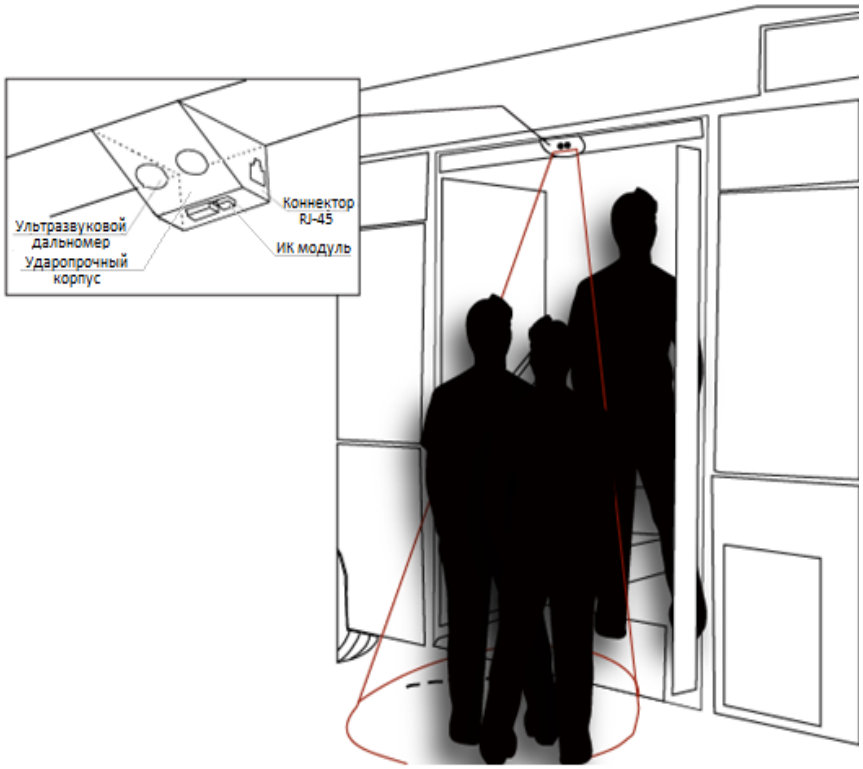


Рис. 11. Проход плотного потока пассажиров под модулем регистрации.

Определение количества и направления перемещения людей. На рис. 12 представлен пример интерполяции трех целевых наборов значений – результатов измерения дистанции ультразвуковым дальномером при проходе на посадку подряд троих пассажиров разного роста. В значениях с порядковыми номерами 15 и 30 наблюдаются фактические выходы первого и второго пассажиров из области видимости ультразвукового датчика. В случае движения с чередованием на вход и вход групп людей большей или меньшей численности обработка соответствующих целевых наборов данных не будет связана с наличием особенностей, не рассмотренных далее для приведенных на рис. 12 наборов данных.

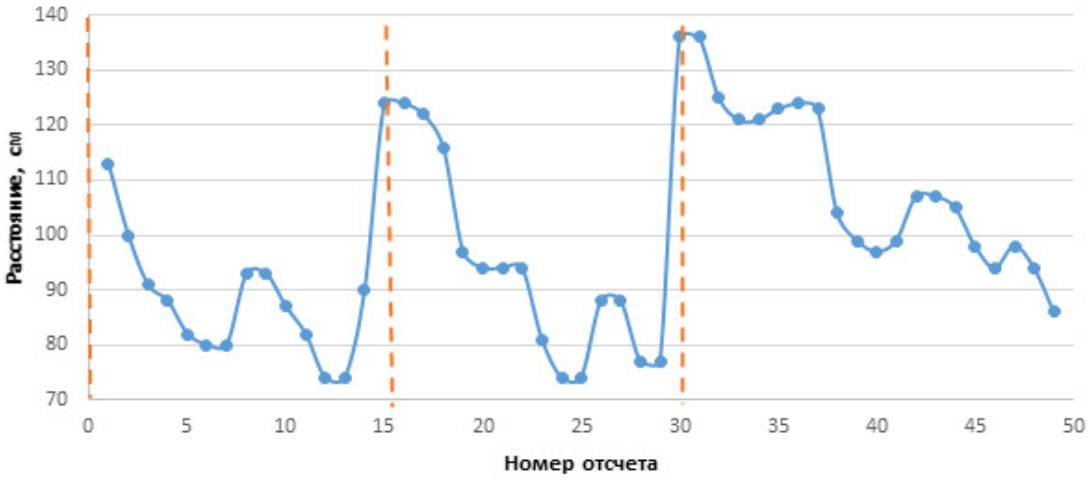


Рис. 12. Данные о дистанции при посадке троих пассажиров без учета времени получения значений.

На рис. 12 можно наблюдать три характерно убывающих участка, два из которых предваряются резким скачком. Данные скачки говорят о том, что один из проходящих пассажиров покидает область видимости ультразвукового дальномера и сенсор начинает фиксировать более дальний объект – следующего пассажира в потоке. При уплотнении потока пассажиров скачки между целевыми наборами значений значительно сокращаются и для их машинного распознавания требуется специальный строгий алгоритм. Данная задача является классической задачей кластеризации, с тем отличием, что исходными данными являются не просто точки некой совокупности, а временной ряд. Для разработки алгоритма кластеризации – распознавания целевых наборов значений, соответствующих отдельным пассажирам, – целесообразно перейти к оси абсцисс, отражающей ход времени, а не очередность получения значений дистанции. Это позволит объективно сопоставить значения, получаемые от двух дальномеров, как с учетом рассинхронизации их работы, так и с учетом возможных потерь некоторых значений в результате отсутствия отраженного сигнала. На рис. 13 показано, как переход к новой оси абсцисс изменил результат интерполяции данных, представленных ранее на рис. 12.

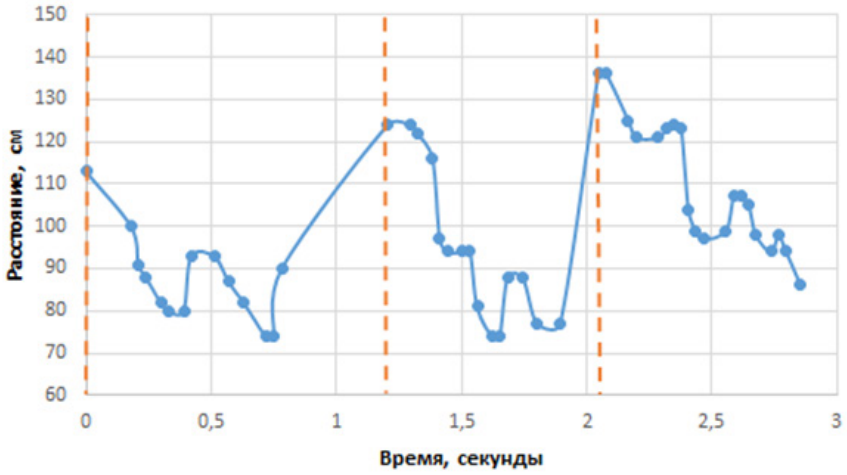


Рис. 13. Данные о дистанции при посадке троих пассажиров с учетом времени получения значений.

На рис. 13 видно, что расстояние между точками по оси абсцисс не является постоянным, в результате чего значения сгруппировались в «сгустки». Так, ранее отмеченные на рис. 12 зоны смены пассажиров в области видимости ультразвукового дальномера стали более явными для машинного распознавания и выделяются не только по оси ординат (расстояние), но и по оси абсцисс (время). Заметим, что при уплотнении потока пассажиров различия между целевыми наборами значений по оси абсцисс сокращаются так же существенно, как и по оси ординат.

Рассмотрим предлагаемый авторами алгоритм кластеризации. Для выделения резких скачков дистанции до объекта могут использоваться следующие подходы: численное дифференцирование – построение ряда значений дискретной производной; расчет модулей разности между каждым следующим значением и предыдущим. Из полученного ряда можно выделить локальные максимумы, которые и будут представлять собой скачки в исходных данных по оси ординат, соответствующие смене людей, перемещающихся на вход и/или выход, в области видимости ультразвукового дальномера. На рис. 14 представлен ряд значений модуля разности между парами соседних данных с рис. 13.

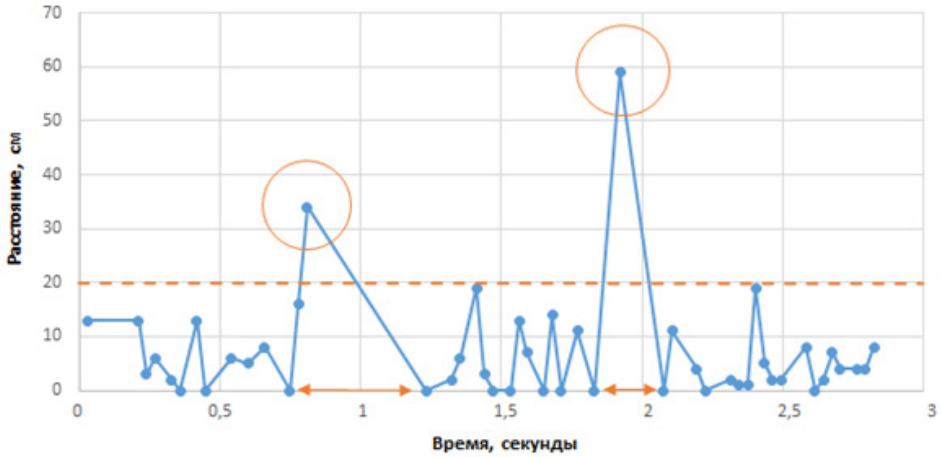


Рис. 14. Значения модуля разности между следующим и предыдущим значением дистанции до объекта, представленными на рис. 13.

На рис. 14 имеются два ярко выраженных локальных максимума, которые сопровождаются большим промежутком по времени относительно соседних точек. Также можно заметить присутствие меньших скачков (менее 20 см дистанции до объекта), обусловленных в большинстве случаев влиянием движений рук, ног и головы человека при проходе через дверной проем, а также отражающими характеристиками одежды (например, меховые поверхности хуже отражают звуковые волны). В связи с этим целесообразно считать все скачки значений, не превышающие некоторого порогового значения (например, 25 см дистанции до объекта), погрешностями измерений, не влияющими на результат кластеризации.

Таким образом, предлагаемый авторами алгоритм кластеризации реализует выбор всех максимумов абсолютного значения дискретной производной, превышающих пороговое значение, и на основании соответствующих им временных координат выполняет деление исследуемого ряда на кластеры, соответствующие целевым наборам значений дистанции до каждого из проходящих через дверной проем пассажиров. На основании каждого из полученных наборов значений, аналогично рассмотренной выше задаче № 1, выполняются построение уравнения линейной регрессии и классификация входа или выхода пассажира из транспортного средства.

Апробация разработанного авторами программно-аппаратного комплекса в условиях плотного потока людей показала, что изложенный выше алгоритм кластеризации может не идентифицировать некоторых пассажиров, объединяя соответствующие им целевые наборы значений с предыдущими или следующими. Данные погрешности могут быть обусловлены как существенными различиями в росте, так и сочетанием условий плотного и быстро перемещающегося потока пассажиров. Так, например, в различных работах по пожарной безопасности указывается, что в случае давки расстояние между людьми может составлять менее 10 см [13]. Совершенствование алгоритма кластеризации будет являться одним из направлений дальнейшей работы авторов, так как использование только ультразвукового дальномера обусловливает минимальную себестоимость разработанного программно-аппаратного комплекса. Однако для объективного учета количества пассажиров в условиях плотного потока на текущем этапе предлагается использовать показания лазерного дальномера. На рис. 15 для рассматриваемого набора исходных данных представлены результаты построения трех уравнений линейной регрессии (аналогично рассмотренной ранее задаче № 1) и приведены наборы показаний лазерного дальномера.

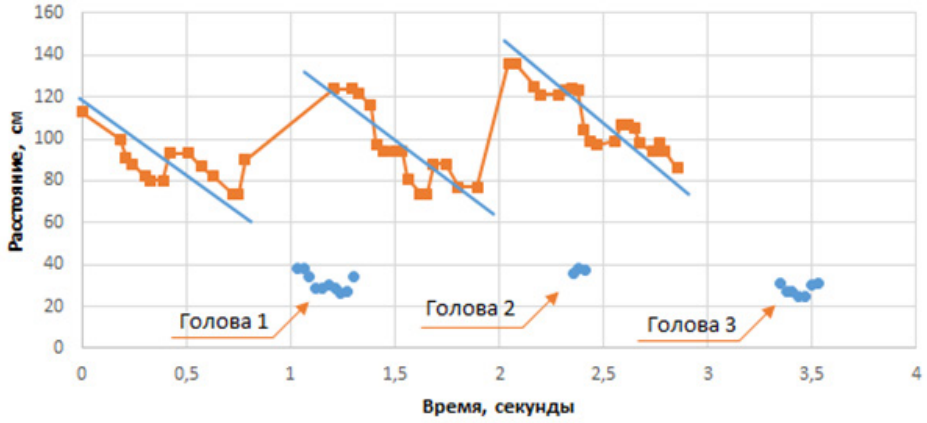


Рис. 15. Данные о посадке троих пассажиров, полученные с двух сенсоров дистанции.

Из рис. 15 видно, что данные ИК-сенсора фиксируются с запаздыванием, вызванным слепой зоной между двумя сенсорами, однако точность распознавания отдельных людей в плотном потоке пассажиров при этом фактически составляет 100%. Изложенные выше методы и математическое обеспечение реализованы в программном обеспечении разработанного авторами комплекса.

Аппаратное обеспечение разработанного комплекса

Предложенный авторами программно-аппаратный комплекс в своей текущей реализации состоит из нескольких компонент, каждую из которых можно отнести к регистрирующему или контролирующему модулям, соединяемым с помощью кабеля витой пары и стандартного интерфейса RJ-45. Модуль регистрации, заключенный в ударопрочный корпус и размещаемый на потолке дверного проема, представляет собой ультразвуковой дальномер, используемый отдельно или в комплекте с инфракрасным датчиком дистанции. Модуль контроля представляет из себя печатную плату с микроконтроллером STM32, анализирующим поступающие значения дистанций до объектов, ведущим учет количества прошедших на вход и выход пассажиров и передающим соответствующие данные в штатные модули связи транспортного средства.

В табл. 1 приведены состав и примерная себестоимость комплектации предложенного комплекса для рассмотренных выше задач № 1 и № 2 в условиях его применения для одного одинарного дверного проема.

Таблица 1. Состав и примерная себестоимость комплектации комплекса

Устройство	Назначение	Применение		Цена, руб.
		Задача 1	Задача 2	
Контроллер STM32F401RE	Выполняет обработку значений дистанции до объектов, передает данные о количестве вошедших и вышедших пассажиров в штатные модули связи транспортного средства.	+	+	от 150
Ультразвуковой дальномер HC-SR04	Измеряет расстояния до проходящих через дверной проем людей.	+	+	от 50
ИК-дальномер SHARPGP2Y0A02YK0F	Измеряет расстояние до голов проходящих через дверной проем людей.	–	+	от 300
Концевой выключатель	Обеспечивает учет открытия и закрытия двери.	+	+	от 50
Стоимость компонентов комплекса (без корпуса)		от 250 руб.	от 550 руб.	

На рис. 16 приведены чертежи вариантов корпуса разработанного программно-аппаратного комплекса, применяемого в условиях одинарного дверного проема, цифрами 1 и 2 обозначены соответственно места установки ультразвуковых и инфракрасных дальномеров. Вариант изделия с двумя ультразвуковыми дальномерами является экспериментальным – в следующих работах авторов будут изложены результаты исследования возможностей исключения из состава комплекса лазерного дальномера без потери точности результатов распознавания перемещения плотных скоплений объектов.

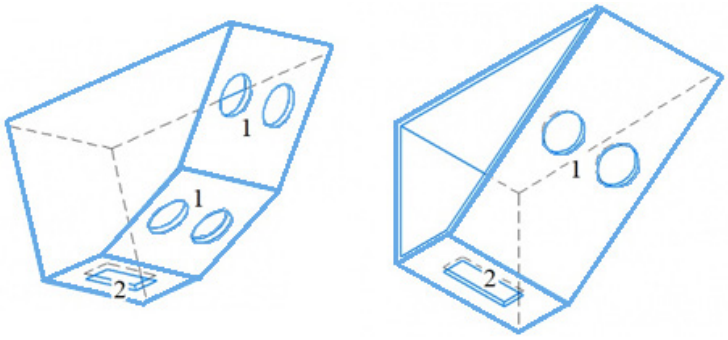


Рис. 16. Варианты корпуса изделия для одинарного дверного проема.

В условиях дверных проемов произвольной ширины может применяться вариант комплекса, чертеж корпуса которого представлен на рис. 17, цифрами 1 и 2 обозначены соответственно места установки ультразвуковых и лазерных дальномеров.

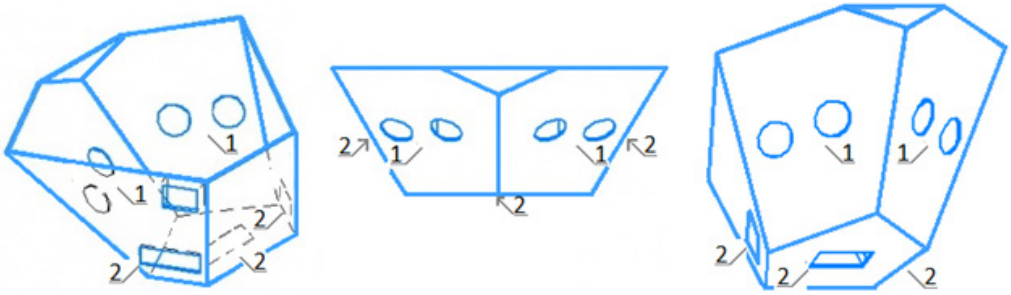


Рис. 17. Вариант корпуса изделия для дверного проема произвольной ширины.

На рис. 18 приведен общий пример применения варианта комплекса для контроля дверного проема произвольной ширины: в условиях двойного по ширине проема может применяться средний модуль с тремя лазерными дальномерами; в тройных по ширине проемах могут применяться стартовый и конечный модули с двумя лазерными дальномерами каждый; в условиях четырехкратного по ширине проема могут применяться стартовый, средний и конечный модули (данный вариант приведен на рис. 18); для проемов большей ширины потребуется увеличивать количество средних модулей (фактически доступная для контроля ширина дверного проема не ограничена).

Сравнение разработанного комплекса с аналогами

В табл. 2 приведены результаты качественного сравнения предложенной авторами разработки с существующими аналогами: лучшее значение параметра оценивается в 2 балла, среднее – в 1 и худшее – в 0 баллов. Однако заметим, что разработанный программно-аппаратный комплекс выгодно отличается от аналогов минимально возможной себестоимостью комплектующих и гарантированной точностью функционирования.

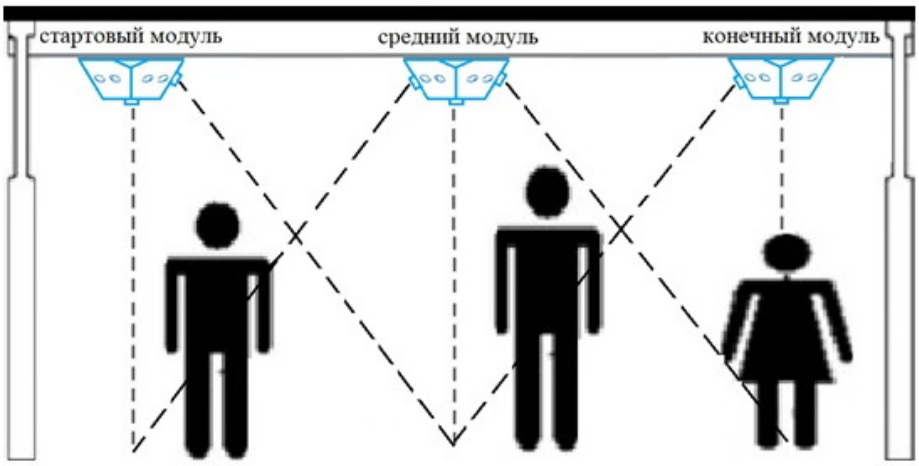


Рис. 18. Общий пример использования комплекса для контроля дверного проема произвольной ширины.

Таблица 2. Результаты качественного сравнения разработки с существующими аналогами

Параметр сравнения	Системы с лазерными датчиками	Системы с тепловизорами	Системы с компьютерным зрением	Системы с регистрацией веса	Разработка авторов
Требующиеся вычислительные мощности	малые (2)	средние (1)	высокие (0)	средние (1)	малые (2)
Сложность монтажа	малая (2)	средняя (1)	средняя (1)	высокая (0)	малая (2)
Точность регистрации людей	средняя (1)	высокая (2)	высокая (2)	низкая (0)	высокая (2)
Стоимость	средняя (1)	высокая (0)	высокая (0)	средняя (1)	низкая (2)
Ремонтопригодность	средняя (1)	низкая (0)	низкая (0)	низкая (0)	средняя (1)
Техническая сложность	низкая (2)	высокая (0)	высокая (0)	средняя (1)	низкая (2)
Объем полезной информации	средний (1)	высокий (2)	высокий (2)	средний (1)	высокий (2)
Скрытность	средняя (1)	средняя (1)	средняя (1)	высокая (2)	средняя (1)
ИТОГО (из 16)	11	7	6	6	14

Предложенная авторами разработка имеет некоторые существенно уступающие по уровню готовности к практическому применению аналоги, основанные на таком же (ультразвуковом) физическом принципе функционирования [14, 15], но использует математическое и программное обеспечение, гарантированно выполняющееся на любом контроллере семейства STM32. Регистрирующий модуль исполнен в ударопрочном корпусе, обеспечивающем простой монтаж и возможность установки элемента автономного питания. Испытания показали, что в условиях формирования скоплений и смены направлений перемещения пассажиров на вход и выход с минимальным интервалом между ними (вплотную) комплекс, с имеющимся программным обеспечением и без применения лазерного дальномера, верно определяет количество вошедших и вышедших людей в 7 из 10 случаев. С применением лазерного дальномера точность распознавания людей в потоке составляет 100%.

Выполненные авторами исследования основывались на предположении об использовании комплекса в условиях низкопольного транспорта, однако разработанное матема-

тическое обеспечение может быть легко адаптировано и к условиям наличия в дверном проеме ступеней. Точность определения количества прошедших пассажиров на основании показаний ультразвукового дальномера при этом существенно возрастет благодаря наличию резких изменений расстояния до человека при переходе между ступенями.

Заключение

Разработанный авторами программно-аппаратный комплекс позволяет решить задачу учета пассажиров на каждом отдельном транспортном средстве в режиме реального времени, имеет преимущества перед существующими аналогами и доступен для массового внедрения. Помимо общественного транспорта, данная разработка может применяться для учета численности: людей, проходящих через статичные дверные проемы, лестничные пролеты и по полотнам эскалаторов (на станциях метрополитена, в магазинах и т. п.); транспортных средств, проезжающих через контрольно-пропускные пункты (на парковках, в туннелях, на платных трассах и т. п.); физических объектов, перемещаемых в системах автоматического управления логистическими потоками, и т. д. Изложенный в статье материал соответствует применению разработанного программно-аппаратного комплекса в условиях одинарного дверного проема, в следующих работах авторов будут изложены материалы, раскрывающие аспекты его адаптации к применению в условиях проемов произвольной ширины.

Литература:

1. Глазьев С.Ю. Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса. М.: Экономика, 2010. 256 с.

2. Шваб К. Четвертая промышленная революция. Пер. с англ. М.: Эксмо, 2019. 209 с.

3. Шмидт А.В., Антонюк В.С., Франчини А. Городские агломерации в региональном развитии: теоретические, методические и прикладные аспекты // Экономика региона. 2016. Т. 12. Вып. 3. С. 776–789.

4. Утешев К.А. Автоматический подсчет пассажиров общественного транспорта. Основные технические требования и подходы к реализации // Мир компьютерной автоматизации. 2015. Вып. 1. С. 35–39.

5. Войновский В.А., Купцов А.В. Причины некорректных измерений дальностей с помощью лазерных дальномеров, используемых в вооруженных силах // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. 2013. Т. 5. Вып. 2. С. 165–169.

6. Валуйская Я.А. People counting using data gathered via Microsoft Kinect Sensor // GraphiCon2015: Междунар. конф. Протвино, 22–25 Сентября 2015. Протвино: Автономная некоммерческая организация «Институт физико-технической информатики», 2015. С. 205–208.

7. Кобзистый С.Ю. [и др.] Перспективы применения устройств тепловизионного контроля на объектах охраны ФСИН России // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: ФКОУ ВО Воронежский институт ФСИН России, 2018. С. 23–25.

8. Берников В.В., Преображенский А.П., Чопоров О.Н. Анализ алгоритмов обнаружения движущихся объектов на видеоизображении // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6. Вып. 3. С. 223–233.

9. Ильясов Э.С. Вычисление расстояния до наблюдаемого объекта по изображениям со стереопары // Молодой ученый. 2016. Т. 118. Вып. 14. С. 146–151.

10. Брусянин Д.А. Интеллектуальная система мониторинга пассажиропотока в электропоезде «Ласточка» // Инновационный транспорт. 2015. Т. 16. Вып. 2. С. 16–21.

11. Парфенко А.П. Методология моделирования людских потоков и практика программирования их движения // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. Вып. 12. С. 46–55.

12. Гончаров И.С. Счетчик посетителей на ультразвуковых дальномерах // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: Междунар. науч. конф. Томск: Томский политехнический университет, 2015. С. 131–132.

13. Усов С.П. [и др.] О разработке программно-аппаратного комплекса автоматического определения пассажиропотока городского пассажирского транспорта // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы: сб. матер. 94 Междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров. 2016. С. 248–253.

References:

1. Glazyev S. The strategy of Russia advancing development in the conditions of global crisis. Moscow: Ekonomika Publ., 2010. 256 p. (in Russ.).

2. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. New York: Crown Business, 2017. 192 p. [Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Moscow: Eksmo Publ., 2019. 209 p. (in Russ.).]

3. Shmidt A.V., Antonyuk V.S., Francini A. Urban agglomerations in regional development: Theoretical, methodological and applied aspects. *Ekonomika regionov* = Economy of Regions. 2016;12(3):776-789 (in Russ.).

4. Uteshev K.A. Automatic public transport passengers count: Basic technical requirements and approaches to implementation. *Mir komp'yuternoi avtomatizatsii* = Computer Automation World. 2015;(1):35-39 (in Russ.).

5. Voynovskiy V.A., Kuptsov A.V. The reasons of incorrect metering of range with the help of laser range finders, using in the armed forces. *Interekspo GEO-Sibir'* = Interexpo GEO-Siberia. 2013;5(2):165-169 (in Russ.).

6. Valuiskaia I.A. People counting using data gathered via Microsoft Kinect sensor. *International Conference GraphiCon2015.* Protvino, September 22-25, 2015. Protvino: Institute of Physicotechnical Informatics, 2015; pp. 205-208 (in Russ.).

7. Kobzistiy S.Yu. [et al.]. Prospects of using heat monitoring equipment on RF FSEP protected sites. Technology and safety of objects in the penal and correctional system: a collection of materials of the International scientific-practical conference. Voronezh: Voronezh Institute of FSEP of Russia, 2018; pp. 23-25 (in Russ.).

8. Bernikov V.V., Preobrazhenskiy A.P., Choporov O.N. Analysis of algorithms for detecting moving objects in the video image. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* = Modeling, Optimization and Information Technology. 2018;6(3):223-233 (in Russ.).

9. Ilyasov E.S. Calculating the distance to a surveyed object using images from a stereogram. *Molodoi uchenyi* = Young Scientist. 2016;118(14):146-151 (in Russ.).

10. Brusyanin D.A. Intelligent system of passenger flow monitoring in electric train "Lastochka" ("Swallow"). *Innovatsionnyi transport* = Innovative Transport. 2015;12(3):16-21 (in Russ.).

11. Parfyenenko A.P. Methodology for modeling human movements and practice of programming their movement during evacuation. *Pozharovzryvobezopasnost'* = Fire and Explosion Safety. 2014;23(12):46-55 (in Russ.).

12. Goncharov I.S. Visitor counter based on ultrasonic range finders. *Information technologies in science, management, social sphere and medicine: International Scientific Conference,* 2015: pp. 131-132 (in Russ.).

13. Usov S.P. [et al.] About development of hil-testbench for automatic detection of passenger traffic of urban passenger transport. *Pilotless vehicles: Problems and prospects: International Scientific Conference of the Association of Automotive Engineers,* 2016; pp. 248-253 (in Russ.).

Об авторах:

Зуев Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, директор Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Файчук Дмитрий Владимирович, оператор ЭВМ, кафедра практической и прикладной информатики, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Andrey S. Zuev, Cand. od Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Dmitriy V. Faichuk, Computer Operator, Department of applied informatics, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

ISSN 2500-316X (Online)

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-44-55

CC BY

УДК 004.451.9

Оценка уровня информационной безопасности мобильной операционной системы Android

Д.А. Изергин,
М.А. Еремеев,
Ш.Г. Магомедов@,
С.И. Смирнов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: izergind@gmail.com; magomedov_sh@mirea.ru

Одним из главных направлений развития информационных систем является повышение эффективности сбора, обработки и обмена информацией на основе внедрения современных технологий передачи данных, автоматизированного дистанционного мониторинга и управления. Краеугольным камнем данной концепции являются мобильные устройства, решающие вопрос оперативного обмена данными и их обработки. Современные мобильные сервисы, использующиеся в том числе для обмена и обработки персонализированных, банковских и критически важных данных, появляются вследствие неуклонного роста количества преступлений в сфере информационной безопасности в отношении и с использованием мобильных устройств. Широкое применение данных устройств для доступа к защищаемой информации, содержащейся в информационных системах, придало вопросу обеспечения информационной защищенности особое значение.

Предметом исследования данной статьи является оценка текущего состояния механизмов обеспечения информационной безопасности мобильных операционных систем, составляющих основу структуры эпизодических распределенных мобильных сетей, на примере ОС (операционной системы) Android. В статье рассмотрены проблемы развития мобильной экосистемы и методы, направленные на их решение, основные векторы вредоносного воздействия, способы противодействия средствам статического и динамического анализа и современные механизмы защиты.

Ключевые слова: мобильные операционные системы, Android, вредоносное воздействие, информационная безопасность, механизмы защиты.

Для цитирования: Изергин Д.А., Еремеев М.А., Магомедов Ш.Г., Смирнов С.И. Оценка уровня информационной безопасности мобильной операционной системы Android. *Российский технологический журнал.* 2019;7(6):44-55. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-44-55

Information security evaluation for Android mobile operating system

Dmitriy A. Izergin[@], Mikhail A. Eremeev, Shamil G. Magomedov, Stanislav I. Smirnov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: izergind@gmail.com; magomedov_sh@mirea.ru

One of the main directions of information systems development is to increase the efficiency of collecting, processing and exchanging information through the introduction of modern data transfer technologies, automated remote monitoring and control. The cornerstone of this concept is mobile devices that solve the issue of operational data exchange and processing. Modern mobile services used including the exchange and processing of personalized, banking and critical data are the result of the steady increase in the number of crimes in the field of information security in relation to and using mobile devices. The widespread use of these devices for access to protected information contained in information systems has given special importance to the issue of information security.

The subject of this research is to assess the current state of information security mechanisms for mobile operating systems that form the basis of the structure of episodic distributed mobile networks. The Android OS (operating system) was used as an example. The article discusses the problems of the development of a mobile ecosystem and methods aimed at solving them, the main vectors of malicious impact, ways of countering the means of static and dynamic analysis and modern protection mechanisms.

Keywords: mobile operating systems, Android, malicious impact, information security, protection mechanisms.

For citation: Izergin D.A., Eremeev M.A., Magomedov Sh.G., Smirnov S.I. Information security evaluation for Android mobile operating system. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6)44-55 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-44-55

Введение

Согласно отчетам рейтингового агентства Statcounter (рис. 1), на первый квартал 2019 года Android является наиболее распространенной операционной системой (ОС) в мире с результатом 38% от общего количества установленных ОС, что налагает обязанность данной ОС быть наиболее качественной в области информационной безопасности [1]. Однако, несмотря на то, что компания Google и производители мобильных устройств постоянно совершенствуют систему безопасности, но открытость исходного кода и обширная фрагментация платформы делает данную систему одной из самых уязвимых для вредоносного воздействия.

Текущее состояние безопасности Android

Главной причиной фрагментации экосистемы Android является применяемая технология при создании мобильных устройств, основанная на системе «кристалл/чип» (system

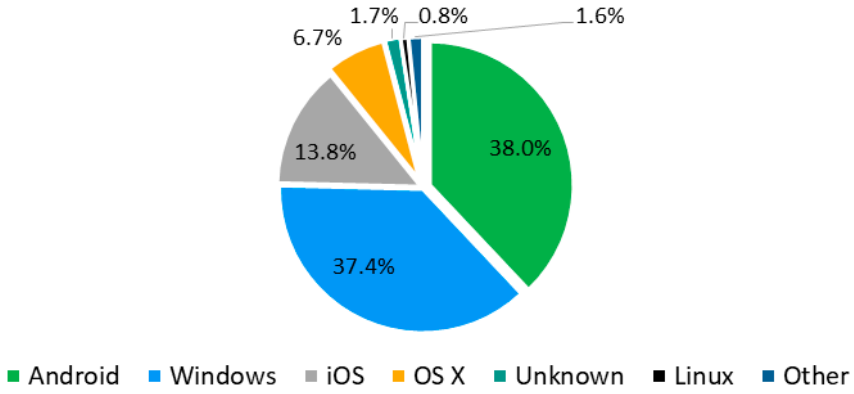


Рис. 1. Статистика долей рынка различных операционных систем.

on a chip, SoC). SoC заключается в интегрировании на одном микрочипе центрального процессора, графического ускорителя, радио-модуля и различной датчиковой аппаратуры. Данная концепция позволяет уменьшить физический размер устройства, понизить энергопотребление и повысить производительность за счет лучшей интеграции компонентов, но для взаимодействия всей системы требуется разработка специальных драйверов. Драйверы разрабатываются производителями различных чипов на кристалле и, как правило, являются проприетарными и уникальны для каждой модели. В результате, производители мобильных устройств внедряют полученные драйверы для SoC-системы в собственную сборку, что приводит к зависимости процедур обновления программного обеспечения. На рис. 2 приведен алгоритм производства мобильных устройств на базе Android. Из-за большого количества производителей чипсетов и мобильных устройств (ODM – производитель, изделия которого создаются по оригинальному проекту; OEM – производитель, детали и оборудование которого могут быть проданы другим производителям) образуется высокая степень фрагментации платформы без возможности оперативного обеспечения актуальными обновлениями мобильных устройств.

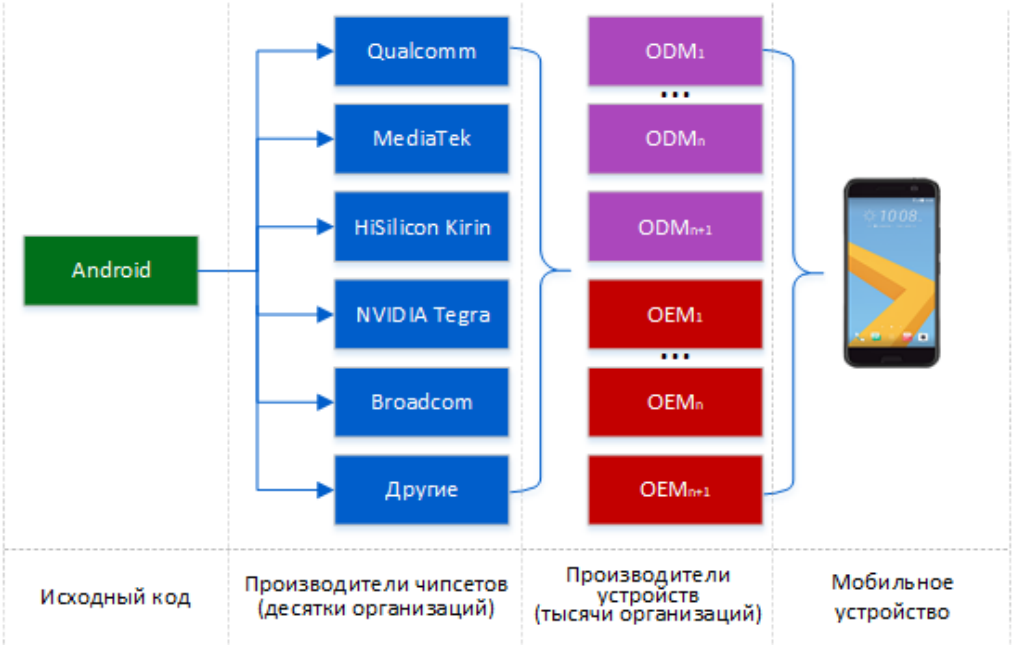


Рис. 2. Алгоритм производства устройств Android.

Компания Google для решения проблемы высокой фрагментации устройств сделала несколько важных шагов:

1. В 2014 году был представлен программно-аппаратный стандарт Android One – программа поддержки OEM-производителей, направленная на мотивирование производить устройства без модификации ОС. Целью проекта является возможность Google управлять проектированием, разработкой и поддержкой данного типа устройств, в то время как производство осуществляется производителями оригинального оборудования. В результате вопросы безопасности и обновления ОС обрабатываются Google, что позволило повысить уровень защищенности системы. На текущий момент наиболее крупные производители устройств не поддержали концепцию «чистой» ОС, что привело к низкой эффективности в решении вопроса фрагментации экосистемы.
2. В 2017 году компания Google внесла ряд изменений в архитектуру Android, добавив слой абстракции Project Treble, позволяющие отделить слой реализации аппаратного кода от кода операционной системы [2]. Данный шаг позволяет производить обновление кода операционной системы отдельно от драйверов, но получение новых версий программного обеспечения по-прежнему зависит от производителя, что качественно не улучшает ситуацию.
3. С 2018 года производители обязаны выпускать обновления ОС в течение минимум двух лет для всех Android-устройств, количество которых превышает 100 000. Если партнер не выполняет данное условие Google, возможен отказ в лицензии [3].

Политика компании Google направлена на обеспечение обновлениями устройств не старше 2-3 лет, что приводит к достаточно серьезным вопросам безопасности отрасли в целом. Соответственно, устройства, относящиеся к данному сегменту, требуется считать потенциально уязвимыми. В табл. 1 приведена краткая характеристика представленных на рынке версий Android и их статус поддержки.

Таблица 1. Характеристика версий Android

Название версии	Номер версии	Версия ядра	Год выхода
Froyo	2.2–2.2.3	2.6.32	2010
Gingerbread	2.3–2.3.7	2.6.35	2010
Honeycomb	3.0–3.2.6	2.6.36	2011
Ice Cream Sandwich	4.0–4.0.4	3.0.1	2011
Jelly Bean	4.1–4.3.1	3.0.31, 3.4.39	2012
KitKat	4.4–4.4.4	3.10	2013
Lollipop	5.0–5.1.1	3.16	2014
Marshmallow	6.0–6.0.1	3.18	2015
Nougat	7.0–7.1.2	4.4	2016
Oreo	8.0–8.1	4.10	2017
Pie	9.0	4.4.107, 4.9.84, 4.14.42	2018
– неподдерживаемая версия	– поддерживаемая версия	– актуальная версия	

На основе анализа поддерживаемых версий и статистики распределений версий Android, представленной на рис. 3, возможно вычислить вероятности нахождения устройства в уязвимом состоянии за последние 7 лет в условиях, при которых производители выполняют обновления устройств в течение двух лет [4]:

$$P_{2013} = 0.31;\ P_{2014} = 0.22;\ P_{2015} = 0.38;\ P_{2016} = 0.46;\ P_{2017} = 0.51;\ P_{2018} = 0.52;\ P_{2019} = 0.59$$

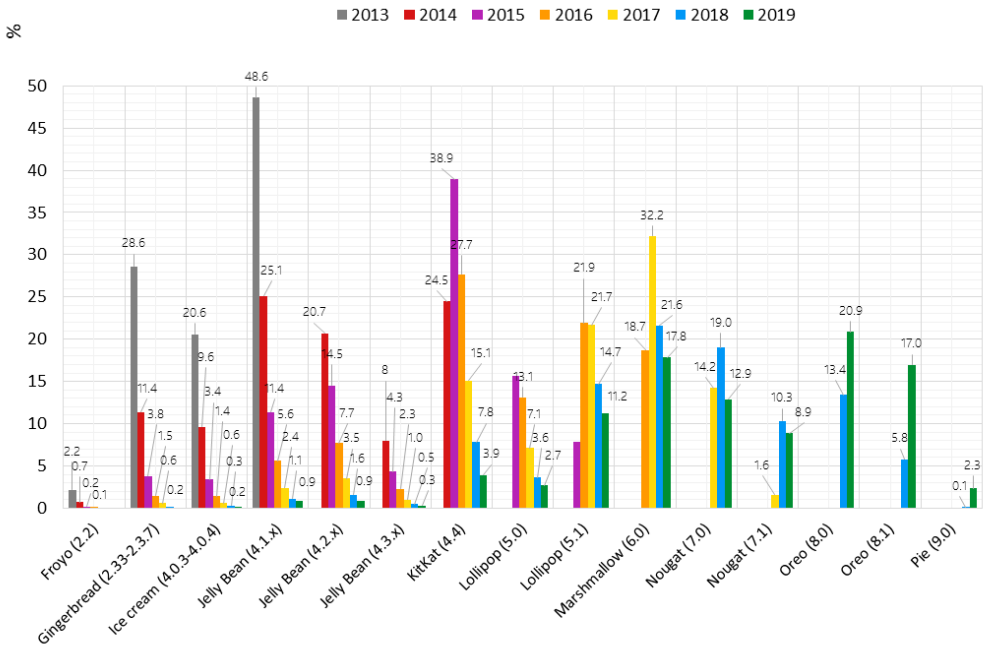


Рис. 3. Статистика распределения версий ОС Andoid.

На рис. 4 приведен график, отображающий отрицательную тенденцию распространения актуальных версий Android.

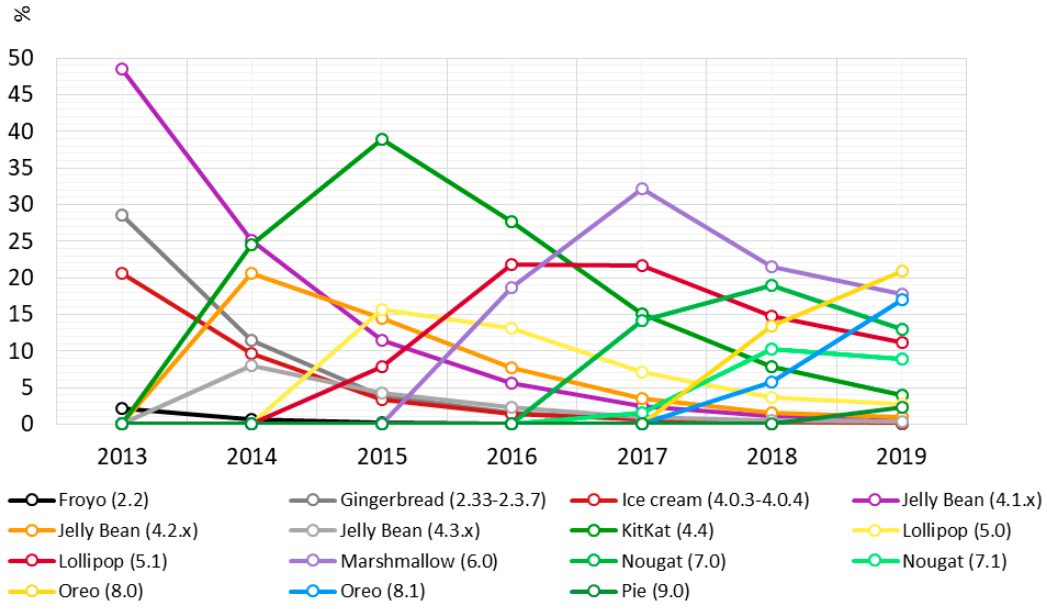


Рис. 4. График изменений количества устройств с различными версиями ОС Android.

Используя полученные данные, возможно провести прогнозирование вероятностного показателя нахождения устройства в уязвимом состоянии на ближайшие несколько лет. Для прогнозирования используется линейная функция парной регрессии (рис. 5).

Таким образом, в случае сохранения тренда развития экосистемы Android, к 2021 году вероятность компрометации устройств на данной платформе будет стремиться к 0.7,

что является серьезным сигналом в потребности создания новых методов обеспечения обновлениями безопасности мобильных устройств.

Векторы заражения

В исследовании “Android: protecting the kernel”, посвященному анализу уязвимостей Android в период с 2014 по 2016 год, отмечено резкое увеличение обнаруженных уязвимостей в ядре Linux [5]. На рис. 6 приведена статистика, характеризующая динамику роста уязвимостей ядра. В 2014 г. в ядре Android было найдено 4% уязвимостей, в 2016 г. данный показатель вырос до 36% и на 2018 год сохраняется в районе 33%.

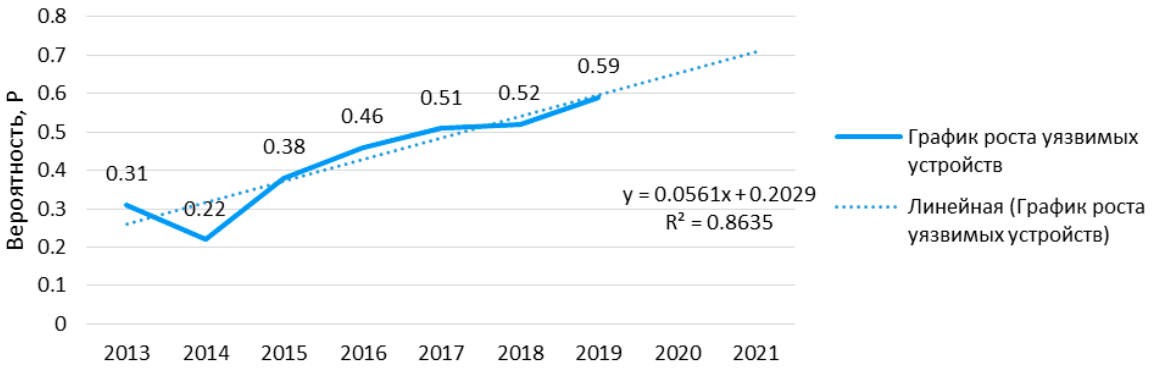


Рис. 5. График роста уязвимых устройств.

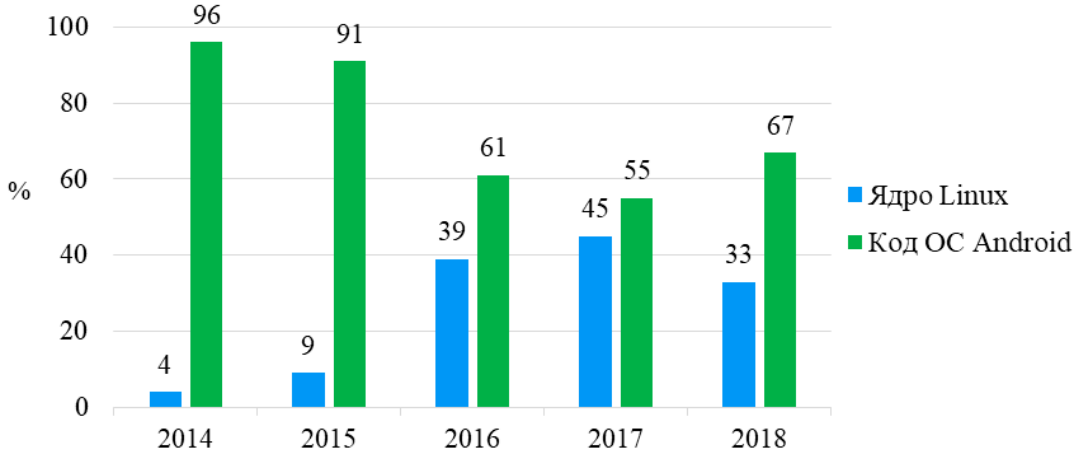


Рис. 6. Статистика уязвимостей ОС Android.

Основной причиной резкого увеличения уязвимостей в ядре является внедрение в 2013 году в версию Android 4.4 системы принудительного контроля доступа SELinux (Security Enhanced Linux), позволяющей создавать политики, определяющие виды взаимодействий, разрешенные и запрещенные для каждого процесса в рамках общего контекста безопасности, а также вводить ограничения возможностей администратора.

К ошибкам ядра относятся уязвимости не только в ядре Linux, а также в коде закрытых драйверов, поставляемых разработчиками мобильных чипсетов. На международной конференции по информационной безопасности *RSA Conference USA 2018* в докладе по исследованиям существующих уязвимостей в Android указано, что 85% уязвимостей, обнаруженных в ядре, относятся к коду закрытых драйверов [6]. На рис. 7 приведена диа-

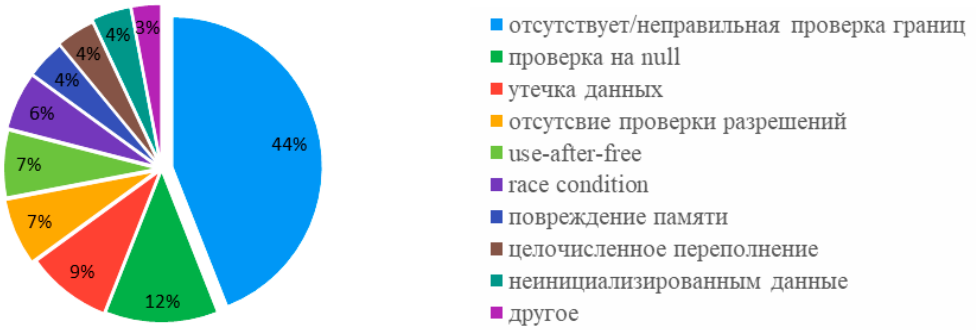


Рис. 7. Типы ошибок ядра.

грамма соотношения различных типов ошибок ядра. В результате данные типы уязвимостей способствуют проведению атак на системы независимо от версии Android.

В настоящее время каждый вид вредоносного программного обеспечения (ВПО), предназначенный для стационарных компьютеров, имеет аналог и для Android – организация бот-сети, хищение персональных данных, получение контроля над устройством или вывод его из строя и т. д. На рис. 8 приведена диаграмма, характеризующая соотношение существующих видов ВПО для Android на 3 квартал 2018 года [7]. С развитием системы разрешений и безопасности процент вирусов типа Trojan-SMS и Spyware в целом резко снизился.

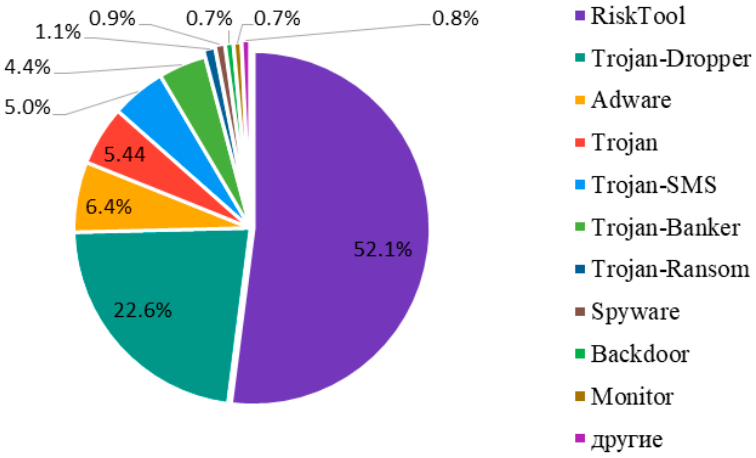


Рис. 8. Виды вредоносного программного обеспечения.

Современные технологии распространения вредоносного программного обеспечения

В настоящее время технологии распространения ВПО классифицируются следующим образом [8]:

- *Эксплуатация уязвимостей ядра Linux и его модулей.* Android является дистрибутивом Linux с собственной реализацией функций межпроцессорного взаимодействия, управления режимом «сна», защиты ядра (механизмом разделяемой памяти и т. д.) и высвобождения памяти. Таким образом, уязвимости, найденные в общих компонентах ядра, возможно применять на мобильных устройствах.

• *Эксплуатация уязвимостей аппаратных модулей.* Мобильные устройства обладают большим количеством аппаратных модулей, предназначенных для взаимодействия с другими устройствами [9]. Данный тип уязвимостей возможно эксплуатировать в зоне действия радио-модулей или при наличии непосредственного доступа к устройству.

• *Эксплуатация уязвимостей в компонентах операционных систем, программах и драйверах.* Позволяет атакующей стороне обходить средства защиты Android и SELinux.

• *Эксплуатация уязвимостей в компонентах производителей мобильных устройств.* Производители устройств выполняют модификацию Android, размещая различные приложения в директории system, т. е. запуск процессов производится в привилегированном режиме. Данные приложения могут содержать уязвимости, приводящие к утечкам данных, захвату учетных записей и установке ВПО. Также, производители сами могут модифицировать систему с не декларированным функционалом.

• *Эксплуатация уязвимостей в библиотеках.* В архитектуру Android включен ряд библиотек, таких как OpenGL, Audio Manager, Media Framework, libc и т. д. [2]. Эксплуатирование уязвимостей в данных компонентах является одним из главных векторов атаки на текущий момент. Наиболее распространенные уязвимости компонента Media Framework позволяют производить атаки типа удаленного выполнения кода (RCE) на пораженном устройстве (например, при работе с электронной почтой, просмотре сайтов в Интернете или обработке медиафайлов MMS) [10].

• *Эксплуатация уязвимостей в машинных кодах.* Android содержит инструментарий, позволяющий выполнять код C и C++ (Android NDK). Данная возможность порождает ошибки, характерные для низкоуровневых языков программирования (утечки памяти, переполнение буфера и т. д.).

• *Эксплуатация уязвимостей в пользовательских приложениях.* Приложения, установленные пользователем, могут содержать персональные данные, но хранение и доступ к данной информации не всегда обеспечивается должным образом (использование HTTP-трафика, файлы данных приложения размещены в папках с общим доступом и т. д.).

• *Использование методов социальной инженерии, применяемые для передачи и последующей установки ВПО из различных источников* (в том числе Play Market).

Способы противодействия анализу приложений, применяемые в Android

Противодействие инструментам статического анализа приложений

Для противодействия криминалистическому исследованию приложений и сигнатурному анализу используются способы маскирования, приведенные на рис. 9.

Способы различной обфускации кода направлены на приведение исходного текста или исполняемого кода программы к виду, сохраняющему ее функциональность, но затрудняющему анализ, понимание алгоритмов работы и модификацию при декомпиляции.

На данный момент наиболее распространенными инструментами обфускации кода приложений под Android являются DexGuard, Alatori, DashO и DexProtector. Также для первичной защиты от анализа кода применяются встроенные средства в Android Studio (Proguard или R8), но данные инструменты производят только переименование объектов. На рис. 10 приведены основные этапы преобразования исходного кода программ в исполняемый код виртуальной машины Dalvik/ART с применением данных инструментов.

В случае использования модульной архитектуры построения приложений применяются методы рефлексии, позволяющие осуществлять загрузку байт-кода в виртуальную машину во время выполнения приложения.

Рис. 9. Способы маскирования ВПО.

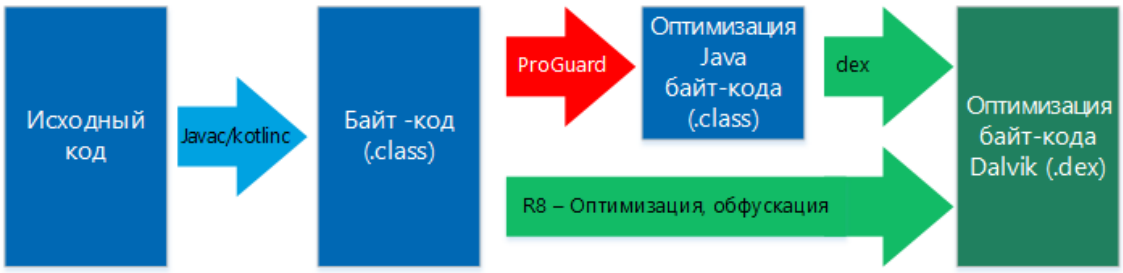


Рис. 10. Этапы создания приложений с использованием инструмента Proguard и R8.

В Android для реализации концепции динамической загрузки и исполнения кода существует следующий функционал:

1. dalvik.system.DexClassLoader – класс, позволяющий производить загрузку файлов формата «.dex», «.jar» или «.apk»;
2. Java Reflection API позволяет взаимодействовать с загруженным кодом во время выполнения программы.

Противодействие инструментам динамического анализа приложений

Способы противодействия динамическому анализу приложения, представленные на рис. 11, направлены на детектирование попыток поведенческого контроля во время выполнения программы в контролируемой «песочнице» для получения поведенческого отпечатка [11, 12]. Способ статической эвристики основан на проверке уникальных идентификаторов устройства, таких как серийный номер, принадлежность внешнего IP-адреса к сервисам проверки приложений и т. д. Как правило, при использовании гипервизора данные показатели равны значениям по умолчанию, что является показателем для де-

тектирования систем наблюдения. Способ, основанный на возникновении погрешности показаний датчиковой аппаратуры (акселерометр, гироскоп, датчик освещенности, GPS и т. д.), относят к динамической эвристике. Стоит обратить внимание, что современные эмуляторы поддерживают симуляцию датчиков с событиями обновления псевдослучайных значений, происходящими через недетерминированные интервалы времени, что затрудняет динамическую эвристику.

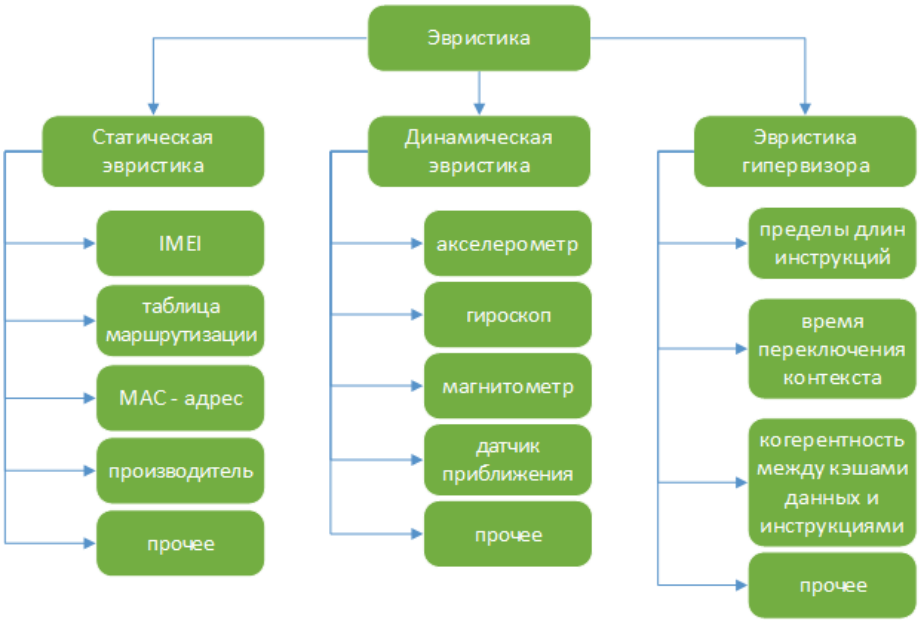


Рис. 11. Способы противодействия инструментам динамического анализа.

Эвристика гипервизора основана на различиях неполноценной эмуляции реального оборудования. Приведенные выше способы базируются на поиске различий в функционировании реальных и эмулируемых устройств. Данные отличия заключаются в наличии различий значений в регистрах MSR (моделезависимые регистры), временных интервалах переключения контекста, в пределах длин инструкций, а также специфических ошибках процессоров, относительной производительности и т. д.

Приведенные выше способы зачастую применяются для обхода системы антивирусного сканирования Google Bouncer, функционирующей в официальном репозитории Play Market, вследствие чего ВПО имеют возможность получить статус «доверенного приложения».

Современные способы и средства обеспечения безопасности в ОС Android

В Android наиболее серьезным изменениям в последних версиях была подвергнута система обеспечения безопасности на уровне платформы. Для оперативного устранения обнаруженных уязвимостей в коде Android компанией Google произведен запуск программы ежемесячного выпуска обновлений безопасности. Начиная с Android 8.0, добавлен компонент на уровне платформы “Play Protect” – облачная система безопасности, обеспечивающая сканирование приложений в официальном репозитории и на устройствах пользователей в режиме реального времени.

В табл. 2 перечислены современные средства обеспечения информационной безопасности на уровне устройства и их назначение [13, 14].

Таблица 2. Механизмы защиты Android

№	Функция безопасности	Описание типа защиты
1.	Шифрование	Защита данных от несанкционированного доступа с использованием средств криптографической защиты информации.
2.	Аппаратные средства защиты	Обеспечение надежного хранения ключей шифрования и защищенной процедуры аутентификации.
3.	Защита ядра	PAN (Privileged Access Never) – запрет обращения к памяти процессов напрямую и принуждение использования функций копирования памяти (Android 8.0); CFI (Control Flow Integrity) – создание графа вызовов функций, встраивание кода сверки с данным графом перед каждым вызовом функций. Данный механизм направлен на противодействие модификации указателей на функцию и адресов возврата (Android 9.0); IOS (Integer Overflow Sanitization) – защита данных от целочисленное переполнение. Проверка выполнения арифметических операций (Android 7.0); KASLR (Kernel Address Space Layout Randomization) – присвоение случайного адреса памяти участку расположения кода, области анонимной памяти, данных ядра в памяти при каждой загрузке (Android 8.0); PIROM (Post-Init Read-Only Memory) – создание доступных для чтения и записи областей памяти, используемых только во время инициализации и переводимых в режим «только для чтения» после инициализации (Android 8.0).
4.	Изоляция процессов	Выполнение каждого приложения в отдельном адресном пространстве с уникальными значениями user/group ID. Осуществление обмена данными между процессами осуществляется через сервисы ОС.
	SELinux	Принудительный контроль доступа, обеспечивающий минимально необходимый набор привилегий для каждого процесса.
5.	Верификация загрузки ОС	Обеспечение исправного состоянии операционной системы при загрузке. Механизмы, предотвращающие запуск самоподписанного кода и проверки целостности и цифровой подписи ядра.

Заключение

Проблемы в вопросах обеспечения безопасности платформы Android присутствуют на всех уровнях платформы. В современных версиях Android механизмы защиты серьезно повысили степень защищенности устройств, но данные решения не направлены на обеспечение безопасности экосистемы в целом и не позволяют гарантировать абсолютную надежность и безопасность данных в мобильных устройствах. Несмотря на значительное повышение качества механизмов защиты, количество уязвимостей продолжает увеличиваться. Согласно данным с ресурса cvedetails.com, на текущий момент в Android насчитывается 2146 уязвимостей, причем в 2017 г. обнаружено 842, а в 2018 – 611 уязвимостей [15].

Высокая степень фрагментации платформы и прогнозируемое увеличение числа уязвимых устройств требует применения новых методов обеспечения безопасности мобильных операционных систем и систем анализа на наличие вредоносного кода. Данная область представляет важную и актуальную задачу с необходимостью детальной проработки вопросов идентификации вредоносного кода.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 03.G25.31.0280 от 30 мая 2017 г.).

Литература / References:

1. Operating System Market Share Worldwide. URL: http://gs.statcounter.com/os-market-share (accessed March 02, 2019).

2. Android Architecture. URL: https://source.android.com/devices/architecture (accessed January 02, 2019).

3. Android Enterprise Recommended. URL: https://www.android.com/intl/ru_ru/enterprise/recommended/ (accessed January 02, 2019).

4. Android version market share distribution among smartphone owners as of September 2018. URL: https://www.statista.com/statistics/271774/share-of-android-platforms-on-mobile-devices-with-android-os/ (accessed February 23, 2019).

5. Stoep J.V. Android: protecting the kernel. – 2016, 35 p. URL: https://events.linuxfoundation.org/sites/events/files/slides/Android%20protecting%20the%20kernel.pdf (accessed March 03, 2019).

6. Vigna G. How automated vulnerability analysis discovered hundreds of Android 0-days. URL: https://www.rsaconference.com/writable/presentations/file_upload/mbs-r14-how-automated-vulnerability-analysis-discovered-hundreds-of-android-0-days.pdf (accessed January 02, 2019).

7. Chebyshev V. Mobile malware evolution 2018. URL: https://securelist.com/mobile-malware-evolution-2018/89689/ (accessed March 15, 2019).

8. Романеев М. Проблемы безопасности Android-приложений: классификация и анализ [Romaneev M. Android Application Security Issues: Classification and Analysis]. URL: http://www.pvsm.ru/android/260205#17 (accessed February 27, 2019).

9. Kaspersky_Lab Security Week 45: Кое-что об уязвимостях в Bluetooth [Something about Bluetooth vulnerabilities]. URL: http://www.pvsm.ru/android/298251 (accessed February 10, 2019).

10. CVE-2017-0466 Detail. URL: https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE-2017-0466 (accessed April 22, 2019).

11. Petsas T., Voyatzis G., Athanasopoulos E., Ioannidis S., Polychronakis M. Rage against the virtual machine: Hindering dynamic analysis of Android malware [presentation]. URL: http://www.syssec-project.eu/m/documents/eurosec14/RATVM.pdf (accessed November 18, 2018).

12. Petsas T., Voyatzis G., Athanasopoulos E., Ioannidis S., Polychronakis M. Rage against the virtual machine: Hindering dynamic analysis of Android malware URL: http://www.syssec-project.eu/m/page-media/3/petsas_rage_against_the_virtual_machine.pdf (accessed March 02, 2019).

13. Android Security & Privacy 2018 Year in Review. URL: https://source.android.com/security/reports/Google_Android_Security_2018_Report_Final.pdf (accessed March 02, 2019).

14. Security Blog. URL: https://security.googleblog.com/search/label/android%20security (accessed April 02, 2019).

15. Vulnerability Trends Over Time. URL: https://www.cvedetails.com/product/19997/Google-Android.html?vendor_id=1224 (accessed April 25, 2019).

Об авторах:

Изергин Дмитрий Андреевич, ассистент кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). https://orcid.org/0000-0002-3174-4550

Еремеев Михаил Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры КБ-2 «Прикладные информационные технологии» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). https://orcid.org/0000-0002-5511-4000

Магомедов Шамиль Гасангусейнович, кандидат технических наук, доцент кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). https://orcid.org/0000-0001-8560-1937. ResearcherID M-5782-2016

Смирнов Станислав Игоревич, старший преподаватель кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). https://orcid.org/0000-0003-4387-0850

About the authors:

Dmitriy A. Izergin, Assistant of Professor of the Chair CS-4 “Intelligent Information Security Systems”, Institute of Integrated Safety and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). https://orcid.org/0000-0002-3174-4550

Mikhail A. Eremeev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Chair CS-2 “Applied Information Technologies”, Institute of Integrated Safety and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). https://orcid.org/0000-0002-5511-4000

Shamil G. Magomedov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Chair CS-4 “Intelligent Information Security Systems”, Institute of Integrated Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). https://orcid.org/0000-0001-8560-1937. ResearcherID M-5782-2016

Stanislav I. Smirnov, Senior Lecturer of the Chair CS-4 “Intelligent Information Security Systems”, Institute of Integrated Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). https://orcid.org/0000-0003-4387-0850

ISSN 2500-316X (Online)

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-56-67

CC BY

UDC 004.75

Processing streams in a monitoring cloud cluster

Alexey N. Nazarov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author, e-mail: a.nazarov06@bk.ru

The creation of monitoring clusters based on cloud computing technologies is a promising direction for the development of systems for continuous monitoring of objects for various purposes in the web space. Hadoop web-programming environment is the technological basis for the development of algorithmic and software solutions for the synthesis of monitoring clusters, including information security and information counteraction systems. The International Telecommunication Union' (ITU) recommendations Y. 3510 present the requirements for cloud infrastructure that require monitoring the performance of deployed applications based on the collection of real-world statistics. Often, computing resources of monitoring clusters of cloud data centers are allocated for continuous parallel processing of high-speed streaming data, which imposes new requirements to monitoring technologies, necessitating the creation and research of new models of parallel computing. The need to use service monitoring plays an important role in the cloud computing industry, especially for SLA/QoS assessment, as the application or service may experience problems even if the virtual machines on which the work is taking place appear to be operational. This requires to study the methodological possibilities of organization to study of parallel processing high-speed streaming services with the processing of huge amounts of bit data, and, simultaneously, to estimate the necessary computational resource. In the conditions of high dynamics of changes in the bit rate of information generation from the source, a model of the bit rate of Discretized Stream (DStream) formation is proposed, which has a common application. Based on the poly-burst nature of the bit rate model, a model of group content traffic of any sources of different services processed in the cloud cluster was created. The obtained results made it possible to develop mathematical models of parallel DStreams from sources processed in a cloud cluster via Hadoop technology using the micro-batch architecture of the Spark Streaming module. These models take into account the flow of requests for maintenance from sources of different services, on the one hand, and, on the other hand, the needs of services in bit rate, taking into account the multichannel traffic of sources of various services. At the same time, analytical relations are obtained to calculate the required performance of the Hadoop cluster at a given value of the probability of batch loss.

Keywords: monitoring, Hadoop, Spark, batch, bit rate, micro-batch, architecture, parallel flow, cloud computing, expectation, variance, probability, probability distribution function, probability distribution density, random process, Delta function.

For citation: Nazarov A.N. Processing streams in a monitoring cloud cluster. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):56-67. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-56-67

Обработка потоков в мониторинговом облачном кластере

А.Н. Назаров

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: a.nazarov06@bk.ru

Создание мониторинговых кластеров облачных вычислений является перспективным направлением создания систем непрерывного контроля объектов различного назначения в web-пространстве. Среда web-программирования Hadoop является технологической основой разработки алгоритмических и программных решений по синтезу мониторинговых кластеров, включая системы информационной безопасности и информационного противодействия. В рекомендациях Y.3510 Международного союза электросвязи (ITU) представлены требования, предъявляемые к облачной инфраструктуре, обусловливающие необходимость в мониторинге производительности развернутых приложений на основе сбора реальных статистических данных. Зачастую вычислительные ресурсы мониторинговых кластеров облачных центров обработки данных выделены для постоянной параллельной обработки высокоскоростных потоковых данных, что предъявляет новые требования к технологиям мониторинга, обусловливающие необходимость создания и исследования новых моделей параллельных вычислений. Необходимость применения мониторинга услуг играет важную роль в индустрии облачных вычислений, в особенности для оценки SLA/QoS, так как в приложении или услуге могут возникнуть проблемы, даже если виртуальные машины, на которых происходит работа, выглядят работоспособными. При этом необходимо решение задачи исследования методических возможностей по оценке необходимого вычислительного ресурса в условиях высокоскоростных потоковых сервисов с обработкой гигантских объемов битовых данных. Разработаны математические модели параллельных потоков DStream от источников, обрабатываемых в облачном кластере на технологии Hadoop с использованием «микропакетной» архитектуры модуля Spark Streaming, учитывающие, с одной стороны, поток заявок источников различных сервисов на обслуживание, а, с другой стороны, потребности сервисов в битовой скорости передачи с учетом полипачечности трафика источников различных сервисов.

Ключевые слова: мониторинг, Hadoop, Spark, пакет, битовая скорость, микропакет, архитектура, параллельный поток, облачные вычислениятематическое ожидание, дисперсия, вероятность, функция распределения вероятностей, плотность распределения вероятностей, случайный процесс, Дельта-функция.

Для цитирования: Nazarov A.N. Processing streams in a monitoring cloud cluster. *Российский технологический журнал.* 2019;7(6):56-67. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-56-67

Introduction

The highest rates of use of Internet technologies and, above all, the Internet of things, in various areas of human activity, impose new requirements to ensure the control of various objects in the web space, including the interests of information security. Automation processes of industrial facilities with a continuous production cycle widely used technologies of industrial Internet and cloud monitoring. Intellectual analysis of the blogosphere is developing, which allows us to predict and synthesize political actions. Monitoring procedures are constantly functionally improved, including based on the latest technological solutions derived from the

achievements of artificial intelligence and cloud computing. Cyberattacks can cause enormous material and financial damage, especially in relation to critical information infrastructure.

Cloud computing is a dynamically scalable way to access external computing resources in the form of a service [2] provided via the Internet [3]. Efforts to standardize cloud technologies are consolidated by the International Telecommunication Union, whose work was initially carried out within the Focus Group on Cloud Computing. The results of this work were issued in the form of several reports [4, 5], and in the summer of 2013, specifications [6, 7] defining the requirements for the quality of cloud services, infrastructure and features of computing resources management were issued. As cloud computing technologies evolve, end-to-end and trusted management are of particular interest [8–12].

The requirements for cloud infrastructure include the need to monitor the performance of the data center, including parallel processing of streaming services.

The creation of a cloud monitoring cluster based on Hadoop technology allows solving many problems of continuous monitoring of objects in cyberspace.

Apache Spark is a versatile and high-performance cluster platform. Spark performance outperforms popular implementation of the MapReduce model, including streaming processing [13].

If Spark is installed on an existing Hadoop YARN cluster, it is possible to use the built-in managers of these clusters. RDD (Resilient Distributed Datasets) datasets are a collection of elements distributed among many computational nodes that can be processed in parallel. Spark Core provides many functions for managing such collections [13].

At the same time, it is necessary to solve the problem of studying methodological possibilities for assessing the necessary computing resource in the conditions of high-speed streaming services with the processing of huge volumes of bit data.

Concurrency in a cluster

At the logical level, RDD is a single collection of objects. During execution, RDD is divided into many partitions, each containing a subset of all the data. When Spark schedules and executes tasks, one task is created for each partition, and each task will run on the same core by default. In the Hadoop HDFS cluster, the original RDD sets are partitioned into HDFS file blocks.

If the degree of parallelism is not high enough, the Spark source resources may be idle. For example, if an application has 1000 cores at its disposal and it is performing a stage of only 30 tasks, you could increase the degree of parallelism and use more cores. In contrast, if the degree of parallelism is too high, the small overhead costs associated with each partition can be substantial in total.

The Spark Streaming module is built using a micro-batch architecture, when the data stream is interpreted as a continuous sequence of small data batches. Spark Streaming takes data from different sources and combines them into small batches (see Fig. 1) [13]. New batches are created at regular intervals. A new batch is created at the beginning of each time interval, and any data received during that interval is included in the batch. At the end of the interval, the batch increment stops. The size of the interval is determined by a parameter called the batch interval. Typically, the batch interval is between 500 milliseconds and a few seconds. Each batch generates a set of RDD and is processed by Spark job that creates another set of RDD. The batch processing results can then be transmitted to external systems for further analysis [13].

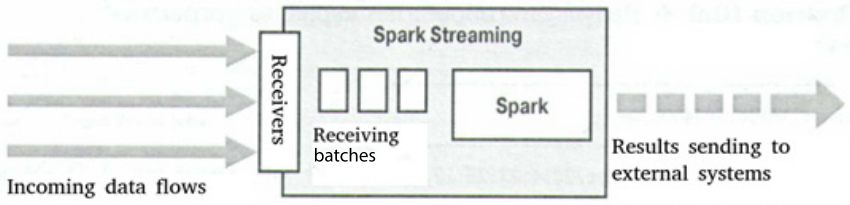


Fig. 1. Illustration of a micro-batch architecture.

Software abstraction in Spark Streaming is a discretized stream, or DStream, schematically represented in Fig. 2 as a sequence of RDD sets, where each RDD corresponds to one time interval.

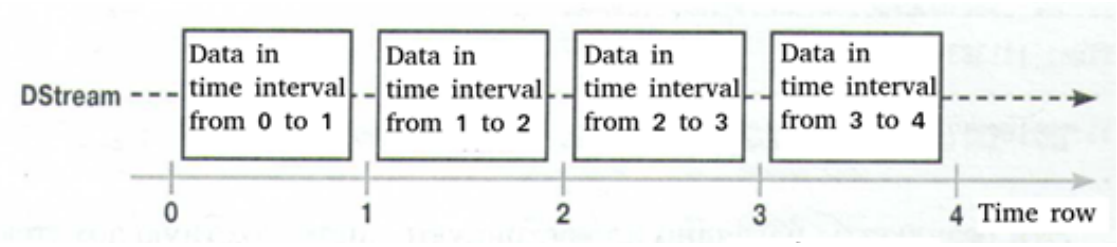


Fig. 2. Scheme of formation of a DStream.

Hadoop-based monitoring of objects in web space. Statement of the research problem

Monitoring of objects in the web-space implies regular observations of Internet objects (IP-addresses of users of the world wide web, sites, etc.), of their information and other resources, of services for both legal entities and individuals. These observations allow highlighting the state of these objects and the processes occurring in them under the influence of Internet activity on the Earth. Depending on the target function, web-monitoring also assesses the status and functional activities, the value of Internet ecosystems. Secondly conditions are created to determine corrective actions in cases where the targets of problem-oriented conditions are not achieved.

Using the ideas of artificial intelligence [14, 15] in combination with the capabilities of cloud computing for the development of monitoring technologies is very promising.

Hadoop, as a cloud technology of distributed processing of large amounts of data in the web environment, is rapidly becoming an important tool, a skill for a wide range of programmers [16].

In this regard, monitoring in the Hadoop environment will be understood as organized monitoring of selected objects in the web-space (in the subject area) using the capabilities of Hadoop.

Hadoop was created to work with Big Data in the web space. And in this regard it has a number of unique properties and abilities. Relevant quote [16]: “Technically speaking, Hadoop is an open source framework designed to create and run distributed applications that process large amounts of data.”

Hadoop operates on the basis of the MapReduce technology developed by Google. MapReduce is a simple but very powerful way to process and analyze very large datasets, and it is particularly effective for volumes ranging from a few petabytes.

In [17] the principles, approaches and technological procedures for the organization of monitoring are analyzed from rather general premises. Methodological approaches to the

creation of algorithms and software solutions in the Hadoop web-programming environment applied to a wide class of tasks for monitoring objects in the web-space were developed.

For the first time, the topology of the Hadoop monitoring cluster, which has a common application and is schematically shown in Fig. 3, was developed. Research was conducted, and algorithms were proposed for the measurement of attributes of monitored objects in the web space taking into account the requirements of measurements uniformity. System requirements for the design of the Hadoop monitoring cluster were developed.

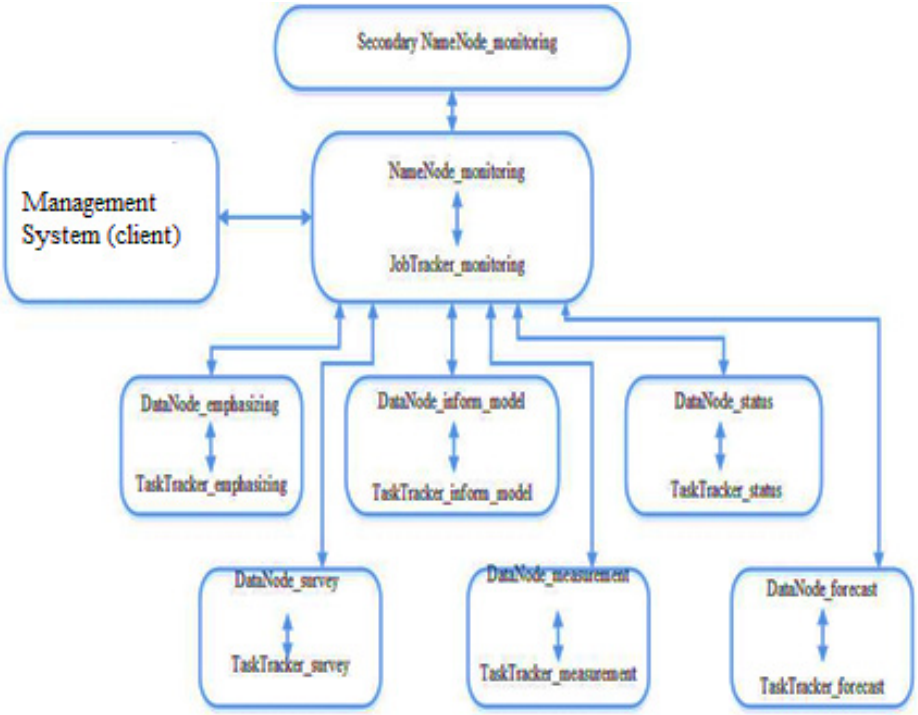


Fig. 3. Topology of the Hadoop monitoring cluster.
Daemons description is given in [17].

For the topology of the Hadoop monitoring cluster [16], the methodological recommendations were developed and studied for the synthesis of TaskTraker_state and DataNode_state daemons. The recommendations are responsible for solving the problem of assessing the state of the object of observation and identifying its information model taking into account the features of cloud computing. Principles and approaches were proposed [17] based on neuro-fuzzy solutions that can be used as a basis for the design of intelligent automated systems for monitoring objects in the web-space.

Decision-making mechanisms based on the formalization of a priori experience of experts in the fuzzy base of fuzzy production rules are proposed [17]. The possibilities of a neuro-fuzzy classifier in the form of a three-layer fuzzy neural network were investigated within the framework of solving the problems of classification and expansion of the classification of input data on the characteristics of the attributes of the monitoring object. The network consists of the following levels:

– system of fuzzy production rules describing the identifier operation taking into account expert assessments;

– neuro-fuzzy network, the structure of which reflects the system of fuzzy production rules;

– clear self-learning neural network for solving the problem of clustering (classification) of input data from the web-space.

Moreover, the lower level solves the problems of operational identification of attribute changes, and the upper one solves the problems of the accumulation of experience in detecting the effects of such changes on the elements and nodes of the monitoring object.

To train a neural network, a general approach is proposed that allows taking into account the stochastic dynamics of the attributes of the monitoring object in the web-space. The approach is based on the standard method of minimizing the generalization error on the basis of minimizing the quadratic residual functional on the training sample.

An approach to the mathematical formalization of the synthesis of the TaskTracker_state daemon in a task of conditional optimization was proposed [17]. Limitations in the form of inequalities reflecting the specifics of cloud computing in Hadoop environment are proposed. The possibilities of using the bootstrap method to assess the dynamics of the attributes of the monitoring object are analyzed.

The results obtained during the computer experimental study of the possibility of practical implementation of the neural network method for determining the type of computer attack showed a fairly high quality of the method's work [17].

Known approaches to parallel data processing in cloud systems [18] are reduced to the implementation of parallel operations, which is applicable to work with databases, tables, but does not reflect the specifics of the general problem of the synthesis of the Hadoop monitoring cluster, since the problem of scientific and methodological justification of the required cloud resource in parallel processing of streaming services with proper quality remains unresolved. To achieve this goal, it is necessary first to develop mathematical models for the bit rate of DStream formation and for a group of parallel DStreams from sources processed in a cloud cluster via the Hadoop technology.

Model for the bit rate of DStream formation

We assume that in the current interval of time $[t_0, t]$ as a result of measurements to a random process of bit rate of DStream formation from the s-th source of the k-th service with a variable bit rate, it is possible to match a finite set of discrete values that reflect the poly-burst nature of the bit rate.

The term "poly-burst" means that there are time intervals in which the source generates information with a high bit rate (burst), significantly exceeding the average bit rate for the entire time the service is provided to the consumer.

Let us denote a finite set of these values $\left\{B_{\max_j}^{(sk)}\right\}_{j=1}^{n_s(t)}$. Elements of this set correspond uniquely to elements of the set of time intervals $\left\{\left[t_{o_j}^{(sk)}, t_{p_j}^{(sk)}\right]\right\}_{j=1}^{n_s(t)}$, the set of probability values $\left\{p_j^{(sk)}\right\}_{j=1}^{n_s(t)}$ and the set of burst coefficients $\left\{k_{B_j}^{(sk)}\right\}_{j=1}^{n_s(t)}$ [19], where $k_{B_j}^{(sk)} = \dfrac{B_{\max_j}^{(sk)}}{B_{aver}^{(sk)}}$.

The result of a stepwise approximation of a random process of bit rate of DStream formation from the s-th source of the k-th service at time t will be written as

$$\tilde{b}_d^{(sk)}(t) = \sum_{i=1}^{n_s(t)} B_{\max_i}^{(sk)} \left[\Theta\left(t - t_{o_i}\right) - \Theta\left(t - t_{p_i}\right)\right]$$

and the probability distribution density of the random process of bit rate of DStream formation from the *s*-th source of the *k*-th service at time *t* can be expressed in terms of the sum of Delta functions [14]

$$f_t\left(\tilde{b}_d^{(sk)}\right)=\sum_{j=1}^{n_s(t)} p_j^{(sk)}\delta\left(\tilde{b}_d^{(sk)}(t)-B_{\max_j}^{(sk)}\right)\left[\Theta\left(t-t_{o_j}\right)-\Theta\left(t-t_{p_j}\right)\right], \quad (1)$$

Where $\Theta(t)=\begin{cases}0, t<0\\ 1, t\geq 0\end{cases}$ is the Heaviside step function, and

$\sum_{j=1}^{n_s(t)} p_j^{(sk)}k_{B_j}^{(sk)}=1, k_{B_j}^{(sk)}=\frac{B_{\max_j}^{(sk)}}{B_{aver}^{(sk)}}, \sum_{j=1}^{n_s(t)} p_j^{(sk)}k_{B_j}^{(sk)}=1$ is the characteristic property of poly-burst DStream traffic.

Bit rate probability distribution function from the *s*-th source of the *k*-th service at time *t* is obtained by integrating

$$F_{(t)}\left(\tilde{b}_d^{sk}\right)=\int_{-\infty}^{\tilde{b}_d^{(sk)}(t)} f_t(\tau)d\tau=$$

$$=\int_{-\infty}^{\tilde{b}_d^{(sk)}(t)}\sum_{i=1}^{n_s(t)} p_i^{(sk)}\delta\left(\tau-B_{\max_i}^{(sk)}\right)\left[\theta\left(t-t_{0_i}\right)-\theta\left(t-t_{p_i}\right)\right]d\tau=$$

$$=\sum_{i=1}^{n_s(t)} p_i^{(sk)}\left[\theta\left(t-t_{o_i}\right)-\theta\left(t-t_{p_i}\right)\right]\int_{-\infty}^{\tilde{b}_d^{(sk)}(t)}\delta\left(\tau-B_{\max_i}^{(sk)}\right)d\tau=$$

$$=\sum_{i=1}^{n_s(t)} p_i^{(sk)}\left[\theta\left(t-t_{o_i}\right)-\theta\left(t-t_{p_i}\right)\right]\int_{-\infty}^{\tilde{b}_d^{(sk)}(t)}\delta\left(\tau-B_{\max_i}^{(sk)}\right)d\tau=$$

$$=\sum_{i=1}^{n_s(t)} p_i^{(sk)}\left[\theta\left(t-t_{o_i}\right)-\theta\left(t-t_{p_i}\right)\right]\theta\left(\tilde{b}_d^{(sk)}(t)-B_{\max_i}^{(sk)}\right),$$

since the primitive of the Delta function is the Heaviside function.

The first moment and variance of stepwise approximation of a random process of the poly-burst bit rate of DStream formation from the *s*-th source of the *k*-th service on the time interval $[t_0, t]$ by [19] can be expressed as follows:

$$E\left[\tilde{b}_d^{(sk)}(t)\right]=\sum_{i=1}^{n_s(t)} p_i^{(sk)}B_{\max_i}^{(sk)}, \quad (2)$$

$$D\left[\tilde{b}_d^{(sk)}(t)\right]=\sum_{i=1}^{n_s(t)}\sum_{j=1}^{n_s(t)} p_i^{(sk)}p_j^{(sk)}\left(B_{\max_i}^{(sk)}-B_{\max_j}^{(sk)}\right). \quad (3)$$

By time *t* the average value and the variance of the rate of the random process of DStream formation from the *s*-th source of the *k*-th service can be easily converted to the average value and the variance of the rate of transmission of micro-batches for the selected time intervals:

$$E\left[r_{micro-batch}^{(sk)}(t)\right]=\frac{E\left[\tilde{b}_d^{(sk)}(t)\right]}{L_{\inf}},$$

$$D\left[r_{micro-batch}^{(sk)}\right]=D\frac{\left[\tilde{b}_d^{(sk)}(t)\right]}{L_{\inf}^2},$$

where L_{inf} is the bit length of the information part of the micro-batch.

Mathematical model of DStreams group

There is a technological possibility to combine many DStreams from multiple sources. Then, for the superposition $N_s(t)$ of independent streams at time t we obtain an expression for the probability distribution density of their group bit rate B

$f_t(B)=\Pi_{k=1}^{N_s(t)}f\left(\tilde{b}_d^{(sk)}\right)$, given the formula (1).

Accordingly, the probability distribution function of the poly-burst bit rate B of the superposition $N_s(t)$ of streams at time t is the following expression:

$$F_t(B)=\Pi_{k=1}^{N_s(t)}F_t\left(\tilde{b}_d^{(sk)}\right)=\Pi_{k=1}^{N_s(t)}\Sigma_{i=1}^{n_s(t)}p_i^{(sk)}\left[\theta\left(t-t_{o_i}\right)-\theta\left(t-t_{p_i}\right)\right]\theta\left(\tilde{b}_d^{(sk)}(t)-B_{\max_i}^{(sk)}\right).$$

In general, the number of DStreams in a significant time interval (t_0, t) in i-th cloud of an ecosystem of N clusters ($i = 1,\cdots, N$) from the sources of the k-th service is a random process

$$N_{DStream_i}^{(k)}(t)=\gamma_{\Sigma_i}^{(k)}(t)(t-t_0),$$

where

$$\gamma_{\Sigma_i}^{(k)}(t)=\Sigma_{j=1}^{N_{source_i}^{(k)}(t)}\gamma_s^{(k)}(t), \tag{4}$$

$\gamma_s^{(k)}(t)=\frac{N_{S1}^{(k)}(t)+N_{S2}^{(k)}(t)}{t-t_0}$ is the value of the intensity of the stream of service requests from the s-th source $1\le s\le N_{source_i}^{(k)}(t)$ of the k-th service,

$N_{S1}^{(k)}(t)$ is the number of DStreams serviced at time t, and

$N_{S2}^{(k)}(t)$ is the number of DStreams claimed, but maintenance-free at time t.

The value of a random summation process of DStreams from all K services in i-th cloud cluster at time t, taking into account the formula (4), is

$$\gamma_{\Sigma_i}(t) = \sum_{k=1}^{K} \gamma_{\Sigma_i}^{(k)}(t).$$

The total number of requests for processing DStreams from all the sources of all K services of i-th cluster at time t can be considered a random value – the value of a random process at time t

$$N_{\Sigma_{source_i}}^{(k)}(t) = \gamma_{\Sigma_i}^{(k)}(t)(t - t_0).$$

Taking into account (2) and (3), the numerical characteristics of the bit rate of DStreams processing that is required by the sources of the k-th service of the i-th cluster at a time t can be found as the numerical characteristics of the sum of the random number of independent random processes [20]:

$$E\left[b_{\Sigma_i}^{(k)}(t)\right] = \Sigma_{j=1}^{N_{source_i}^{(k)}(t)} E\left[\tilde{b}_d^{(jk)}(t)\right],$$

$$\sigma^2\left[b_{\Sigma_i}^{(k)}(t)\right] = D\left[b_{\Sigma_i}^{(k)}(t)\right] = \Sigma_{j=1}^{N_{source_i}^{(k)}(t)} D\left[\tilde{b}_d^{(jk)}(t)\right].$$

Since the cluster will serve a sufficiently large number of DStreams of each service (k = 1, …, K), the law of distribution of the sum of transfer rates can be approximated by the normal distribution law even if the source transfer rate is subject to any distribution law [20]. The main limitation imposed on summable quantities is that they should be more or less the same, which is naturally the case for sources of the same service.

It is shown [20] that in this case, at the moment of time t, the probability density of the random process of the bit rate of DStreams, which is required by the sources of the k-th service of the i-th cluster, has the form:

$$f\left(b_{\Sigma_i}^{(k)}(k)\right) = \frac{1}{\sigma\left[b_{\Sigma_i}^{(k)}(t)\right]\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(b_{\Sigma_i}^{(k)}(t) - E\left[b_{\Sigma_i}^{(k)}(t)\right]\right)^2}{2\sigma^2\left[b_{\Sigma_i}^{(k)}(t)\right]}\right],$$

where

$$E\left[b_{\Sigma_i}(t)\right] = \Sigma_{k=1}^{K} E\left[b_{\Sigma_i}^{(k)}(t)\right], \sigma^2\left[b_{\Sigma_i}(t)\right] = \Sigma_{k=1}^{K} \sigma^2\left[b_{\Sigma_i}^{(k)}(t)\right].$$

Omitting the intermediate integro-differential conversion and the introduction of new variables, using the office of the special functions, we express the probability distribution

function of a random process $F\left(b_{\Sigma_i}(t)\right)$ with parameters $E\left[b_{\Sigma_i}(t)\right]$ and $\sigma^2\left[b_{\Sigma_i}(t)\right]$ using the normal distribution function $\Phi(x)$) [21]:

$$F\left(b_{\Sigma_i}(t)\right)=\Phi\left(\frac{b_{\Sigma_i}(t)-E\left[b_{\Sigma_i}(t)\right]}{\sigma\left[b_{\Sigma_i}(t)\right]}\right),$$

This makes it possible to find the probability of the event that at time t the value of a random process of bit rate of DStreams processing $b_{\Sigma_i}(t)$, which is required to meet the current needs of the sources of the i-th cluster, can be given by the i-th cluster, respectively having performance or bandwidth B_i

$$P\left(b_{\Sigma_i}(t)\le B_i\right)=\Phi\left(\frac{b_{\Sigma_i}(t)-E\left[b_{\Sigma_i}(t)\right]}{\sigma\left[b_{\Sigma_i}(t)\right]}\right)=\Phi(u).$$

However, it is also necessary to solve the inverse problem, i.e., to determine the probability of the event that at time t the value of a random process of the rate of DStreams processing $b_{\Sigma_i}(t)$, which is necessary to meet the needs of all K services of i-th cluster, will exceed its performance

$$P\left(b_{\Sigma_i}(t)>B_i\right)=1-\Phi(u). \quad (5)$$

Expression (5) means that with probability $1-\Phi(u)$ some source at time t will not receive from the cluster the computing resource necessary for processing the information stream. The resource can be expressed in the number of cores.

Conclusion

We developed a mathematical model of parallel DStreams from sources processed in a cloud cluster via the Hadoop technology using the micro-batch architecture of the Spark Streaming module. The model takes into account, on the one hand, the stream of maintenance requests from the sources of various services and, on the other hand, the needs of services in transfer rate, taking into account poly-burst bit rate traffic sources with different services.

The formulas of the probability distribution functions of a random process of bit rate of the DStream formation from the s-th source of the k-th service with variable bit rate and a group of streams.

Analytical relations are obtained to calculate the required performance of the Hadoop cluster at a given value of the probability of micro-batch loss.

On the basis of the developed models it is possible to develop new guidelines for the automatic selection (adaptation) of the time batch interval with a focus on a particular service selected in the range from 500 milliseconds to several seconds. Each batch will create a set of RDD and will be processed by Spark in terms that reflect the technological features of real services of the Hadoop monitoring cluster, which appear regardless of the cluster functioning.

The developed models allow us to carry out the numerical analysis of parallel stream processing in a cloud cluster at the pre-project stage and to develop requirements, recommendations and algorithmic framework for the refinement of the functional of the Hadoop monitoring cluster in order to organize a predictable parallel process for maintenance of the monitoring objects of different nature in the web-space.

References:

1. Gudkova I., Maslovskaya N. Probability model for analysing impact of delays due to monitoring on mean service time in cloud computing. *T-comm.* 2014;8(6):13-15 (in Russ.).

2. Basharin G., Gaidamaka Y., Samoylov K. Mathematical theory of teletraffic and its application to the analysis of multiservice communication of next generation networks. *Automatic Control and Computer Sciences.* 2013;47(2):62-69. https://doi.org/10.3103/S0146411613020028

3. Buyya R., Broberg J., Goscinski A. Cloud Computing. Principles and Paradigms. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 637 p. https://doi-org/10.1002/9780470940105

4. Focus Group on Cloud Computing. Technical Report. Part 1: Introduction to the cloud ecosystem: definitions, taxonomies, use cases and higher-level requirements. ver. 1.0 (02/2012). International Telecommunication Union, 2012. 62 p. http://handle.itu.int/11.1002/pub/808604ae-en

5. Khaled S., Boutaba R. Estimating service response time for elastic cloud applications. In: Proceed. of the 1th International Conference on Cloud Networking CLOUDNET, IEEE, 2012; pp. 12-16. https://doi.org/10.1109/CloudNet.2012.6483647

6. Recommendation ITU-T, 2013, Cloud Computing framework and high-level requirements, Y.3501, p. 27.

7. Recommendation ITU-T, 2013, Cloud Computing infrastructure requirements, Y.3510, p. 22.

8. Recommendation ITU-T, 2015, Cloud Computing framework for end-to-end resource management, Y.3520, (09/15).

9. Recommendation ITU-T, 2016, Overview of end-to-end cloud computing management, Y.3521/M.3070 (03/16).

10. Recommendation ITU-T, 2016, End-to-end cloud service lifecycle management requirements, Y.3522 (09/16).

11. Recommendation ITU-T, 2018, Cloud computing – Overview of inter-cloud trust management, Y.3517 (12/18).

12. Recommendation ITU-T, 2018, Cloud computing – functional requirements of inter-cloud data management, Y.3518 (12/18).

13. Karau H., Konwinski A., Wendell P., Zaharia M. Learning Spark: Lighting-fast data analysis. US: O'Reilly, 2015. 257 p.

14. Erokhin S.D. A review of scientific research on artificial intelligence. In: Proceed. 2019 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. IEEE, 2019. 4 p. INSPEC Accession Number: 18638425. https://doi.org/10.1109/SOSG.2019.8706723

15. Chesnokov A.S., Gorodnichev M.G., Gavrish K.A., Zhidkova M.A. Intelligent vehicle condition monitoring system. In: Proceed. 2019 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. IEEE, 2019. 4 p. INSPEC Accession Number: 18638469. https://doi.org/10.1109/SOSG.2019.8706727

16. Lam C.P. Hadoop in Action. Publisher: Manning Publications Company, 2011. 334 p.

17. Nazarov A., Nazarov M., Pantiuhin D, Sychev A., Pokrova S. Automation of monitoring processes in web-based neuro-fuzzy formalism. *T-comm.* 2015;9(8):26-33 (in Russ.).

18. Munerman V.I. The implementation of parallel data processing in cloud systems. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technology and IT-education. 2017;13(2):57-63 (in Russ.). https://doi.org/10.25559/SITITO.2017.2.223

19. Nazarov A.N. Model of parallel processing of tasks in the cloud cluster Hadoop. In: Proceedings of the XIII International Industry Scientific and Technical Conference "Technologies of the information society" (March 20-21, 2019, Moscow, MTUCI). In 2 v. V. 2. M.: Publishing House Media Publisher, 2019; pp. 69-71 (in Russ.).

20. Grigoriev V.R., Nazarov A.N. Methodological aspects of parallel problem solving in the cloud cluster of cyber-attacks monitoring. In: Proceedings of the XVIII Scientific and Practical Conference "Information technologies in public administration. Digital transformation into human capital" (April 25, 2019). M.: Research Institute "Voskhod", 2019. 4 p. (in Russ.).

21. Sokolov G.A., Gladkih I.M. Mathematical statistics. M.: Ekzamen Publ., 2004. 432 p. (in Russ.).

Литература:

1. Гудкова И.А., Масловская Н.Д. Вероятностная модель для анализа задержки доступа к инфраструктуре облачных вычислений с системой мониторинга // Т-сомм: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 6. С. 13–15.

2. Башарин Г.П., Гайдамака Ю.В., Самуйлов К.Е. Математическая теория телетрафика и ее приложения к анализу мультисервисных сетей связи следующих поколений // Автоматика и вычислительная техника. 2013. Т. 47. № 2. С. 11–21.

3. Buyya R., Broberg J., Goscinski A. Cloud Computing. Principles and Paradigms. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 637 p. https://doi.org/10.1002/9780470940105

4. Focus Group on Cloud Computing. Technical Report. Part 1: Introduction to the cloud ecosystem: definitions, taxonomies, use cases and higher-level requirements. ver. 1.0 (02/2012). International Telecommunication Union, 2012. 62 p. http://handle.itu.int/11.1002/pub/808604ae-en

5. Khaled S., Boutaba R. Estimating service response time for elastic cloud applications. Proceed. of the 1th International Conference on Cloud Networking CLOUDNET, IEEE, 2012; pp. 12-16. https://doi.org/10.1109/CloudNet.2012.6483647

6. Recommendation ITU-T. Y.3501. Cloud Computing framework and high-level requirements. Geneva: International Telecommunication Union, 2013. 27 p.

7. Recommendation ITU-T. Y.3510. Cloud Computing infrastructure requirements. Geneva: International Telecommunication Union, 2016. 28 p.

8. Recommendation ITU-T. Y.3520 (09/15). Cloud Computing framework for end-to-end resource management. Geneva: International Telecommunication Union, 2015. 26 p.

9. Recommendation ITU-T. Y.3521/M.3070 (03/16). Overview of end-to-end cloud computing management. Geneva: International Telecommunication Union, 2016. 32 p.

10. Recommendation ITU-T. Y.3522 (09/16). End-to-end cloud service lifecycle management requirements. Geneva: International Telecommunication Union, 2016. 24 p.

11. Recommendation ITU-T. Y.3517 (12/18). Cloud computing – Overview of inter-cloud trust management. Geneva: International Telecommunication Union, 2018. 24 p.

12. Recommendation ITU-T. Y.3518 (12/18). Cloud computing – functional requirements of inter-cloud data management. Geneva: International Telecommunication Union, 2018. 26 p.

13. Карау Х., Ковински Э., Венделл П., Захария М. Изучаем Spark: молниеносный анализ данных. М.: ДМК Пресс, 2015. 304 с.

14. Erokhin S.D. A review of scientific research on artificial intelligence. In: Proceed. 2019 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. IEEE, 2019. 4 p. INSPEC Accession Number: 18638425. https://doi.org/10.1109/SOSG.2019.8706723

15. Chesnokov A.S., Gorodnichev M.G., Gavrish K.A., Zhidkova M.A. Intelligent vehicle condition monitoring system. In Proceed. 2019 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. IEEE, 2019. 4 p. INSPEC Accession Number: 18638469. https://doi.org/10.1109/SOSG.2019.8706727

16. Лэм Чак. Hadoop в действии. М.: ДМК Пресс, 2012. 424 с.

[Lam C.P. Hadoop in Action. Publisher: Manning Publications Company, 2011. 334 p.]

17. Назаров А.Н. Назаров М.А., Пантюхин Д.В., Покрова С.В., Сычев А.К. Автоматизация процедур мониторинга в web-пространстве на основе нейро-нечеткого формализма // T-comm. 2015. Т. 9. № 8. С. 26–33.

18. Мунерман В.И. Реализация параллельной обработки данных в облачных системах // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2017. Т. 13. № 2. С. 57–63. https://doi.org/10.25559/SITITO.2017.2.223

19. Назаров А.Н. Модель параллельной обработки задач в облачном кластере Hadoop // В кн.: Сборник трудов XIII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» (20-21 марта 2019 г. Москва, МТУСИ). В 2-х т. Том 2. М.: ООО ИД Медиа Паблишер, 2019. С. 69–71.

20. Григорьев В.Р., Назаров А.Н. Методические аспекты параллельного решения задач в облачном кластере мониторинга кибер-атак // Сборник трудов XVIII научно-практической конференции «Информационные технологии в государственном управлении. Цифровая трансформация в человеческий капитал» (25 апреля 2019г.). М.: ФГУП НИИ «Восход», 4 с.

21. Соколов Г.А., Гладких И.М. Математическая статистика: Учебник для вузов. М: Издательство «Экзамен», 2004. 432 с.

About the author:

Alexey N. Nazarov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Chair “Information warfare”, Institute for Integrated Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: a.nazarov06@bk.ru

Об авторе:

Назаров Алексей Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационное противоборство» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: a.nazarov06@bk.ru

ISSN 2500-316X (Online)

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-68-86

CC BY

УДК 004.896, 621.865.8

Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 2. Сервисная робототехника

А.М. Романов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: romanov@mirea.ru

В работе представлен обзор роботов различного масштаба и назначения. В ходе обзора анализируются применяемые аппаратные и программные решения и обобщаются наиболее распространенные структурные схемы систем управления. По результатам обзора проводится анализ подходов к масштабированию систем управления, применению алгоритмов интеллектуального управления, обеспечению отказоустойчивости, снижению массогабаритных размеров элементов систем управления, свойственных для разных классов роботов. Целью работы является поиск общих подходов, применяемых в различных областях робототехники для построения на их основе единой методологии проектирования масштабируемых интеллектуальных систем управления робототехническими комплексами с заданным уровнем отказоустойчивости на унифицированной элементной базе. Данная часть посвящена сервисной робототехнике. По результатам обзора сделаны следующие выводы: ключевой технологией в сервисной робототехнике с точки зрения масштабирования является Robot Operating System (ROS); сервисная робототехника является на сегодняшний день основным плацдармом для отработки интеллектуальных алгоритмов управления для тактического и стратегического уровня, которые интегрируются в общую систему на основе ROS; проблеме обеспечения отказоустойчивости в сервисной робототехнике практически не уделяется внимания, за исключением вопроса повышения надежности за счет изменения поведенческих алгоритмов; в ряде областей сервисной робототехники, в которых особо важно снижение массогабаритных размеров всех элементов, системы управления роботами выполняются на единственном вычислительном устройстве, в остальных случаях применяется многоуровневая архитектура, аналогичная тому, как это делается в промышленной робототехнике, с той разницей, что вместо программируемых логических контроллеров, на тактическом и стратегическом уровне используются встраиваемые компьютеры под управлением ROS и Linux.

Ключевые слова: робототехника, сервисные роботы, системы управления, мобильные роботы, дроны, беспилотные летательные аппараты, беспилотный транспорт, модульные реконфигурируемые роботы.

Для цитирования: Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботов различного масштаба и назначения. Часть 2. Сервисная робототехника. *Российский технологический журнал.* 2019;7(6):68-86. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-68-86

A review on control systems hardware and software for robots of various scale and purpose. Part 2. Service robotics

Aleksey M. Romanov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author, e-mail: romanov@mirea.ru

A review of robotic systems was carried out. The paper analyzes applied hardware and software solutions and summarizes the most common block diagrams of control systems. The analysis of approaches to control systems scaling, the use of intelligent control, the achievement of fault tolerance, and the reduction of the weight and size of control system elements belonging to various classes of robotic systems were carried out. The goal of the review is finding common approaches used in various areas of robotics to build on their basis a uniform methodology for designing scalable intelligent control systems for robots with a given level of fault tolerance on a unified component base. This part is dedicated to service robotics. The following conclusions are made on the basis of the review results: the key technology in service robotics from the point of view of scalability is the Robot Operating System (ROS); service robotics is today the main springboard for testing intelligent algorithms for the tactical and strategic control levels that are integrated into a common system based on ROS; the problem of ensuring fault tolerance in the service robotics is practically neglected, with the exception of the issue of increasing reliability by changing behavioral algorithms; in a number of areas of service robotics, in which the reduction of mass and dimensions is especially important, the robot control systems are implemented on a single computing device, in other cases a multi-level architecture implemented on Linux-based embedded computers with ROS are used.

Keywords: robotics, service robots, control systems, mobile robots, drones, unmanned aerial vehicle, unmanned transport, modular reconfigurable robots.

For citation: Romanov A.M. A review on control systems hardware and software for robots of various scale and purpose. Part 2. Service robotics. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):68-86 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-68-86

Введение

Целью данного цикла работ является обзор и анализ существующих и перспективных робототехнических систем различного масштаба и назначения с точки зрения обобщения основных тенденций в области проектирования роботов и требований, предъявляемых к их аппаратному и программному обеспечению.

На основе анализа широкого спектра работ [1–5], так и или иначе затрагивающих вопросы классификации в робототехнике, выделено три наиболее крупных класса роботов по области применения: промышленная, сервисная и экстремальная робототехника. Данная часть посвящена обзору и анализу решений в области сервисной робототехники.

Сервисные роботы

Согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 8373-2014 [6], сервисный (обслуживающий) робот – это робот, выполняющий полезную работу для людей и оборудования, за исключением промышленных задач по автоматизации. Таким образом, под этот термин попадает су-

щественное количество роботов, предназначенных для различных областей применений: бытовые роботы, научные роботы, автономные мобильные роботы, включая беспилотные транспортные средства, и многие другие. Тем не менее, несмотря на все многообразие сервисной робототехники, в ней, так же как и в промышленной, есть применяемые большинством разработчиков устоявшиеся инженерно-технические решения, описанию которых посвящен этот раздел.

Ключевой технологией в этой области робототехники на сегодня является Robot Operating System (ROS) [7–9]. ROS – это набор программных средств, исполняемых на базе операционной системы Linux, который предназначен для быстрого создания систем управления роботов.

В основе идеи ROS лежит модульный принцип создания программного обеспечения для робота. Каждый законченный алгоритм, составляющий закон управления, выполняется как отдельный процесс (Node в терминах ROS), который может обмениваться данными с другими процессами как циклически – через специальную систему подписок, так и по запросу – через создание сервиса [7] (рис. 1). Таким образом, созданный в одном проекте блок обработки камеры может быть использован без изменений для других роботов, достаточно лишь подписать остальные ROS Node на соответствующие циклически передаваемые данные (Topic в терминах ROS), содержащие целиком изображение или выделенные на его основе метаданные. Также, при помощи ROS можно абстрагировать, например, модуль планирования пути на местности от конкретных сенсоров, предоставляющих информацию о положении робота и препятствий, передав необходимые данные при помощи ROS Topic от соответствующих модулей или вообще подставив вместо показаний реального датчика данные из среды моделирования. По сути, реализация информационного обмена между приложениями и является ключевой функцией ROS.

Рис. 1. Пример структуры системы управления мобильного сервисного робота на базе ROS.

Помимо системы информационного обмена, в состав ROS входят подсистема 3D-визуализации, подсистема ведения журналов данных и событий, система визуализации графиков, средства для автоматизированной сборки, отладки и запуска приложений, входящих в состав системы управления роботом. Будучи созданным специально для сервисной робототехники [7], на сегодняшний день ROS применяется и в промышленных роботах. Для этих целей существует основанный на ROS проект ROS Industrial [10–12], который поддерживается консорциумом ведущих производителей в области промышленной автоматизации, таких как *Siemens, Bosch, ABB, Yaskawa, Comau* и др.

Бытовые сервисные роботы

Ярким примером бытового робота, основанного на ROS, является Willow Garage PR2 (рис. 2) [13]. Фактически система ROS впервые создавалась именно для него, а уже в последующем получила всемирное распространение.

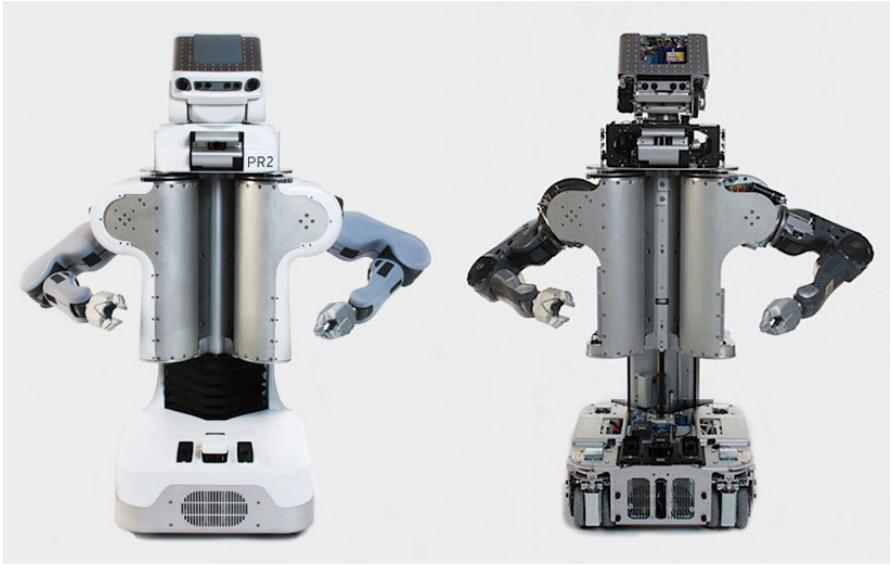


Рис. 2. Бытовой робот Willow Garage PR2.

Робот PR2 построен на модульном принципе, как механически, так и электрически, и представляет собой мобильную платформу, на которой установлены сменные модульные манипуляторы и опорно-поворотное устройство с сенсорами (рис. 3) [14].

Исполнительный уровень системы управления роботом реализован при помощи специализированных плат управления двигателями, построенных на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [15]. Каждая такая плата обеспечивает замкнутый контур управления одним двигателем при помощи пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов, работающих с частотой 100 кГц. Платы, предназначенные для управления двигателями схватов, также отвечают за обработку тактильных датчиков, установленных на схватах. Подключение плат управления двигателями к тактическому уровню осуществляется по интерфейсу EtherCAT.

Структурная схема системы управления робота PR2 представлена на рис. 4.

Для реализации тактического и стратегического уровней используются два встраиваемых компьютера, каждый из которых построен на базе двух процессоров Intel Quad Core Xeon и оснащен 24 Гб оперативной памяти. Важно отметить, что данные компьютеры

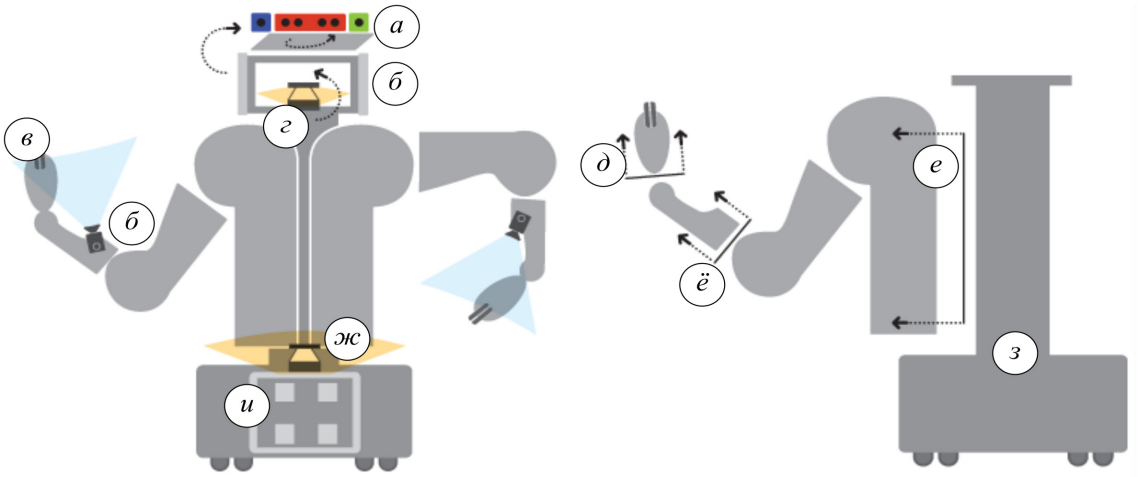


Рис. 3. Основные модули робота Willow Garage PR2: а) наклонно-поворотные камеры головы; б) боковая платформа для крепления дополнительных сенсоров; в) съемные датчики усилий на пальцах; г) наклонная платформа с лазерным дальномером; д) съёмные захватные устройства; е) съемные манипуляторы рук; ё) съемные манипуляторы предплечий; ж) лазерный дальномер; з) мобильная платформа; и) вычислительный модуль на базе двух компьютеров.

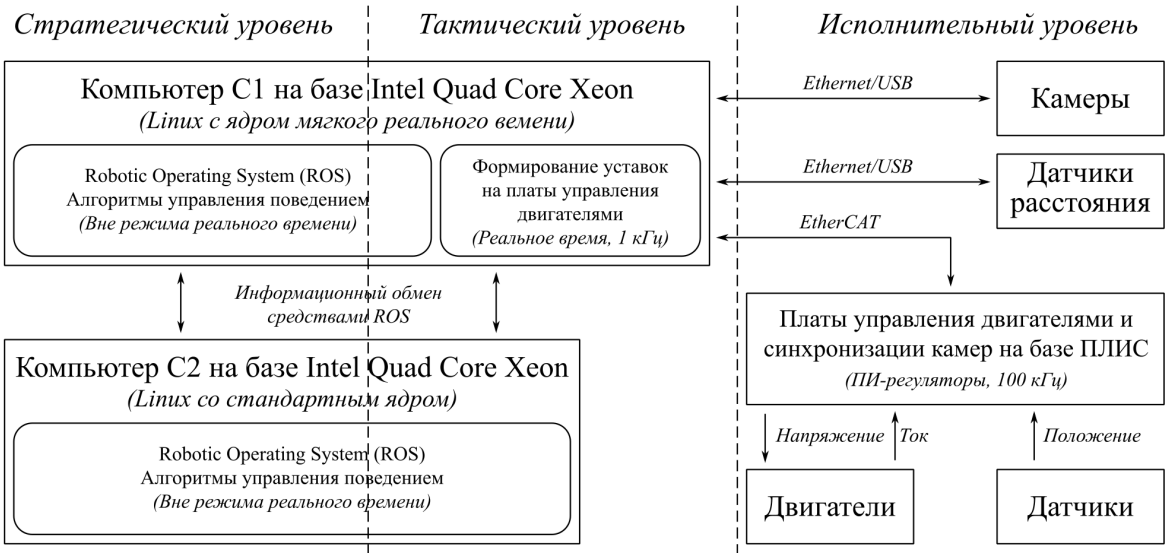


Рис. 4. Структурная схема системы управления робота Willow Garage PR2.

не являются взаимозаменяемыми и не служат для резервирования друг друга в случае аппаратных сбоев. Компьютер С1 (рис. 4) работает под управлением операционной системы Linux с патчем ядра, обеспечивающим работу в режиме мягкого реального времени [15]. На нем реализуется тактический уровень системы управления, производится формирование установок на платы управления двигателями и осуществляется информационный обмен по шине EtherCAT с частотой 1 кГц. Также он обеспечивает загрузку операционной системы на компьютер С2 и коммуникацию между всем компонентами робота. Компьютер С2 работает под управлением операционной системы Linux и служит для выполнения вспомогательных задач, в качестве дополнительных вычислительных

ресурсов для компьютера С1. Связь между программным обеспечением на компьютерах С1 и С2 осуществляется при помощи средств информационного обмена ROS. Для реализации алгоритмов управления стратегического уровня может использоваться любой из компьютеров С1, С2 или сразу оба, в то время как на тактическом уровне компьютер С2 используется только в качестве вспомогательного вычислителя для задач, не требующих реального времени. Подключение камер и датчиков расстояния осуществляется к компьютеру С1 по интерфейсам USB или Ethernet.

Мобильные сервисные роботы

Если оценивать общее количество проектов, то, наверное, одной из самых крупных категорий сервисных роботов являются мобильные платформы для всевозможных непромышленных применений (рис. 5): роботы для работы в медицинских учреждениях [16–18], беспилотные автомобили [19–24], научные и учебные роботы различного размера [25–33] и др. Ввиду своей многочисленности, для данной группы роботов характерно большое разнообразие применяемых аппаратно-программных средств. В то же время даже среди них можно выделить основные тенденции.

а) *б)* *в)*

Рис. 5. Сервисные мобильные роботы различного типа: а) медицинский робот Pathfinder; б) беспилотный автомобиль Spirit of Berlin; в) научный робот KUKA youBot.

Так же, как и в промышленной, в мобильной сервисной робототехнике разработчики, в основном, предлагают использовать многоуровневые иерархические системы управления со структурой, аналогичной представленной на рис. 4, и явно выраженным исполнительным уровнем. В отдельных случаях встречаются решения, где все уровни управления реализованы на базе одного микроконтроллера [26, 29, 32], однако они характерны либо для относительно старых работ, либо в тех случаях, когда разработчики пытались достигнуть минимальной стоимости робота, преднамеренно отказываясь от возможности его дальнейшего масштабирования. В качестве платформы для реализации исполнительного уровня в мобильных сервисных роботах применяется весь набор существующих аппаратных средств – от промышленных систем управления на базе ПЛК и промышленных компьютеров [18] до специализированных плат на основе микроконтроллеров [20, 25, 33]. Среди учебных и экспериментальных роботов можно отметить популярность платформы Arduino как средства управления исполнительными устройствами [28, 29, 31].

Интерфейсы информационного обмена между исполнительным и тактическим уровнем в мобильных сервисных роботах можно разделить глобально на две большие группы: промышленные полевые шины (Ethernet POWERLINK, EtherCAT, CAN и т. д.) и меж-

платные интерфейсы связи (UART, I2C, SPI и т. д.). Первые чаще встречаются в роботах, предполагающих дальнейшее развитие в качестве коммерческого продукта [18, 19, 22], а вторые – в учебных и научно-исследовательских роботах [31, 33].

Наиболее общей чертой, присущей подавляющему большинству мобильных сервисных роботов, является использование ROS в качестве программной платформы. В некоторых случаях вместо ROS применяют программный пакет OROCOS [34–36], который также является инструментом создания модульного программного обеспечения, однако он имеет дополнительный функционал для поддержки работы в режиме реального времени. OROCOS появился в декабре 2000 г. и был популярен до появления ROS. На сегодняшний день ROS развивается и применяется значительно более активно, чем OROCOS, однако существуют работы, посвященные успешной интеграции обеих систем в рамках одного робота [16, 37, 38].

В качестве аппаратной платформы для запуска программного обеспечения в мобильных сервисных роботах используются встраиваемые компьютеры. Для малоразмерных роботов наибольшей популярностью пользуется Rasberry Pi различных модификаций [39]. В более крупных роботах, например, беспилотном транспорте [19, 20, 22], используются встраиваемые и промышленные компьютеры, а также серверы, преимущественно с архитектурой x86. В отдельных случаях для повышения производительности в рамках одного робота может использоваться несколько компьютеров [19, 22], аналогично тому, как это реализовано в роботе Willow Garage PR2 [15]. Наиболее сложные датчики, такие как видеокамеры и лазерные дальномеры, в большинстве случаев подключаются непосредственно к компьютеру тактического уровня, аналогично роботу PR2.

Стратегический уровень системы управления мобильных сервисных роботов реализуется на тех же вычислительных мощностях, что и тактический, или выносится на удаленный компьютер, преимущественно с x86-архитектурой [33, 40].

Сервисные роботы на элементной базе для любительских радиомоделей

Еще одной обособленной категорией с точки зрения аппаратного обеспечения являются сервисные роботы, построенные на элементной базе для любительских радиомоделей. К этой группе относятся практически все мультикоптеры, однако ими она не ограничивается. Высокие технические характеристики, малый вес и низкая стоимость современных компонентов для радиоуправляемых моделей сделали возможным изготовление на их основе автономных роботов подводного [41], надводного [42], наземного [43] и воздушного [44] базирования, а также роботизированных систем управления направленными антеннами [45] (рис. 6).

Роботы, относящиеся к данной категории, имеют характерные только для нее аппаратно-программное обеспечение и интерфейсы информационного обмена, которые будут рассмотрены ниже на примере одной из самых распространенных среди исследователей открытых платформ для создания беспилотных аппаратов различного типа базирования ArduPilot [46, 47]. Структурная схема системы управления роботом, построенным на базе ArduPilot, представлена на рис. 7.

В элементной базе любительских радиоуправляемых моделей присутствуют два основных вида исполнительных устройств: ведущие двигатели и управляемые по положению сервомашинки. Первые, как правило, служат для перемещения робота в простран-

Рис. 6. Сервисные роботы, построенные на элементной базе для любительских радиомоделей.

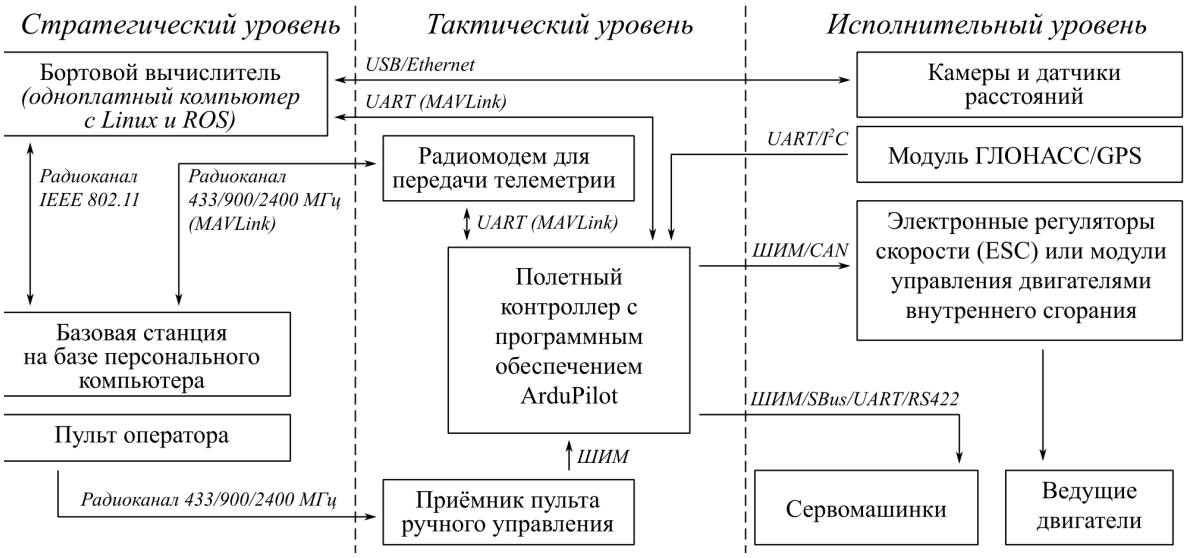


Рис. 7. Обобщенная структурная схема системы управления робота на базе ArduPilot.

стве, вращая колеса, гусеницы, воздушные, гребные винты или турбины, и представляют из себя электрический двигатель или двигатель внутреннего сгорания. Вторые используются для перемещения отдельных элементов робота друг относительно друга: поворота закрылков, колес, смещения центра тяжести, реализации подвесов для камеры или простейших манипуляторов.

В качестве ведущих двигателей на сегодняшний день наибольшей популярностью пользуются бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ). Мощность современных БДПТ для любительских радиомоделей варьируется от единиц ватт до нескольких киловатт. Для управления такими двигателями используются электронные регуляторы скорости (ESC). Они осуществляют бездатчиковое управление и могут обеспечить

устойчивое вращение только на высоких скоростях, что приводит к определенным особенностям в поведении роботов, построенных на данной элементной базе. Некоторые из ESC могут управлять коллекторными двигателями постоянного тока (ДПТ). В качестве интерфейса управления ESC в подавляющем большинстве случаев используются широтно-импульсно- модулированные (ШИМ) дискретные сигналы, реже CAN. Для управления двигателями внутреннего сгорания, предназначенными для радиомоделей, существуют специализированные модули, так же, как и ESC, управляемые при помощи ШИМ [46].

Радиомодельные сервомашинки представляют собой законченные устройства, включающие в себя двигатель, датчик, редуктор и систему управления, обеспечивающую перемещения оси сервомашинки на угол, задаваемый входной ШИМ. В некоторых сервомашинках вместо ШИМ используются цифровые каналы формирования установки: UART, RS422 и SBus [46]. В большинстве радиолюбительских сервомашинок в качестве датчика применяется потенциометр. Система управления таких сервомашинок, как правило, имеет единственный контур управления (по положению), реализованный при помощи пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора.

Центральным элементом системы управления (рис. 7) является полетный контроллер. Данное название является устоявшимся и используется даже применительно к наземным и водным роботам [46]. Сейчас основным полетным контроллером для ArduPilot является Pixhawk [48] и его модификации, обладающие близкой элементной базой. Современные версии этого контроллера построены на 32 битном процессоре ARM Cortex-M4. Непосредственно на плате PixHawk установлена инерциальная навигационная система, включающая в себя барометр, магнитометры, гироскопы и акселерометры. Для подключения дополнительного оборудования он оснащен интерфейсами 5 UART, 1 I2C, 1 SPI и 2 CAN [46].

В качестве внешних информационно-измерительных устройств к полетному контроллеру, как правило, подключается модуль ГЛОНАСС/GPS и датчики расстояния, используемые для предотвращения столкновений. При полетах в помещениях вместо спутниковой навигации может быть использована локальная навигация по камере [48], радио- или ультразвуковым маякам [49]. Также к полетному контроллеру (рис. 7) могут быть подключены удаленный пульт оператора (ручного управления) и радиомодем для передачи телеметрии.

В иерархической модели управления [50] полетный контроллер решает задачи тактического уровня. Он обеспечивает требуемое положение и ориентацию мобильного робота в пространстве, управляя отдельными исполнительными устройствами, а также его перемещение к заданной точке. Для решения задач стратегического уровня в рассматриваемой категории роботов используют одноплатные компьютеры с операционной системой Linux и пакетом ROS, которые соединяются с полетным контроллером по протоколу MAVLink [48, 51, 52]. В мультиагентных системах канал MAVLink, как правило, ретранслируется на базовую станцию на базе персонального компьютера, где происходит дополнительная обработка данных и выдача управляющих команд для скоординированного управления всеми роботами в составе группы [53, 54].

Помимо ArduPilot, на сегодняшних день существует несколько аналогичных платформ [55], например, открытая Pixhawk PX4 и проприетарная DJI Matrice. Все они имеют схожую архитектуру. Ее главным недостатком является недостаточная масштаби-

руемость. Частично для того, чтобы обойти эту проблему, авторы таких проектов, как ArduPilot, используют в своем программном обеспечении отдельный слой абстракции от конкретного аппаратного обеспечения полетного контроллера. Однако даже с учетом данного слоя перенос программного обеспечения на другую микропроцессорную архитектуру или попытка повышения отказоустойчивости за счет внедрения дополнительного резервирования компонент потребует существенных трудозатрат. По сути, данные архитектуры оптимизированы для создания малоразмерных беспилотных аппаратов на элементной базе любительских радиомоделей и плохо подходят для создания роботов других типов.

Модульные реконфигурируемые мобильные роботы

Последняя категория сервисных роботов, которая заслуживает отдельного рассмотрения, это модульные реконфигурируемые роботы. На сегодняшний день такие роботы используются, в первую очередь, в научно-исследовательских организациях, где они являются объектом исследования, и мало применяются в других отраслях экономики. В то же время с точки зрения своего аппаратно-программного обеспечения они обладают уникальными характеристиками масштабирования и унификации используемой элементной базы. Также, среди всех рассмотренных ранее роботов, они предъявляют одни из самых жестких требований к габаритным размерам системы управления.

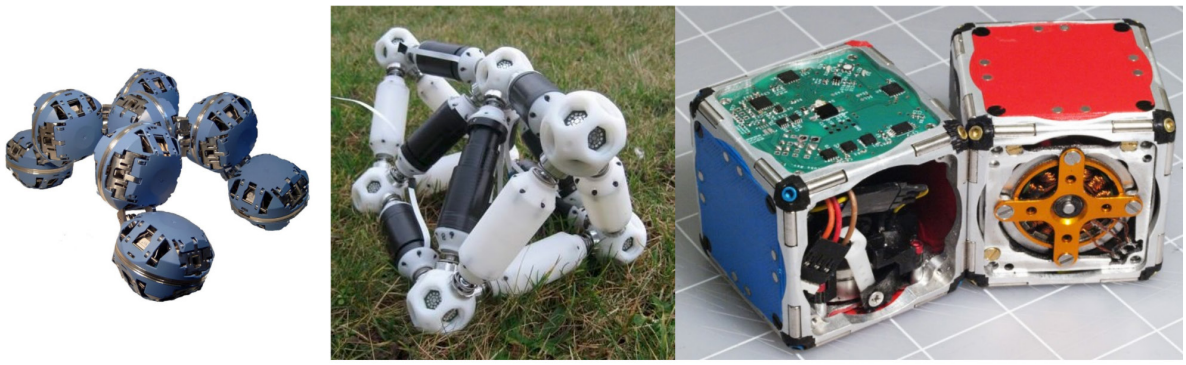
Модульные реконфигурируемые роботы (МРР) – это роботы, состоящие из большого количества унифицированных модулей, которые могут реорганизовываться в процессе функционирования в зависимости от решаемой задачи [56]. Под «реконфигурацией» и «реорганизацией» модулей для данной категории роботов подразумевается порядок их соединения между собой с целью изменения кинематической схемы. В отличие от других категорий сервисных роботов, МРР способны к масштабированию непосредственно в процессе работы, без отключения энергопитания робота, а повышенная отказоустойчивость в них достигается за счет того, что любой из модулей может потенциально заменить ранее вышедший из строя. По сути, речь идет о массовом многократном резервировании, в то время как даже в экстремальной робототехнике кратность резерва аппаратного обеспечения редко превышает значение 3.

На сегодняшний день различают три основных типа МРР с точки зрения конструкции модулей и способа их объединения: пространственно-решетчатые, цепные и мобильные [56, 57].

В пространственно-решетчатых МРР (рис. 8) модули располагаются в виде регулярного трехмерного шаблона, такого как, например, кубическая кристаллическая решетка. Эти системы используют строгую закономерность размещения модулей для облегчения вычислительных задач в ходе реконфигурации. К роботам данного класса относят ATRON [58], Odin [59], M-blocks [60].

Цепные МРР [56] характеризуются тем, что их модули объединяются в цепочки, из которых в дальнейшем строятся деревья или замкнутые контуры (рис. 9). К цепным роботам относятся PolyBot [61], MICROTUB [62], АРАКС [63, 64].

Также существуют гибридные МРР, такие как M-TRAN [65] (рис. 9 г), которые совмещают все принципы построения нескольких типов МРР, например, цепных пространственно-решетчатых.



а) *б)* *в)*

Рис. 8. Пространственно-решетчатые мобильные реконфигурируемые роботы: а) ATRON; б) Odin; в) M Blocks.

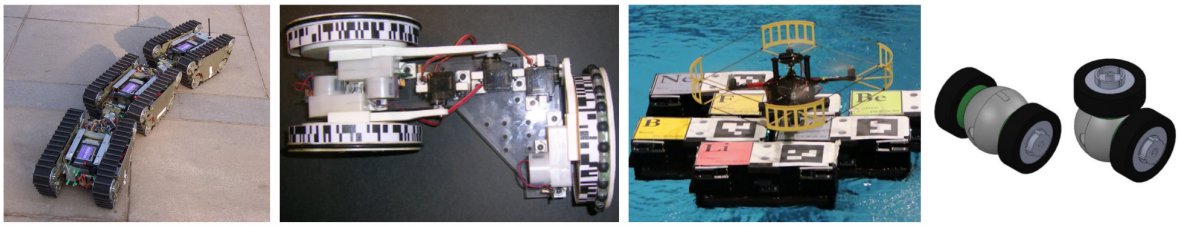
Отличительной чертой мобильных МРР является возможность каждого отдельного модуля самостоятельно перемещаться в пространстве, объединяясь в различные структуры для выполнения конкретной задачи, сохраняя при этом возможность функционирования групп отдельных модулей в качестве роя [56]. К таким роботам относятся JL-I [66], M3Express [67], TEMP [68], MAPC [69] (рис. 10).

Также МРР принято разделять на гомогенные и гетерогенные [62, 70]. Гомогенными являются роботы, состоящие из полностью унифицированных модулей, такие как PolyBot [61], АРАКС [63], M-TRAN [65]. К гетерогенным МРР относят роботы, составленные из модулей разных типов, каждый из которых имеет определенную специализацию: блок управления, захватное устройство, источник питания и т. д. [62, 71]. На сегодняшний день гомогенные роботы, в первую очередь, служат объектом научных исследований, в то время как гетерогенные являются попыткой сделать архитектуру МРР более гибкой и оптимальной с точки зрения решения практических задач в сервисной и промышленной робототехнике [56, 57, 71, 72].

а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 9. Цепные и гибридные мобильные реконфигурируемые роботы: а) PolyBot; б) MICROTUB; в) АРАКС; г) M-TRAN.

Для большинства МРР важнейшими характеристиками являются массогабаритные размеры модуля. Особенно критичны к этому параметру гомогенные МРР, так как их модули унифицированы и не обладают специализацией, а значит, каждый модуль должен содержать и привод, и источник питания, и вычислительное устройство. Вследствие этого во многих гомогенных МРР все уровни системы управления отдельного модуля



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 10. Мобильные модульные реконфигурируемые роботы:
а) JL-I; б) M3Express; в) TEMP; г) MAPC.

реализуются на базе одного вычислительного устройства, которое, как правило, представляет из себя микроконтроллер или сигнальный процессор [59, 61, 63, 67]. Гетерогенные роботы, а также крупные гомогенные роботы в качестве вычислительных устройств используют одноплатные компьютеры, на которых, как и в сервисных роботах других типов, может применяться ROS [68, 73]. Интересный подход с точки зрения создания программного обеспечения предлагают авторы [74, 75]. Он подразумевает использование для связи между отдельными компонентами библиотеки zmq_robot [76] и позволяет, с одной стороны, добиться модульности программных решений, схожей с ROS, а, с другой стороны, не требует операционной системы Linux, что позволяет использовать его на микроконтроллерах [75].

С точки зрения реализации алгоритмов управления MPP, на сегодняшний день существуют два основных подхода: централизованный и децентрализованный [77]. В централизованных системах предполагается наличие ведущего модуля, который осуществляет принятие решений и координирует все остальные модули в рамках общей задачи. Децентрализованный подход, наоборот, предполагает распределение задач между однотипными системами управления различных модулей. Системы с централизованной моделью управления проще в реализации и потенциально более эффективны с точки зрения достижения конечной цели, в то время как децентрализованные системы более отказоустойчивы и менее требовательны к вычислительным ресурсам, за счет распределения задач между различными модулями [78].

С точки зрения информационного обмена, централизованное управление, как правило, реализуется использованием глобальных схем связи между модулями, а децентрализованное – с использованием локальных. Однако из этого правила существуют исключения, например, [79]. В глобальных схемах связи применяются сети на базе CAN [61, 65] или Ethernet [75, 80], а также беспроводная связь IEEE802.15.1 [81, 82], IEEE802.15.4 [83, 84] и др. Беспроводные типы связи также используются для передачи целевой задачи роботу в целом, удаленного управления модулями и мониторинга их состояния. Глобальные схемы организации связи предполагают наличие уникального идентификатора у каждого модуля, по которому любой другой модуль может к нему обратиться.

В случае локальных схем межмодульной связи чаще всего используются пары приемник–передатчик, работающие по популярным протоколам RS-232, RS485, I2C, SPI. При таком подходе не требуется глобальная адресация модулей, однако стоит заметить, что и скорость обмена данными в системах с локальной связью существенно ниже, например, в модулях ATRON она не превышает 9600 б/с [58].

Существенным недостатком глобальных систем связи является невозможность автоматического определения взаимного расположения модулей робота. Для преодоления данного недостатка многие исследователи используют гибридные схемы связи, совмещающие в себе глобальный и локальный информационный обмен [78].

Интеллектуальное и групповое управление в сервисной робототехнике

С точки зрения внедрения технологий интеллектуального и группового управления, сервисные роботы являются наиболее представительным классом современных роботов. Это связано сразу с несколькими причинами:

1. К сервисным относят научно-исследовательских роботов, на которых отрабатываются передовые алгоритмы управления.
2. В отличие от промышленной робототехники, сервисные роботы часто работают в недетерминированной среде в условиях неопределенности.
3. Требования к надежности и повторяемости сервисных роботов в общем случае существенно ниже, чем у других категорий роботов, что позволяет оперативно внедрять в них новейшие решения, еще не прошедшие длительную апробацию.

Также стоит отметить, что подавляющее большинство рассмотренных работ, посвященных алгоритмам интеллектуального управления сервисными роботами, описывают решение траекторных и поведенческих задач, относящихся к стратегическому и тактическому уровням, в то время как на исполнительном уровне традиционно применяются линейные регуляторы. Основной платформой для реализации алгоритмов интеллектуального управления в сервисной робототехнике является ROS, для которого уже на данный момент существует обширная библиотека готовых решений [85]. Также для ускорения специфических вычислений, например, при использовании нейронных сетей, применяются специализированные ускорители, часто основанные на видеопроцессорах для графических карт [86–88].

На сервисных роботах отработаны как централизованные, так и децентрализованные методы группового управления [89–93]. Существуют готовые решения с открытым кодом для их реализации на базе наиболее крупных программных платформ, таких как ROS и ArduPilot [85, 94]. В качестве средства связи между роботами, входящими в состав единой мультиагентной системы, как правило, используются беспроводные сети стандартов IEEE 802.11, IEEE802.15.1 и IEEE802.15.4.

Основные тенденции в области создания систем управления сервисными роботами

Резюмируя проведенный анализ основных тенденций в области создания систем управления сервисных роботов, можно сделать следующие выводы:

а) С точки зрения масштабирования, ключевой технологией в сервисной робототехнике является ROS. В качестве несомненных достоинств этой платформы можно выделить модульную программную архитектуру, унифицированные интерфейсы информационного обмена между компонентами, а также большее количество готовых модулей, созданных для различных областей прикладного применения сервисных роботов разработчиками со всего мира. Также для ROS существуют пакеты, предназначенные для ре-

шения задач группового управления как централизованными, так и децентрализованными методами. В то же время важно отметить, что ROS не обеспечивает работу в режиме реального времени, а также и то, что необходимым условием внедрения ROS является использование на вычислительном устройстве полноценной операционной системы Linux. Это существенным образом ограничивает применение ROS на исполнительном уровне систем управления сервисных роботов и, в конечном счете, приводит к отсутствию какой-либо унификации в этой области. Де факто для управления исполнительными устройствами в сервисной робототехнике используется весь спектр возможных аппаратных средств и методов организации информационного обмена, от макетных плат на маломощных микроконтроллерах, подключаемых по интерфейсам UART или SPI, до промышленных сервоприводов и систем ввода/вывода, подключаемых по полевым шинам реального времени.

б) Сервисная робототехника является на сегодняшний день основным плацдармом для отработки интеллектуальных алгоритмов управления для тактического и стратегического уровня. В этой области ежегодно публикуется большое количество работ. Основной платформой для интеграции этих алгоритмов в систему управления робота является ROS, в дополнение к которому в ряде случаев используются специализированные фреймворки и аппаратные ускорители, например, на базе видеопроцессоров для графических карт.

в) Обеспечению отказоустойчивости в сервисной робототехнике уделяется еще меньше внимания, чем в промышленной. В том числе, в отличие от промышленных, в сервисных роботах применяют отладочные платы и комплектующие, позиционируемые производителями для использования в любительской технике, которые имеют короткие назначенные сроки службы и часто для удешевления изготавливаются с использованием технологий пайки и сборки, не гарантирующих надежности при длительном функционировании. В то же время следует отметить, что в ряде работ, например, посвященных МРР, предлагаются методы преодоления отказов в роботе, основанные не на увеличении надежности элементной базы, а на замещении функций неисправного модуля за счет изменения поведенческих алгоритмов оставшихся модулей.

г) Для ряда областей применения сервисной робототехники, таких как, например, беспилотные летательные аппараты и гомогенные МРР, снижение массогабаритных характеристик системы управления является ключевым требованием. Для таких применений создаются сервисные роботы, чьи системы управления построены на базе одного вычислительного устройства, реализующего все уровни управления. В то же время в остальной сервисной робототехнике исполнительный уровень обычно реализуется на отдельном аппаратном обеспечении аналогично тому, как это делается в промышленных роботах, а тактический и стратегический уровни – на базе одного или нескольких компьютеров под управлением Linux и ROS.

Литература / References:

1. Донченко А.А., Хрипунов С.В., Чиров Д.С. [и др.] Робототехнические средства, комплексы и системы военного назначения. Основные положения. Классификация. Методические рекомендации. М.: ФГБУ «ГНИИЦ РТ» МО РФ, 2015. 34 с.

[Donchenko A.A., Hripunov S.V., Chirov D.S. [et al.] Robotic equipment, complexes and military systems. The main provisions. Classification. Guidelines. Moscow: “GNIICR” RF MO (Main Research and Testing Center for Robotics of the Ministry of Defense of the Russian Federation), 2014. 34 p. (in Russ.).]

2. Юревич Е.И. Основы робототехники, 4 изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 304 с.

[Yurevich E.I. Basics of Robotics, 4th ed. SPb: BHV-Peterburg Publ., 2018. 304 p. (in Russ.).]

3. Zielinska T.T. History of service robots and new trends. In: Novel Design and Applications of Robotics Technologies. IGI Global, 2019:158-187. https://doi.org/10.4018/978-1-5225-5276-5.ch006

4. Kumar V., Bekey G., Zheng Y. Industrial, personal and service robots. In: Assessment of International Research and Development in Robotics. Ed. G. Bekey. World Technology Evaluation Center, Lancaster, 2006; pp. 41-48. http://www.wtec.org/robotics/report/05-Industrial.pdf

5. Лопота В.А., Юревич Е.И. Экстремальная робототехника и мехатроника. Принципы и перспективы развития. *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2007;4:37-42.

[Lopota V.A., Yurevich E.I. Extreme robotics and mechatronics. Principles and perspectives of development. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2007;4:37-42 (in Russ.).]

6. ГОСТ Р ИСО 8373-2014. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.

[GOST R ISO 8373-2012. Robots and robotic devices. Vocabulary. Moscow: Stahdartinform Publ., 2015. 16 p. (in Russ.)]

7. Quigley M., Conley K., Gerkey B.P., Faust J., Foote T., Leibs J., Wheeler, R., Ng A.Y. ROS: an open-source Robot Operating System. In: ICRA workshop on open source software. 2009;3(5): 6 p.

8. Garber L. Robot OS: A new day for robot design. *Computer.* 2013;46(12):16-20. http://dx.doi.org/10.1109/MC.2013.434

9. Koubâa A. (ed.). Robot Operating System (ROS). Verlag: Springer International Publishing, 2017. eBook ISBN 978-3-319-54927-9. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54927-9

10. Zhang L., Merrifield R., Deguet A., Yang G-Z. Powering the world's robots-10 years of ROS. *Sci. Robotics.* 2017;2(11):eaar1868. http://dx.doi.org/10.1126/scirobotics.aar1868

11. Bouchier P. Embedded ROS [ROS topics]. *IEEE Robotics & Automation Magazine.* 2013;20(2):17-19. http://dx.doi.org/10.1109/MRA.2013.2255491

12. Romanov A., Romanov M., Slepynina E., Kholopov V. Analysis of ROS performance in terms of intelligent monitoring of discrete machinery manufacturing control systems. In: Proc. 15th Student Conference on Research and Development (SCOReD). IEEE, 2017; pp. 13-17. http://dx.doi.org/10.1109/SCORED.2017.8305429

13. Bohren J., Rusu R.B., Marder-Eppstein E., Pantofaru C. Towards autonomous robotic butlers: Lessons learned with the PR2. In: Proc. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2011; pp. 5568-5575. https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980058

14. Willow Garage, PR2 Hardware Specs – [Electronic resource], URL:http://www.willowgarage.com/pages/pr2/specs

15. Willow Garage, PR2 User Manual, 2012 – [Electronic resource], URL:https://www.clearpathrobotics.com/wp-content/uploads/2014/08/pr2_manual_r321.pdf

16. Jakubiak J., Drwięga M., Stańczyk B. Control and perception system for ReMeDi robot mobile platform. In: Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). 2015 20th International Conference. IEEE, 2015; pp. 750-755. https://doi.org/10.1109/MMAR.2015.7283969

17. Arent K., Jakubiak J., Drwięga M., Cholewiński M. Control of mobile robot for remote medical examination: Design concepts and users' feedback from experimental studies. In: Proc. of the 9th International Conference on Human System Interactions (HIS 2016). IEEE, 2016; pp. 76-82. http://dx.doi.org/10.1109/HSI.2016.7529612

18. Bačík J., Durovsky F., Biros M., Kyslan K. Pathfinder–development of automated guided vehicle for hospital logistics. *IEEE Access.* 2017;5(1):26892-26900. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2767899

19. Rojo J., Rojas R., Gunnarsson K., Simon M., Wiesel F., Ruf F., Wolter L., Zilly F., Santrac N., Ganjineh T., Sarkohi A., Ulbrich F., Latotzky D., Jankovic B., Hohl G., Wisspeintner T., May S., Pervoelz K., Nowak W., Maurelli F., Droeschel D. Spirit of Berlin: An Autonomous car forthe DARPA urban challenge—Hardware and software architecture. Free Univ. Berlin. Berlin, Germany, Tech. Rep., June 2007.

20. Gomez D., Marin P., Hussein A., de la Escalera A. ROS-based architecture for autonomous intelligent campus automobile (iCab). In: *UNED Plasencia Revista de Investigacion Universitaria.* Publisher: Agbatanero, 2016;12:257-272.

21. Shimchik I., Sagitov A., Afanasyev I., Matsuno F., Magid E. Golf cart prototype development and navigation simulation using ROS and Gazebo. MATEC Web of Conferences. 2016. V. 75. Article Number 09005. https://doi.org/10.1051/matecconf/20167509005

22. Jo K., Kim J., Kim D., Jang C. Development of autonomous car - Part II: A case study on the implementation of an autonomous driving system based on distributed architecture. *IEEE Trans. on Industrial Electronics.* 2015;62(8):5119-5132. http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2015.2410258

23. Ferreira T., Garcia O., Vaqueiro J. Software Architecture for an Autonomous Car Simulation Using ROS, MORSE & A Qt Based Software for Control and Monitoring. In: XII Simpósio Brasileiro de automação Inteligente, 2015. 7 p.

24. Fernandes L.C., Souza J., Perrin G., Shinzato P.Y. CaRINA intelligent robotic car: architectural design and applications. *J. Systems Architecture.* 2014;60(4):372-392. http://dx.doi.org/10.1016/j.sysarc.2013.12.003

25. Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Гарцеев И.Б., Трипольский П.Э., Александрова Р.И., Евстигнеев Д.В., Антипов О.А., Епишин С.В. Автономный мобильный мини-робот. *Известия Южного федерального*

университета. Технические науки. 2006;58(3):17-23.

[Lokhin V.M. [et al.] Autonomous mobile mini-robot. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences.* 2006;58(3):17-23. (in Russ.)]

26. Doroftei I., Grosu V., Spinu V. Omnidirectional mobile robot-design and implementation. In book: Bioinspiration and Robotics: Walking and Climbing Robots. Ed. M.K. Habib. Vienna, Austria: I-Tech, 2007;511-528. https://doi.org/10.5772/5518

27. Bischoff R., Huggenberger U., Prassler E. KUKA youBot-a mobile manipulator for research and education. In: Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China, 2011:1-4. http://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980575

28. Araújo A., Portugal D., Couceiro M.S., Rocha R.P. Integrating Arduino-based educational mobile robots in ROS. *Journal of Intelligent & Robotic Systems.* 2015;77(2):281-298. https://doi.org/10.1007/s10846-013-0007-4

29. López-Rodríguez F.M., Cuesta F. Andruino-A1: Low-cost educational mobile robot based on Android and Arduino. *Journal of Intelligent & Robotic Systems.* 2016;81(1):63-76. http://dx.doi.org/10.1007/s10846-015-0227-x

30. Jaskot K., Łakota T. Experimental mobile robot—Hardware. Innovative Simulation Systems. Springer, Cham, 2016;277-289.

31. Морозов А.А., Русаков Д.А., Казачек Н.А. Программно-аппаратный комплекс на базе мобильных роботов с изменяемой геометрией шасси // Материалы VI Междунар. научно-техн. конф. молодых ученых, 2016. Омск: Изд-во Омский гос. технический ун-т, 2016. С. 146–150.

[Morozov A.A., Rusakov D.A., Kazachek N.A. Hardware-software complex based on mobile robots with variable chassis geometry. Materials of the VI Int. Scientific and Technical Conf. of Young Scientists, 2016. Omsk: Publishing house of the Omsk State Technical University, 2016;146-150 (in Russ.).]

32. Mondada F., Bonani M., Riedo E., Briod M. Bringing robotics to formal education: The thymio open-source hardware robot. *IEEE Robotics & Automation Magazine.* 2017;24(1): 77-85. https://doi.org/10.1109/MRA.2016.2636372

33. Alberri M., Hegazy S., Badra M., Nasr M. Generic ROS-based Architecture for Heterogeneous Multi-Autonomous Systems Development. In: 2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES). IEEE, 2018. 6 p. https://doi.org/10.1109/ICVES.2018.8519589

34. Bruyninckx H. Open robot control software: the OROCOS project. In: Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2001;3:2523-2528. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.933002

35. Schlegel C. A component approach for robotics software: Communication patterns in the OROCOS context. In: Autonome Mobile Systeme 2003. Dillmann R., Wörn H., Gockel T. (eds). Berlin, Heidelberg: Springer, 2003; pp. 253-263. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18986-9_26

36. Михайлова У.В., Михайлов Е.А., Сарваров А.С. Программные решения для разработки архитектуры системы управления роботом. *Электротехнические системы и комплексы.* 2013;(21):111-117.

[Mikhailova V.V., Mikhailov E.A., Sarvarov A.S. Software solutions for the development of robot control system architecture. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* = Electrotechnical systems and complexes. 2013;(21):111-117 (in Russ.).]

37. Smits R., Bruyninckx H. Composition of complex robot applications via data flow integration. In: Proceedings 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2011; pp. 5576-5580. http://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979958

38. Buys K., Bellens S., Vanthienen N., Decre W., Klotzbucher M., De Laet T., Smits R., Bruyninckx H., De Schutter J. Haptic coupling with the PR2 as a demo of the OROCOS-ROS-Blender integration. In: IROS PR2 Workshop. San Francisco, California. 2011;25:30.

39. Петин В. Микрокомпьютеры Raspberry Pi: Практическое руководство. СПб.: БХВ-Петербург, 2015. 240 с. ISBN 978-5-9775-3519-9

[Petin V. Microcomputers Raspberry Pi: A Practical Guide. SPb.: BHV-Peterburg Publ., 2015. 240 p. ISBN 978-5-9775-3519-9 (in Russ.).]

40. Манько С.В., Диане С.А., Новосельский А.К. Макетный образец многоагентной робототехнической системы на базе платформы KUKA youBot. Труды Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2015). СПб.: Политехника-сервис, 2015. С. 210–214.

[Manko S.V., Diane S.A., Novoselsky A.K. A prototype of multi-agent robotic system based on KUKA youBot platform. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Extreme Robotics’ (St. Petersburg, 2015). SPb.: Polytechnic service, 2015; pp. 210-214. (in Russ.).]

41. Schillaci G., Schillaci F., Hafner V.V. A Customisable underwater robot. arXiv preprint arXiv:1707.06564. 2017. https://arxiv.org/abs/1707.06564

42. Carlson D.F., Rysgaard S. Adapting open-source drone autopilots for real-time iceberg observations. *MethodsX.* 2018;5:1059-1072. http://dx.doi.org/10.1016/j.mex.2018.09.003

43. Simon G.A., Moore J.M., Clark A.J., McKinley P.K. Evo-ROS: integrating evolution and the robot operating system. In: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. ACM, 2018; pp. 1386-1393. http://dx.doi.org/10.1145/3205651.3208269

44. Ebeid E., Skriver M., Terkildsen K.H., Jensen K. A survey of open-source UAV flight controllers and flight simulators. *Microprocessors and Microsystems.* 2018;61:11-20. http://dx.doi.org/10.1016/j.micpro.2018.05.002

45. Pop S., Luculescu M.C., Cristea L., Zamfira C.S., Boer A.L. Improving communication between unmanned

aerial vehicles and ground control station using antenna tracking systems. In: Auer M., Zutin D. (eds) Online Engineering & Internet of Things. Lecture Notes in Networks and Systems. V. 22. Springer, Cham, 2018; pp. 532-539. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64352-6_49

46. ArduPilot Documentation – [Electronic resource]: URL:http://ardupilot.org/ardupilot/index.html

47. Журавлёв Д.О., Наинг З.Х. Эволюция систем управления беспилотных летательных аппаратов: от появления до наших дней. Достижения и перспективы современной науки. Материалы Междунар. научно-практической конф. Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки», 2017. С. 57-87.

[Zhuravlev D.O., Naing Z.H. The evolution of control systems for unmanned aerial vehicles: from appearance to the present day. In: Achievements and Prospects of Modern Science. Proceed. of the International Scientific and Technical Conference. Neftekamsk: Scientific Publishing Center “Mir nauki”, 2017. P. 57-87 (in Russ.).]

48. Meier L., Tanskanen P., Heng L., Lee G.H. PIXHAWK: A micro aerial vehicle design for autonomous flight using onboard computer vision. *Autonomous Robots.* 2012;33(1-2):21-39. http://dx.doi.org/10.1007/s10514-012-9281-4

49. Li Y., Scanavino M., Capello E., Dabbene F. A novel distributed architecture for UAV indoor navigation. *Transportation Research Procedia.* 2018;35:13-22. http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.003

50. Макаров И.М., Лохин В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. М.: Физматлит, 2001. 576 с.

[Makarov I.M., Lokhin V.M. Intelligent automatic control systems. Moscow: Fizmatlit Publ., 2001. 576 p. (in Russ.).]

51. Abeywardena D., Pounds P., Dissanayake G. Design and development of ReCOPTER: An open source ROS-based multi-rotor platform for research. In: Proceed. Austral. Conf. Robot. Autom. (ACRA). 2015. 10 p. http://hdl.handle.net/10453/117849

52. Meier L. Dynamic Robot Architecture for Robust Realtime Computer Vision: Doctoral Thesis. ETH Zürich, 2017. https://doi.org/10.3929/ethz-a-010874068

53. Koubaa A., Qureshi B. DroneTrack: Cloud-based real-time object tracking using unmanned aerial vehicles over the Internet. *IEEE Access.* 2018;6:13810-13824. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2811762

54. Lamping A.P., Ouwerkerk J.N., Cohen K. Multi-UAV Control and Supervision with ROS. In: Proceed. 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. At Atlanta, GA, Volume: AIAA AVIATION Forum. 2018; p. 4245. https://doi.org/10.2514/6.2018-4245

55. Chen S., F Laefer D., Mangina E. State of technology review of civilian UAVs. *Recent Patents on Engineering*. 2016;10(3):160-174. https://doi.org/10.2174/1872212110666160712230039

56. Seo J., Paik J., Yim M. Modular reconfigurable robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems.* 2019;2:63-88. https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023834

57. Alattas R.J., Patel S., Sobh T. M. Evolutionary modular robotics: Survey and analysis. *Journal of Intelligent & Robotic Systems.* 2019;95(3-4):815-828. https://doi.org/10.1007/s10846-018-0902-9

58. Ostergaard E.H., Kassow K., Beck R., Lund H.H. Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot. *Autonomous Robots.* 2006;21(2):165-183. http://dx.doi.org/10.1007/s10514-006-8546-1

59. Garcia R.F.M., Lyder A., Christensen D.J., Stoy K. Reusable electronics and adaptable communication as implemented in the odin modular robot. In: Proceed. IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2009; pp. 1152-1158. http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152811

60. Romanishin J. W., Gilpin K., Rus D. M-blocks: Momentum-driven, magnetic modular robots. In: Proc. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013; pp. 4288-4295. https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696971

61. Yim M., Duff D.G., Roufas K.D. PolyBot: a modular reconfigurable robot. In: Proceed. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA’00). San Francisco, Calif, USA, 2000. V. 1. P. 514-520. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844106

62. Brunete A., Hernandj M., Gambao E., Torres J.E. A behaviour-based control architecture for heterogeneous modular, multi-configurable, chained micro-robots. Robotics and Autonomous Systems. 2012;60(12):1607-1624. https://doi.org/10.1016/j.robot.2012.09.019

63. Макаров И.М., Лохин В.М. Технологии обработки знаний в задачах управления автономными мехатронно-модульными реконфигурируемыми роботами. *Информационные технологии.* 2010;(S8):1-32.

[Makarov I.M., Lokhin V.M. Knowledge processing technologies for autonomous mechatronic-modular reconfigurable robots control tasks. *Informatsionnye tekhnologii* (Information Technology). 2010;(S8):1-32 (in Russ.).]

64. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Крюченков Е.Н., Кучерский Р.В., Диане С.А. Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения. *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2012; (2):22-32.

[Makarov I.M. [et al.] Multi-agent robotic systems: examples and prospects of application. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control]. 2012;(2):22-32 (in Russ.).]

65. Murata S., Kurokawa H. Self-organizing robots. Volume 77 of Springer tracts in advanced robotics. NY, USA: Springer, 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-4-431-54055-7

66. Guanghua Z., Zhicheng D., Wei W. Realization of a modular reconfigurable robot for rough terrain. In: Procced. of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2006; pp. 289-294. http://dx.doi.org/10.1109/ICMA.2006.257529

67. Wolfe K.C., Moses M., Kutzer M., Chirikjian G.S. M 3 Express: a low-cost independently-mobile reconfigurable modular robot. In: Procced. of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2012; pp. 2704-2710. http://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224971

68. O'Hara I., Paulos J., Davey J., Eckenstein N. Self-assembly of a swarm of autonomous boats into floating structures. In: Proceed. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014; pp. 1234-1240. http://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907011

69. Павлюк Н.А., Крестовников К.Д., Пыхов Д.Э. Мобильная автономная реконфигурируемая система. *Проблемы региональной энергетики.* 2018;1(36):125-135. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.1217296

[Pavlyuk N.A., Krestovnikov K.D., Pykhov D.E. Mobile autonomous reconfigurable system. *Problemy regionalnoi energetiki* = Problems of Regional Energetics. 2018;1(36):125-135 (in Russ.). http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.1217296]

70. Андреев В.П., Ким В.Л., Подураев Ю.В. Сетевые решения в архитектуре гетерогенных модульных мобильных роботов. *Робототехника и техническая кибернетика.* 2016;3:23-29.

[Andreev V.P., Kim V.L., Poduraev Yu.V. Network-based design of heterogeneous modular mobile robotic systems. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* = Robotics and Technical Cybernetics. 2016;3:23-29 (in Russ.).]

71. Андреев В.П., Подураев Ю.В. Функционально-модульный принцип построения гетерогенных мобильных роботов. Труды Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». СПб.: ООО «АП4Принт», 2016. С. 39–49.

[Andreev V.P., Poduraev Yu.V. Functional-modular design of heterogeneous mobile robotic systems. In: Proceed. of the International Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics". Saint-Petersburg: AP4Print Publ., 2016. P. 39-49 (in Russ. / Engl.).]

72. Лопота А.В., Юревич Е.И. Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление.* 2013;1(164):98-103.

[Lopota A.V., Yurevich E.I. Stages and development prospects of robotic systems design modular principle. *Nauchno tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* = St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems. 2013;1(164):98-103 (in Russ.).]

73. Thakker R., Kamat A., Bharambe S., Cheddarwar S.S., Bhurchandi K.M. Rebis-reconfigurable bipedal snake robot. In: 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014; pp. 309-314. https://doi.org/10.1109/iros.2014.6942577

74. Андреев В.П., Ким В.Л., Плетенев П.Ф. Программно-аппаратное решение оперативного реконфигурирования гетерогенных роботов. *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2018;19(6):387-395. http://novtex.ru/mech/eng/doi/mau.19.387-395.html

[Andreev V.P., Kim V.L., Pletenev P.F. Hardware and software solution for rapid reconfiguration of heterogeneous robots. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = Mechatronics, automation, control. 2018;19(6):387-395 (in Russ.). http://novtex.ru/mech/eng/doi/mau.19.387-395.html]

75. Андреев В.П., Плетенев П.Ф. Метод информационного взаимодействия для систем распределенного управления в роботах с модульной архитектурой. *Труды СПИИРАН.* 2018;2(57):134-160. https://doi.org/10.15622/sp.57.6

[Andreev V.P., Pletenev P.F. Method of information interaction for distributed control systems of robots with modular architecture. *Trudy SPIIRAN* = SPIIRAS Proceedings. 2018;2(57):134-160 (in Russ.)]. https://doi.org/10.15622/sp.57.6

76. Kirsanov K. Software architecture of control system for heterogeneous group of mobile robots. *Procedia Engineering.* 2015;100:278-282. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.368

77. Brunete A., Ranganath A., Segovia S., de Frutos J.P., Hernando M., Gambao E. Current trends in reconfigurable modular robots design. *International Journal of Advanced Robotic Systems.* 2017;14(3):1-21. https://doi.org/10.1177/1729881417710457

78. Yim M., White P., Park M., Sastra J. Modular self-reconfigurable robots. In: Encyclopedia of complexity and systems science / eds. R.A. Meyers. New York: Springer, 2009. P. 5618-5631. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_334

79. Zhang Y., Roufas K. D., Yim M. Software architecture for modular self-reconfigurable robots. Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceed. of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2001. V. 4; pp. 2355-2360.

80. Liedke J., Matthias R., Winkler L., Wörn H. The collective self-reconfigurable modular organism (CoSMO). In: 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2013; pp. 1-6. https://doi.org/10.1109/AIM.2013.6584059

81. Moeckel R., Jaquier C., Drapel K., Dittrich E. Exploring adaptive locomotion with YaMoR, a novel autonomous modular robot with Bluetooth interface. *Industrial Robot: An International Journal.* 2006;33(4):285-290. https://doi.org/10.1108/01439910610667908

82. Zykov V., Chan A., Lipson H. Molecubes: An open-source modular robotics kit. In: IROS-2007 Self-Reconfigurable Robotics Workshop. 2007; pp. 3-6.

83. Qiao G., Song G., Zhang J., Sun H., Wang W., Song A. Design of transmote: a modular self-reconfigurable robot with versatile transformation capabilities. In: 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2012; pp. 1331-1336. https://doi.org/10.1109/ROBIO.2012.6491153

84. Davey J., Kwok N., Yim M. Emulating self-reconfigurable robots-design of the SMORES system. In: 2012 IEEE/

RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2012; pp. 4464-4469. https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385845

85. ROS Index: Packages – [Electronic resource]: URL:https://index.ros.org/packages/

86. Buyval A., Afanasyev I., Magid E. Comparative analysis of ROS-based Monocular SLAM methods for indoor navigation. In: 9th International Conference on Machine Vision (ICMV 2016). International Society for Optics and Photonics, 2017. V. 10341. P. 103411K. http://dx.doi.org/10.1117/12.2268809

87. Lentin J. ROS Robotics Projects. Packt Publ. Ltd, 2017. 452 p.

88. Zhou C., Li F., Cao W., Wang C. Design and implementation of a novel obstacle avoidance scheme based on combination of CNN-based deep learning method and liDAR-based image processing approach. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems.* 2018;35(3):1-11. https://doi.org/10.3233/JIFS-169706

89. Hennes D., Claes D., Meeussen W., Tuyls K. Multi-robot collision avoidance with localization uncertainty. In: Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Vol. 1. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 20124 147-154.

90. Reid R., Cfnn A., Meiklejohn C., Boeing A., Braunl T. Cooperative multi-robot navigation, exploration, mapping and object detection with ROS. In: 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2013;1083-1088. https://doi.org/10.1109/IVS.2013.6629610

91. Rubenstein M., Ahler C., Hoff N., Cabrera A., Nagpal R. Kilobot: A low cost robot with scalable operations designed for collective behaviors. *Robotics and Autonomous Systems.* 2014;62(7):966-975. https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.08.006

92. Lee B. H. Y., Morrison J. R., Sharma R. Multi-UAV control testbed for persistent UAV presence: ROS GPS waypoint tracking package and centralized task allocation capability. In: 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, 2017;1742-1750. https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991424

93. Siwek M., Besseghieur K., Baranowski L. The effects of the swarm configuration and the obstacles placement on control signals transmission delays in decentralized ROS-embedded group of mobile robots. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2018;2029(1):020069.

94. ArduPilot Swarming — Mission Planner documentation – [Electronic resource], URL:http://ardupilot.org/planner/docs/swarming.html

Об авторе:

Романов Алексей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры биокибернетических систем и технологий Института кибернетика ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр. Вернадского, д. 78).

About the author:

Alexey M. Romanov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Chair of Biocybernetics Systems and Technologies, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

ISSN 2500-316X (Online)

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-87-95

CC BY

УДК 007.51

Инфраструктурный обзор распределенной телекоммуникационной системы дорожного движения и ее протоколов

Н.Н. Калигин[1,@], С.У. Увайсов[1], А.С. Увайсова[1], С.С. Увайсова[2]

[1]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва 123592, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: nkaligin@yandex.ru

Для организации эффективной транспортной структуры современные дорожные телекоммуникационные системы обеспечивают сбор информации о транспортном средстве, подключенном к системе, и анализируют ее. Данной информацией являются параметры движения, местоположение, параметры состояния систем автомобиля. После обработки и анализа указанной информации возможно формирование рекомендаций и управляющих воздействий. Эти рекомендации используются водителем или автоматизированной системой управления автомобилем. В данной статье описан общий принцип работы современных транспортных телекоммуникационных систем. Выделены протоколы взаимодействия типа «автомобиль-автомобиль» в данной системе, описаны технологии беспроводной связи, позволяющие реализовать это взаимодействие. Разработан один из принципов, по которому система может определить оптимальность использования ресурса автомобиля и агрессивность стиля вождения грузового транспортного средства на основе алгоритма автоматизированной выдачи рекомендации по действиям водителя. Данный принцип рассмотрен на примере серии нагрузочных характеристик дизельного двигателя. Сформулирован принцип выбора оптимальной серии рекомендаций группе водителей для оптимизации движения транспортного потока через взаимодействие типа «автомобиль-автомобиль».

Ключевые слова: распределенные телекоммуникационные системы, автомобильное оборудование, придорожное оборудование, DSRC 802.11p, LTE V2x, удельный расход топлива.

Для цитирования: Калигин Н.Н., Увайсов С.У., Увайсова А.С., Увайсова С.С. Инфраструктурный обзор распределенной телекоммуникационной системы дорожного движения и ее протоколов. *Российский технологический журнал.* 2019;7(6):87-95. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-87-95

Infrastructural review of the distributed telecommunication system of road traffic and its protocols

Nikolay N. Kaligin[1,@], Saygid U. Uvaysov[1], Aida S. Uvaysova[1], Svetlana S. Uvaysova[2]

[1]MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[2]National Research University Higher School of Economics, Moscow 123592, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: nkaligin@yandex.ru

To organize an efficient transport structure, modern road telecommunication systems provide information collection about the vehicle connected to the system and analyze it. The modern car in such a system is considered to be connected. Such information systems can collect information about the vehicle. This information includes its driving parameters, location, and the parameters of the vehicle systems state. After processing and analyzing this information, it is possible to form recommendations and control actions. These recommendations are used by the driver or an automated vehicle control system. This article describes the general principle of the operation of modern transport telecommunication systems. The car-to-car type of interaction protocols are highlighted in this system. Wireless communication technologies that allow this interaction to be implemented are described. One of the principles was developed, according to which the system can determine the optimal use of the vehicle resource and the aggressiveness of the driving style of a freight vehicle on the basis of an automated algorithm for issuing recommendations for driver actions. This principle is considered as exemplified by a series of load characteristics of a diesel engine. The principle of choosing the optimal series of recommendations to a group of drivers to optimize the movement of traffic through the car-to-car interaction has been formulated.

Keywords: distributed telecommunication systems, automotive equipment, roadside equipment, DSRC 802.11p, LTE V2x, specific fuel consumption.

For citation: Kaligin N.N., Uvaysov S.U., Uvaysova A.S., Uvaysova S.S. Infrastructure review of the distributed telecommunication system of road traffic and its protocols. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):87-95 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-87-95

Введение

За последние несколько десятков лет телекоммуникационные системы прошли довольно внушительный путь и теперь готовы к тому, чтобы решения, построенные на их базе, качественно дополнили практически все аспекты человеческой жизни. Один из главных аспектов жизни человека – это реализация свободы передвижения и улучшение транспортной доступности. Поток автомобилей на дорогах, действия пешеходов, возникающие в ходе движения, типичные и нетипичные ситуации на дороге создают огромный поток информации, которую необходимо анализировать для организации эффективной транспортной структуры. Такого рода анализ обеспечивают дорожные телекоммуника-

ционные системы. Современный автомобиль в этой системе считается подключенным. Такие информационные системы могут обеспечивать сбор информации о транспортном средстве: его параметрах движения, местоположении, параметрах состояния систем автомобиля. После обработки и анализа указанной информации возможно формирование рекомендаций и управляющих воздействий. Эти рекомендации используются водителем или автоматизированной системой управления автомобилем.

Первые телекоммуникационные системы использовали спутниковые или специализированные сети из-за недостаточно развитой структуры мобильных сетей. Позже возможности систем значительно расширились благодаря широкому распространению сотовых вышек и отключению «избирательной доступности» системы Navstar GPS. После этого стало возможно коммерческое использование спутниковой группировки не только для отслеживания транспорта при передвижении на дальних расстояниях, но и использование спутников для навигации в городских условиях, в том числе при плотном потоке транспорта.

В ходе развития транспортные телекоммуникационные системы перешли от пассивного мониторинга к обеспечению безопасности дорожного движения и грузоперевозок. Данные обстоятельства привлекли внимание регуляторов развитых стран, после чего начали формироваться правовые аспекты в данной области. Начали создаваться государственные системы, такие как ЭРА-ГЛОНАСС и eCall. Позже эти системы были расширены для согласованной работы друг с другом и обеспечения сопутствующих сервисов. Это сервисы страховой телематики и сервисы взаимодействия автомобилей между собой и с элементами дорожной инфраструктуры.

В наше время дорожная инфраструктура и сопутствующие ей сервисы представляют собой развитую распределенную телекоммуникационную систему (рис. 1). Основные ее компоненты – подсистема автомобильного оборудования, подсистема ГНСС (глобальная навигационная спутниковая система), подсистема беспроводной связи и подсистема придорожного оборудования [1].

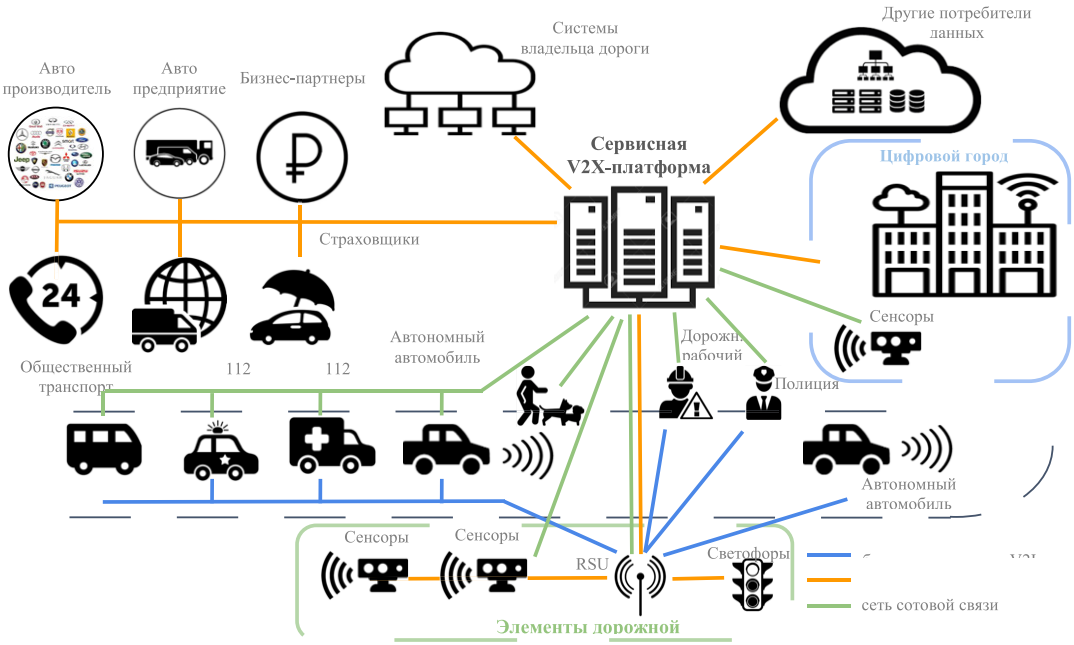


Рис. 1. Архитектура систем, обеспечивающих взаимодействия автомобилей с дорожной инфраструктурой.

Подсистема автомобильного оборудования отвечает за определение автомобилем собственного местоположения. Тут могут использоваться как спутниковые группировки и получение с них сигнала, так и методы инерциальной навигации, какие-то специфические способы определения местоположения, использующие свои способы связи.

Еще одну функцию, которую обеспечивает подсистема автомобильного оборудования – беспроводная передача данных. До недавнего времени в основном использовалась сотовая связь, но в современных решениях уже внедряются другие технологии – ITS-G5 и c-V2x.

Одной из важнейших функций подсистемы автомобильного оборудования является сбор и обработка информации. Это, в том числе, анализ данных с внутренних и внешних датчиков, определение и классификация события по установленной логике с последующим формированием сообщений и передача их в телекоммуникационную систему, в том числе и автомобилям. При невозможности передачи информация сохраняется в бортовой системе. Кроме того, должна быть предусмотрена методика обработки команд, информации и уведомлений к автомобилю от телекоммуникационной системы [2].

Подсистема ГНСС – это одна из самых укоренившихся систем в общей архитектуре. Количество действующих спутниковых группировок увеличивается, хотя в полном масштабе развернуты и работают только две – GPS и ГЛОНАСС. Еще две на подходе, и их использование положительно повлияет на качество услуг.

Для обеспечения качественной передачи данных на всех участках дорожного движения должна быть развернута подсистема беспроводной связи. В России развернуты сети GSM (2G), UMTS (3G) и LTE (4G). Системы связи на основе ITS-G5 и c-V2x в Российской Федерации не представлены. Беспроводная связь должна обеспечивать непрерывное взаимодействие автомобилей с подсистемой придорожного оборудования.

Подсистемы придорожного оборудования принимают такие данные от автомобилей, как местоположение, скорость, направление и характер движения. Автомобилям в свою очередь передаются сигналы о состоянии светофоров, статусе дорожных работ и прочая информация. Перед передачей автомобилям данных и после сбора информации от транспортных средств происходит анализ текущей ситуации и поиск статистических закономерностей.

Технологии беспроводной связи, позволяющие реализовать взаимодействие типа «автомобиль-автомобиль»

Из приведенного выше общего описания архитектуры телекоммуникационной транспортной системы видно, что тонким местом в реализации таких систем является передача данных между автомобилями. Сейчас существуют две технологии, которые позволяют реализовать сценарии взаимодействия между автомобилями – это технологии DSRC 802.11p и LTE V2x.

Технология DSRC 802.11p полностью стандартизирована, в комплексе стандартов ETSI описан полный стек протоколов (рис. 2).

Дорожная карта развития технологий LTE V2x (c-V2x) предполагает появление серийных продуктов на базе данной технологии в течение ближайших 5 лет. Из описания стандартов и представленных дорожных карт можно сделать вывод о том, что две технологии дополнят друг друга [3, 4]. Обе имеют недостатки, которые взаимно компенсируются преимуществами каждой из технологий (таблица).

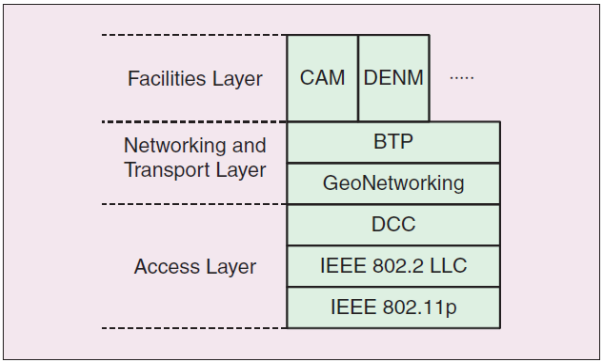


Рис. 2. Стек протоколов C-ITS, стандартизированный ETSI (Facilities Layer – уровень объектов, Networking and Transport Layer – сетевой и транспортный уровень, Access Layer – уровень доступа).

Таблица 1. Взаимодополняемость протоколов LTE V2x и 802.11p

Возможности технологии V2X \ протокол"	802.11p	LTE-V2X	802.11p + LTE-V2X
Работа при отсутствии сети	√	ограниченно	√
Поддержка взаимодействия V2V	√	ограниченно	√
Поддержка критических сценариев, связанных с безопасностью	√	×	√
Поддержка услуг на основе мультимедиа	ограниченно	√	√
Поддержка взаимодействия V2I	ограниченно	√	√
Покрытие сети	×	√	√
Возможность развития протокола физического уровня для поддержки новых сценариев	×	√	√

Обе технологии обеспечивают передачу данных в специфических условиях, которыми являются высокие относительные скорости объектов, низкие задержки передачи сообщений, высокая пропускная способность, выделенные каналы для сообщений, связанных с безопасностью, обеспечения аутентификации участников обмена данными и высокая надежность при большой нагрузке.

Использование протоколов высокоскоростного взаимодействия типа «автомобиль-автомобиль» для оптимизации транспортных потоков дорожного движения

Описанные выше технологии позволяют проводить высокоскоростной обмен сообщениями между машинами, находящимися в движении. На основе статистических, эмпирических и оптимизационных методов для каждой из машин можно подобрать методику выдачи рекомендаций водителю для оптимального передвижения.

Параметрами оптимизации могут быть различные параметры движения. Наиболее важны те параметры, оптимизация которых повышает экономическую эффективность поездки либо повышает безопасность передвижения. Одновременно увеличивают безопасность движения и экономическую выгоду поездки такие параметры, как расход топлива и параметр износа ресурса двигателя.

В контексте движения одной единицы рекомендации для реализации оптимального вождения наиболее важны водителям грузового автотранспорта. Расход топлива у грузо-

вого автотранспорта выше, чем у легкового. Количество ступеней коробки передач может достигать 16, и для получения навыка высококвалифицированного вождения у шофера может уйти много времени [5].

В контексте оптимизации движения общего пассажиропотока выдача рекомендации для реализации оптимального вождения наиболее важны водителям легкового автотранспорта. Маневры легковой автотранспорт совершает быстрее. Общий расход топлива на отдельных участках может значительно превышать общий расход грузового автотранспорта. Однако для выдачи оптимальных рекомендаций недостаточно одних только персональных рекомендаций. Необходимо выдавать рекомендации, исходя из текущей ситуации транспортного потока, а для этого нужна быстрая передача данных между единицами транспорта, анализ этих данных и выдача комплексных рекомендаций. Комплексные рекомендации должны в итоге способствовать не оптимизации расхода топлива и расхода ресурса двигателя конкретного автомобиля, а оптимизации совокупного расхода топлива и совокупного расхода ресурса двигателей автомобилей на анализируемом участке [6, 7].

Рассмотрим в качестве примера работу дизельного двигателя OM457LA. Показатели двигателя внутреннего сгорания в отношении степени совершенства рабочего процесса в каждой точке поля режимов характеризуются удельным расходом топлива и описываются следующей зависимостью:

$$q_в = 1000 \times \frac{G_t}{N_в}\ , \tag{1}$$

где: $q_в$ – удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч;

G_t – часовой расход топлива, кг/ч;

$N_в$ – эффективная мощность на валу двигателя, кВт.

После анализа серии нагрузочных характеристик (рис. 3) дается заключение, что из-за значительного роста удельного расхода топлива при работе двигателя с высокой частотой вращения коленчатого вала в эксплуатации даже при «динамичном» стиле вождения следует избегать скоростных режимов, превышающих 1800–1900 мин$^{-1}$, своевременно переходя на более высокие передачи. Понижение среднего скоростного режима работы двигателя с 1600–1800 до 1200–1400 мин$^{-1}$ при «экономичном» стиле вождения может способствовать снижению эксплуатационного расхода топлива не менее чем на 5–7% [8].

Аналогично можно вычислить эксплуатационные параметры для других транспортных средств. При взаимодействии друг с другом и с телекоммуникационной системой на уровне подсистемы придорожного оборудования эти данные агрегируют и анализируют вычислительные ресурсы, отведенные на участок дорожной инфраструктуры.

Системе необходимо решить задачу оптимального управления, решением которой будет минимум функционала:

$$J = \sum_{i=1}^{n} c_i Q_i \left(q_{вi}, \upsilon_i, \nu_i \right), \tag{2}$$

где: $q_{вi}$ – удельный эффективный расход топлива i-го транспортного средства;

υ_i – частота вращения коленчатого вала i-го транспортного средства;

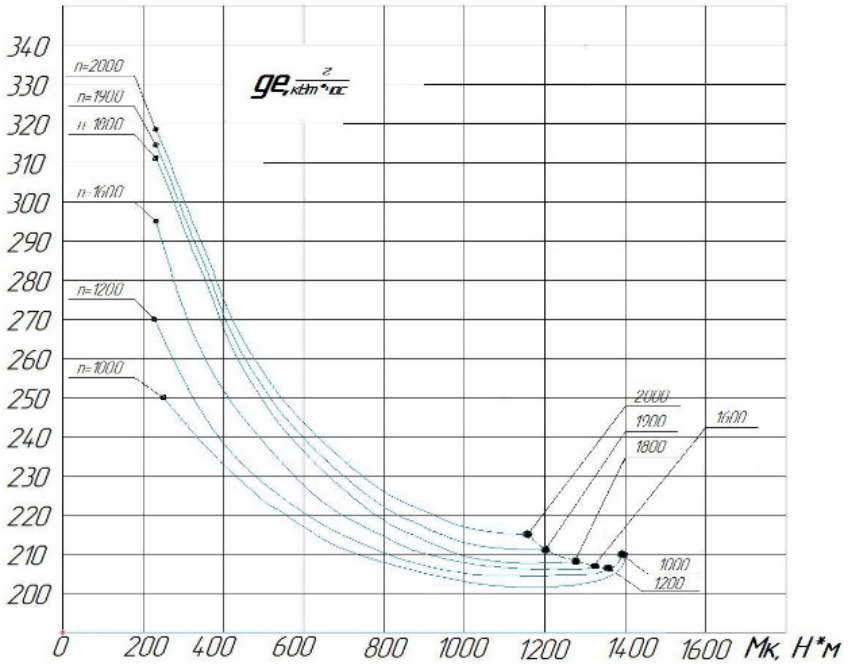


Рис. 3. Серия нагрузочных характеристик на примере дизельного двигателя OM457LA (по данным НАМИ).

v_i – скорость движения *i*-го транспортного средства;

c_i – коэффициент участия *i*-го автомобиля в транспортном потоке.

Если данные об оптимальной эксплуатации конкретного транспортного средства не представлены в придорожной подсистеме, то они передаются от транспортного средства. Если придорожная транспортная система не обладает достаточными вычислительными ресурсами, то в вычислении образовавшейся задачи оптимального управления (2) принимают участие вычислительные мощности подсистем автомобильного оборудования [9–11]. При решении задачи оптимального управления участникам дорожного движения выдаются рекомендации касательно передвижения.

Заключение

В данной статье описан общий принцип работы современных транспортных телекоммуникационных систем. Показано, что протоколы взаимодействия типа «автомобиль-автомобиль» DSRC 802.11p и LTE V2x дополняют друг друга и позволяют решать задачи обмена информацией внутри телекоммуникационной системы. Продемонстрирован один из принципов, по которому система может определить оптимальность использования ресурса автомобиля и агрессивность стиля вождения водителя грузового транспортного средства на основе алгоритма автоматизированной выдачи рекомендации по действиям водителя. Данный принцип рассмотрен на примере серии нагрузочных характеристик дизельного двигателя. Сформулирован принцип выбора оптимальной серии рекомендаций группе водителей для оптимизации движения транспортного потока через взаимодействие типа «автомобиль-автомобиль».

Литература:

1. Hartenstein H., Laberteaux K.P. A tutorial survey on vehicular Ad Hoc networks // IEEE Commun. Mag. 2018. V. 46. P. 164–171. https://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4539481

2. Muhammada M., Safdar G.A. Survey on existing authentication issues for cellular-assisted V2X communication // Veh. Commun. 2018. V. 12. P. 50–65. https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2018.01.008

3. Mateo Sanguino T.J. 50 years of rovers for planetary exploration: A retrospective review for future directions // Robot. Auton. Syst. 2017. V. 94. P. 172–185. https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.04.020

4. Silva R., Iqbal R. Ethical implications of social Internet of vehicles systems // IEEE Internet Things J. 2019. V. 6. P. 517–531. https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2841969

5. Chen S., Hu J., Shi Y., Zhao L. LTE-V: A TD-LTE-Based V2X solution for future vehicular network // IEEE Internet Things J. 2016. V. 3. P. 997–1005. https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2611605

6. Sun S.H., Hu J.L., Peng Y., Zhao L., Fang J.Y. Support for vehicle-to-everything services based on LTE // IEEE Wirel. Commun. 2018. V. 23. P. 4–8. https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7498068

7. Воронов А.С., Воронов А.С., Калигин Н.Н. Определение стиля вождения в интеллектуальных системах страховой телематики // Ползуновский альманах. 2014. № 1. С. 124–129.

8. Воронов А.С., Тюфяков А.С., Калигин Н.Н. Научные основы алгоритма автоматизированной выдачи рекомендаций водителю // Ползуновский альманах. 2016. № 2. С. 34–37.

9. Seo H., Lee K.D., Yasukawa S., Pen, Y., Sartori P. LTE evolution for vehicle-to-everything services // IEEE Commun. Mag. 2016. V. 54. P. 22–28. https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7497762

10. Abboud K., Omar H.A., Zhuang W. Interworking of DSRC and cellular network technologies for V2X communications: A survey // IEEE Trans. Veh. Technol. 2016. V. 65. P. 9457–9470. https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2591558

11. Jing P., Huang W., Chen L. Car-to-pedestrian communication safety system based on the vehicular Ad-Hoc network environment: A systematic review // Information. 2017. V. 8(4). P. 127. https://doi.org/10.3390/info8040127

References:

1. Hartenstein H., Laberteaux K.P. A tutorial survey on vehicular Ad Hoc networks. *IEEE Commun. Mag*. 2018;46:164-171. https://doi.org/10.1109/MCOM.2008.4539481

2. Muhammada M., Safdar G.A. Survey on existing authentication issues for cellular-assisted V2X communication. *Veh. Commun.* 2018;12:50-65. https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2018.01.008

3. Mateo Sanguino T.J. 50 years of rovers for planetary exploration: A retrospective review for future directions. *Robot. Auton. Syst.* 2017;94:172-185. https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.04.020

4. Silva R., Iqbal R. Ethical Implications of Social Internet of Vehicles Systems. *IEEE Internet Things J.* 2019;6:517-531. https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2841969

5. Chen S., Hu J., Shi Y., Zhao L. LTE-V: A TD-LTE-Based V2X Solution for future vehicular network. *IEEE Internet Things J.* 2016;3:997-1005. https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2611605

6. Sun S.H., Hu J.L., Peng Y., Zhao L., Fang J.Y. Support for vehicle-to-everything services based on LTE. *IEEE Wirel. Commun.* 2018;23:4-8. https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7498068

7. Voronov A.S., Voronov A.S., Kaligin N.N. Definition of driving style in intellectual systems of insurance telematics. *Polzunovsky Almanakh.* 2014;1:124-129 (in Russ.).

8. Voronov A.S., Tyufyakov A.S., Kaligin N.N. Scientific basis of the algorithm for automated issuing recommendations to the driver. *Polzunovsky Almanakh.* 2016;2:34-37 (in Russ.).

9. Seo H., Lee K.D., Yasukawa S., Peng Y., Sartori P. LTE evolution for vehicle-to-everything services. *IEEE Commun. Mag.* 2016;54:22-28. https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7497762

10. Abboud K., Omar H.A., Zhuang W. Interworking of DSRC and cellular network technologies for V2X communications: A survey. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2016;65:9457-9470. https://doi.org/:10.1109/TVT.2016.2591558

11. Jing P., Huang W., Chen L. Car-to-pedestrian communication safety system based on the vehicular Ad-Hoc network environment: A systematic review. *Information.* 2017;8(4):127. https://doi.org/10.3390/info8040127

Об авторах:

Калигин Николай Николаевич, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID H-9961-2016, https://orcid.org/0000-0001-7666-8339

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, https://orcid.org/0000-0003-1943-6819

Увайсова Аида Сайгидовна, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 57209460276, ResearcherID AAB-2095-2019, https://orcid.org/0000-0002-4665-0741

Увайсова Светлана Сайгидовна, аспирант Департамента компьютерной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (123592, Россия, Москва, Таллинская ул., д. 34).

About the authors:

Nikolay N. Kaligin, Postgraduate Student of the Chair of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunications Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID H-9961-2016, https://orcid.org/0000-0001-7666-8339

Saygid S. Uvaysov, Dr. of Sci. (Engineering) (A post-doctoral degree called Doctor of Sciences is given to reflect second advanced research qualifications or higher doctorates in ISCED 2011), Head of the Chair of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, https://orcid.org/0000-0003-1943-6819

Aida S. Uvaysova, Postgraduate Student of the Chair of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 57209460276, ResearcherID AAB-2095-2019, https://orcid.org/0000-0002-4665-0741

Svetlana S. Uvaysova, Postgraduate Student of School of Computer Engineering, National Research University Higher School of Economics (34, Tallinskaya ul., Moscow 123592, Russia).

ISSN 2500-316X (Online)

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-96-105

CC BY

UDC 621.317

Analysis of the Raman spectrum of high-power amplifiers of wireless communication systems

Nguyen Minh Tuong,
Viktor I. Nefedov@,
Igor V. Kozlovsky,
Alexey V. Malafeev,
Kirill A. Selenya,
Natalia A. Mirolyubova

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author, e-mail: nefedov@mirea.ru

At present, the transfer of information is an integral part of technologies that are actively developing in the framework of the process called the Fourth Industrial Revolution. In this, space-satellite, satellite and other mobile wireless communication systems play an increasingly important role. Almost all of them include multiple access, which means a method of common resource division of the communication channel between subscribers (each mobile station has the ability to use a satellite retransmitter or the base station of a mobile wireless communication system to transmit its signals regardless of the operation of another station). Multiple-access communication systems are used for digital radio and television broadcasting in high-speed communication lines, in wireless local area networks, for data transmission in the microwave range, and also for communication with various mobile partners. In the radio transmitting and receiving paths of communication systems with multiple access, multiple signals are used (the sum of the power of the subscriber signals) with very complex types of digital envelope modulation, so they use wide working bands. With an increase in the quality of information transmission in mobile wireless communication systems, there are special requirements for powerful amplification systems (PAS) of receiving-transmitting tracts, which must have high efficiency and high output power, required bandwidth, network capacity, and linearity of message transmission channels. To achieve maximum efficiency in the PAS, the operating point of its amplifying element should be near the saturation region, on the main nonlinearity of the transfer characteristic. When multiple signals are introduced simultaneously into the PAS, it generates unfiltered intermodulation harmonics (IH). Intermodulation harmonics are formed due to the nonlinearity of the amplitude characteristics and the unevenness of phase-amplitude characteristics and due to the need to work with the highest efficiency of the PAS, which requires a shift of the operating point to the saturation thresholds of their amplifying elements. This, in turn, causes the appearance of IH. Since the harmonic oscillations IH actually represent noise for neighboring communication channels and are not theoretically filtered, an equalizer (otherwise an optimizer) of characteristics, is needed to reduce the level of these interferences in the output (Raman) spectrum of the PAS.

Keywords: communication systems, group signals, amplitude characteristics, adaptive mathematical models, modeling, harmonics of intermodulation, correction of nonlinear systems characteristics.

For citation: Nguyen Minh Tuong, Nefedov V.I., Kozlovsky I.V., Malafeev A.V., Selenya K.A., Mirolyubova N.A. Analysis of the Raman spectrum of high-power amplifiers of wireless communication systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):96-105. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-96-105

Анализ комбинационного спектра высокомощных усилителей систем беспроводной коммуникации

Минь Тыонг Нгуен,
В.И. Нефедов@,
И.В. Козловский,
А.В. Малафеев,
К.А. Селеня,
Н.А. Миролюбова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: nefedov@mirea.ru

В настоящее время передача информации является неотъемлемой частью технологий, активно развивающихся в рамках процесса, называемого Четвертой промышленной революцией. В этом всё большую роль играют спутнико-космические, спутниковые и другие подвижные системы беспроводной коммуникации. Почти все они включают в себя множественный доступ (multiple access), под которым понимается способ разделения общего ресурса канала связи между абонентами (каждая мобильная станция имеет возможность пользоваться ретранслятором спутника или базовой станцией подвижной системы беспроводной коммуникации для передачи своих сигналов независимо от работы другой станции). Связные системы с множественным доступом используются для цифрового радио- и телевещания в высокоскоростных линиях связи, в беспроводных локальных сетях, для передачи данных в СВЧ-диапазоне, а также для связи с различными подвижными партнерами. В радиопередающих и радиоприемных трактах связных систем с множественным доступом используются множественные сигналы (сумма мощностей сигналов абонентов) с весьма сложными видами цифровой модуляции огибающей, поэтому в них применяют широкие рабочие полосы. С повышением качества передачи информации в подвижных системах беспроводной коммуникации имеют место особые требования к мощным усилительным системам (МУС) приемо-передающих трактов, которые должны обладать высоким КПД и большой выходной мощностью, требуемыми широкополосностью, емкостью сети и линейностью каналов передачи сообщений. Для достижения максимальной эффективности в МУС рабочая точка его усилительного элемента должна находиться вблизи области насыщения, на основной криволинейности передаточной характеристики. Когда множественные сигналы вводятся одновременно в МУС, он генерирует нефильтруемые гармоники интермодуляции (intermodulation harmonics; англ. IH). Гармоники интермодуляции образуются вследствие нелинейности амплитудных характеристик и неравномерности фазо-амплитудных характеристик и необходимости работать с наиболее высоким КПД МУС, что и требует сдвига рабочей точки к порогам насыщения их усилительных элементов. Это в свою очередь и вызывает появление IH. Поскольку гармонические коле-

бания ІН фактически представляют собой шум для соседних каналов связи и теоретически не фильтруемы, необходим выравниватель (иначе оптимизатор) характеристик для уменьшения уровня этих помех в выходном (комбинационном) спектре МУС.

Ключевые слова: системы связи, групповые сигналы, амплитудные характеристики, адаптивные математические модели, моделирование, гармоники интермодуляции, коррекция характеристик нелинейных систем.

Для цитирования: Nguyen Minh Tuong, Nefedov V.I., Kozlovsky I.V., Malafeev A.V., Selenya K.A., Mirolyubova N.A. Analysis of the Raman spectrum of high-power amplifiers of wireless communication systems. *Российский технологический журнал.* 2019;7(6):96-105. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-96-105

The aim of this work is to solve the problems of increasing the output power and efficiency of powerful amplification systems (PAS), as well as increasing the capacity and expanding the bandwidth of communication systems with multiple access of mobile stations of subscribers. All this is achieved by optimizing the characteristics of the PAS, which leads to a sharp decrease in the intermodulation harmonics (IH) power, and as a result – the actual recovery (return) of useful energy.

In theory and practice, there is a statistical relationship between the parameters of the input and output multiple signals of a nonlinear dynamic system. That is why we can apply the adaptive linearization method for these non-linear microwave (UHF) power amplifiers in order to analyze and calculate the output Raman spectrum.

Nonlinear distortions (ND), including IHs, are caused by the generation of new harmonic components in the spectrum of the useful signal. The input of the PAS does not contain these components, and they are associated exclusively with the presence of curved sections "below" (noise area) and "above" (distortion area), in particular, on the amplitude characteristics (AC) (Fig. 1) [1–3].

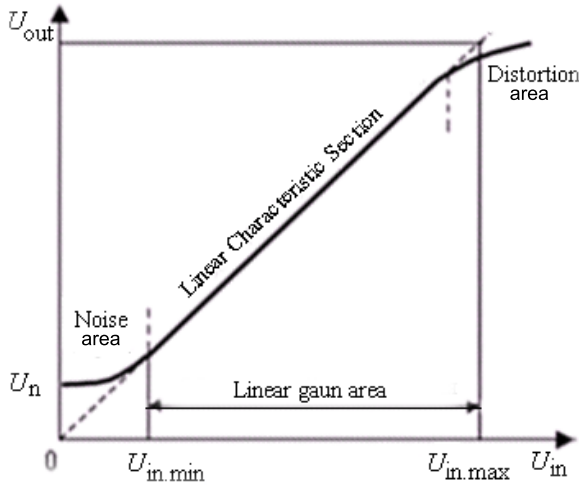


Fig 1. Real amplitude characteristic of the PAS.

The appearance of ND, and in particular IHs, in the transceiver paths of a mobile satellite, space-satellite, and terrestrial communication systems with multiple access to mobile wireless communication stations leads to a situation where, in addition to useful signal power limited due to internal relatively small noise (noise area of the actual PAS), a new threshold power level appears in the distortion area. In these areas, there is a violation of the linear dependence of the real part of the transmission coefficient, i.e., of the dependence of the output signal power on the level of the input oscillation.

The method of adaptive optimization of the characteristics of a nonlinear PAS is based on the artificial replacement of the nonlinear conversion of multiple amplified signals with equivalent linear transformations [1–3], while the nonlinear element of the PAS is replaced by a linear equivalent, and the nonlinear AC is replaced by a linear one. As a result of such a replacement, the PAS is linearized, which makes it possible to use methods of studying linear dynamic systems for it. Then, IHs are automatically compensated according to the results of calculations obtained on the basis of computer mathematics (CM) using the adaptive digital-tax equalizer of characteristics.

So, IHs arise in transceivers as a result of simultaneous action, in the simplest case, of two test harmonics with radiation frequencies f_1 and f_2 on its nonlinear amplifying element. IHs are in the working band of useful signals. It is theoretically and practically impossible to filter them out. Therefore, they are undesirable. Most dangerous are third-order IHs, the harmonics of intermodulation at frequencies $(2f_1 - f_2)$ and $(2f_2 - f_1)$. In a real environment, it is very difficult to distinguish IHs from useful signals and interference from another, unauthorized radio station operating in a communication system [1–3].

Today, the functions of transcendental type, such as cylindrical functions of the first kind [3–6], are widely used as mathematical apparatus for calculating. They provide fast and correct convergence of the solutions of a number of mathematical, physical and technical problems describing many physical processes accompanied by constant loss of the internal energy for a nonlinear dynamical system (for example, losses in the PAS due to emerging IHs). These functions can be somehow reduced to widely known transcendental functions.

Cylindrical functions, as a class of transcendental functions, are solutions of the Bessel differential equation [3–7]:

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x\frac{dy}{dx} + (x^2 - \nu^2)y = 0, \tag{1}$$

where the parameter ν is the order taking complex (arbitrary) values.

We expand equation (1) in a power series near the point $x = 0$:

$$J_\nu(x) = \sum_0^\infty \frac{(-1)^n (0.5x)^{2n+\nu}}{n!\Gamma(n+\nu+1)}, \tag{2}$$

where $\Gamma(n + \nu + 1)$ is the gamma function widely known in mathematics. (It was introduced by Leonard Euler, and it owes its designation to Legendre).

According to relation (2), any term of the power series expansion

$$J_{f_k}(\nu, \tau, \gamma) = \frac{e^{-\gamma\tau}}{\pi} \int_0^\pi \cos\left[\lambda_k^{(\nu)}\left(1 - e^{-2\gamma\tau}\right)\sin\varphi - \nu\varphi\right] d\varphi. \tag{3}$$

where $\lambda_k^{(\nu)}$ are the roots of the equation.

In accordance with formula (2), the initial term of the series expansion

$$a_0 = \left(\frac{x}{2}\right)^{\nu} \frac{1}{\nu!}. \tag{4}$$

Similarly, each term in the expression (2) can be calculated as

$$a_k = a_{k\text{-}1} \frac{(-1)\left(0.5x\right)^2}{k(n+k)}. \tag{5}$$

Note that compared with geometric cosine and sine functions that behave identically on the entire numerical axis and are periodic functions with a period of oscillations of 2π, changes in functions (3) for large values of the variable x gradually degenerate and tend to zero [6–9].

It should be noted that the asymptotic period of their oscillations tends to the classical value 2π. For example, for small values of the index x of functions (3), even for variable $X > 8$, the interval between roots becomes equal to π. For sufficiently large values of the argument x, the asymptotic expansion is used:

$$J_{\nu}\left(x\right) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \cos\left(x - 0.25\pi - 0.5\nu\pi\right). \tag{6}$$

An important feature of expressions (6) is that they, given by the relation $J_{\nu}\left(\lambda_m^{(\nu)} x\right)$, form a complete orthogonal system of functions that allows us to represent different analytic functions in the form of infinite series of products

$$f(x) = \sum_{m=1}^{\infty} a_m J_{\nu}\left(\lambda_m^{(\nu)} x\right). \tag{7}$$

On the basis of the above assumptions, one can represent the orthogonal Bessel functions of the first kind in numerical form using the integrals (3) [7–9]:

$$Jf_k(\nu,\tau,\gamma) = \frac{\mathrm{e}^{-\gamma\tau}}{\pi} \int_0^{\pi} \cos\left(\lambda_k^{(\nu)}(1-\mathrm{e}^{-2\gamma\tau})\sin\varphi - \nu\varphi\right) d\varphi. \tag{8}$$

Nowadays, the direct application of functions (8), as well as their decomposition into orthogonal systems, is one of the promising directions in solving real practical problems and constructing reliable mathematical models of amplifying PAS included in the transceiver paths of mobile and satellite communication systems with multiple access.

Analysis of nonlinear transformations on the basis of transcendental functions. Let one harmonic voltage component $u(t)$ be supplied to the input of the PAS. The relationship between the current and the acting voltage can be written as

$$i = f\left[u\left(t\right)\right]. \tag{9}$$

The input voltage $u(t)$ usually consists of a bias voltage U_0 and a harmonic $u_{\sim} = U_{\omega}\cos\omega t$, so, in the PAS $i = f(U_0 + U_{\omega}\cos\omega t)$.

Then we expand the last dependence of the output current into the Taylor series in the following form [7–9]:

$$e^{ud/dx} f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x)}{dx^n} u^n \tag{10}$$

Substituting the values $u_{\sim} = U_{\omega}\cos\omega t$ into (9) we have

$$i = \exp\left(U_{\omega} \cos\omega t \frac{d}{dU_0} \right) f(U_0). \tag{11}$$

Expanding expression (11) in the Laurent series, substituting functions (3) into it and bringing the function $f(U_0)$ under the differentiation sign we obtain [10–14]:

$$i = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2^{2m}(m!)^2} \frac{d^{2m} f(U_0)}{dU_0^{2m}} U_{\omega}^{2m} + \tag{12}$$

$$+ \sum_{p=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2^{2m+p-1}(m+p)!m!} \frac{d^{2m+p} f(U_0)}{dU_0^{2m+p}} U_{\omega}^{2m} \cos p\omega t.$$

Relation (12) obtained as a result of simple mathematical transformations determines the complete Raman spectrum of the output current of a nonlinear element (in this case, the powerful output transistor of the PAS) and allows us to calculate almost every component of the Raman spectrum at the output of the transmitting amplifier path. Let us represent the voltage acting on the input of the PAS by the sum of the constant component and the harmonics of the group signal:

$$u = U_0 + \sum_{s=1}^{K} U_{\omega_s} \cos\omega_s t\,, \tag{13}$$

where $s = 1, 2, ..., K$.

Then, in trigonometric form, expression (12) can be represented as follows [5, 6, 8–10]:

$$i = \left[\prod_{s=1}^{k} I_0 \left(\frac{dU_{\omega_s}}{dU_0} \right) \right] f(U_0) + \tag{14}$$

$$+2 \sum_{p_1=h_1}^{\infty} \sum_{p_2=h_2}^{\infty} \sum_{p_k=h_k}^{\infty} \left[\prod_{s=1}^{k} I_{P_s} \left(\frac{dU_{\omega_s}}{dU_0} \right) \right] f(U_0) \cos\left(p_1\omega_1 + \sum_{s=2}^{k} \pm p_s\omega_s \right) t,$$

where the lower limits for summing indices in the sums $h_1, h_2 \ldots h_k$ are selected on the basis of the condition

$$\sum_{s=1}^{k} h_s = 1.$$

Expression (14) defines all components of the output current, and each of them is easily calculated using Bessel functions of the first kind of the *p*-order [2, 7, 11–15]. On the basis of these results, a method for adaptive alignment of nonlinear PAS with a common envelope of amplified multiple signals was developed (Fig. 2).

Figure 2 shows that the transfer AC of the PAS in the gain range is almost linear. A similar change accompanies the IH-3 characteristic. This means that the adaptive linearization scheme sharply reduced the level of all IHs transforming their power into useful multiple signals.

So, IHs arise in transmitters as a result of simultaneous exposure to at least two signals with frequencies f_1 and f_2.

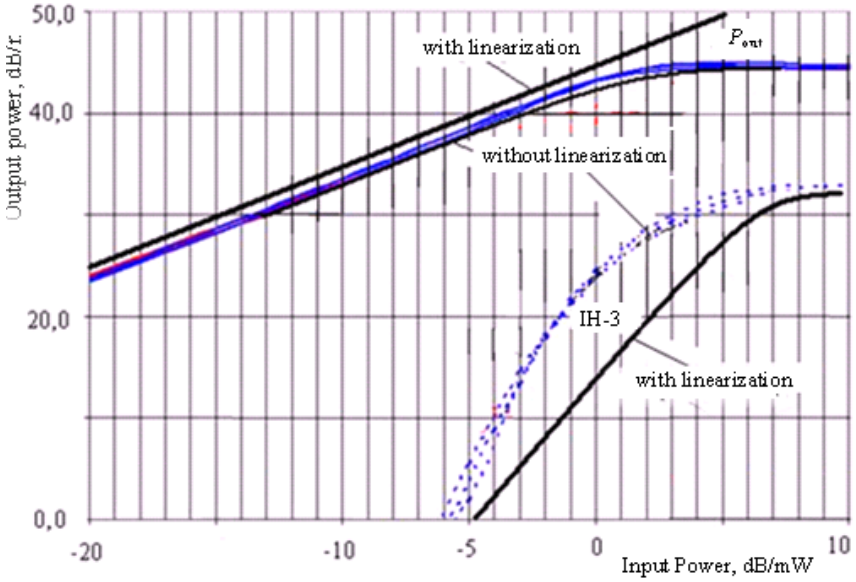


Fig. 2. Amplitude characteristics of the PAS without linearization and with linearization.

In a real environment, it is very difficult to distinguish IH from signals from another, unauthorized station.

The object of the influence of signals with frequencies f_1 and f_2 is the PAS at the output of the transmitter.

IHs are in the working band. It is practically impossible to filter them out. Therefore, they are undesirable. Most dangerous are third-order IHs, the harmonics at frequencies $(2f_1 - f_2)$ and $(2f_2 - f_1)$, where f_1 and f_2 are the two most significant spectral test components of the input signal (for example, the carrier and side harmonics, the first and second harmonics and etc.).

Conclusion

A modern method for correcting the transfer characteristic of powerful amplification systems is analyzed. It is established that the method of approximating the transfer characteristics by Bessel functions can be quite effective for studying nonlinear PAS when amplifying multiple signals in wireless communication systems.

References:

1. Denisevich V.N., TsunikovA.Yu., Avetisov A.S., KutlubaevaYu.I., Nefedov V.I., Markov A.A. Investigation of the spectrum of the output signal of nonlinear power amplifiers. Materials Intern. Scientific and practical conference, November 14-17, 2011 INTERMATIC – 2011. Fundamental Problems of Radioelectronic Instrumentation. M.: MIREA, 2011;11(4):201-205 (in Russ.).

2. Nefedov V.I. Method of linearization of amplifiers characteristics. *Naukoemkie tekhnologii* = Science Intensive Technologies. 2006;7(10):53-54 (in Russ.).

3. Kasymov A.Sh., Kasymov Sh.I. Quasistatic methods for assessing the impact of complex non-linearity of a wide-area, regional and local differential satellite radio navigation, control and communication systems repeater. *Uspekhi sovremennoi radioelectroniki* = Achievements of Modern Radioelectronics. 2005;6:58-70 (in Russ.).

4. Heutmaker M., Welch J., Wu E. Using Digital Modulation to Measure and Model RF Amplifier Distortion. *Applied Microwave & Wireless.* 1997;March/April:34-39.

5. Basik I.V. A method for determining the current components when a non-linear system is affected by the sum of sinusoidal voltages. Collection of scientific papers. TSNIIS. 1948; pp. 69-91 (in Russ.).

6. Watson G.N. A treatise on theory of Bessel functions. Cambridge: Cambridge University Press, 1945. 810 p.

7. Prokhorov S.A., GazetovaYa.V. On some properties of Bessel's cylindrical functions of the first kind. *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University.* 2011;1:118-121 (in Russ.).

8. Zabalkansky E.S., Levin M.E. Signal spectrum conversion in amplifiers with complex nonlinearity. *Radioteknika* = Radioengineering. 1993;2-3:15-18 (in Russ.).

9. Nefedov V.I., Trefilov D.A., Dementiev A.N., Vetrova V.V., Kolesnikov S.M., Shpak A.V. Integral equations for modeling cylindrical mirror antennas. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2017;5(3):3-8. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-3-124-129

10. Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Davydov A.M., Kossyi I.A., Nefedov V.I., Sarksyan K.A., Kharchev N.K. Subthreshold self-sustained discharge initiated by a microwave beam in a large volume of high-pressure gas. *Journal of Physics: Conference Series.* 2017;907(1): article No. 012022. https://doi.org/10.1088/1742-6596/907/1/012022

11. Luchnikov P.A., Nefedov V.I., Trefilov H.A., Dementiev A.N., Surzhikov A.P. Modeling of radiative - Conductive heat transfer in compositing materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 168, Iss. 1, February 2017, Article No. 012097. 12th International Conference Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials; Tomsk Russian Federation; through 12 September 2016; Code 126532 (Scopus). https://doi.org/10.1088/1757-899X/168/1/012097

12. Krylov V.I., Rukhadze A.A., Nefedov V.I. On a partial solution of the diffusion equation. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute.* 2017;44(2):36-39. http://dx.doi.org/10.3103/S1068335617020038

13. Kasymov A.I., Borisov V.A., Kognovitsky L.V., Rubtsov D.V., Kasymov A.A. The influence of a repeater satellite with non-linear AM / AM, AM / FM transformations on the energy performance of data transmission channels of wide-area differential subsystems of satellite radio navigation systems, aircraft landing, ATC and communications. *Voprosy teorii ustoichivosti i bezopasnosti sistem* = Problems of the theory of stability and safety of systems. 2004;6:75-84 (in Russ.).

14. Nefedov V.I., Sigov A.S. General communication theory. M.: Yurayt, 2019. 495 p.

15. Babenko V.P., Bityukov V.K., Kuznetsov V.V., Simachkov D.S. Simulation of static and dynamic losses in MOSFET keys. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2018;6(1):20-39. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-20-39

Литература:

1. Денисевич В.Н., Цуников А.Ю., Аветисов А.С., Кутлубаева Ю.И., Нефедов В.И., Марков А.А. Исследование спектра выходного сигнала нелинейных усилителей мощности. Материалы Междунар. научно-практической конференции, 14–17 ноября 2011 г. INTERMATIC – 2011. Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. М.: МИРЭА, 2011. Т. 11. № 4. С. 201–205.

2. Нефедов В.И. Метод линеаризации характеристик усилителей // Наукоемкие технологии. 2006. Т. 7. № 10. С. 53–54.

3. Касымов А.Ш., Касымов Ш.И. Квазистатические методы оценки влияния комплексной нелинейности ретранслятора широкозонных, региональных и локальных дифференциальных спутниковых систем радионавигации, управления и связи // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 6.С. 58–70.

4. Heutmaker M., Welch J., Wu E. Using Digital Modulation to Measure and Model RF Amplifier Distortion // Applied Microwave & Wireless.1997. March/April. P. 34–39.

5. Басик И.В. Метод определения компонент тока при воздействии на нелинейную систему суммы

синусоидальных напряжений. Сборник научных трудов. ЦНИИС, 1948. С. 69–91.

6. Ватсон Г.Н. Теория бесселевых функций: пер. с англ. В.С. Бермана. В 2-х ч. М.: Изд-во иностранной литературы, 1949. 798 с.

7. Прохоров С.А., Газетова Я.В. О некоторых свойствах бесселевых цилиндрических функций первого рода. Вестник Северного (Арктического) федерального университета. 2011. № 1. С. 118–121.

8. Забалканский Э.С., Левин М.Е. Преобразование спектра сигналов в усилителях с комплексной нелинейностью // Радиотехника. 1993. № 2-3. С. 15–18.

9. Нефедов В.И., Трефилов Д.А., Дементьев А.Н., Ветрова В.В., Колесников С.М., Шпак А.В. Интегральные уравнения для моделирования цилиндрических зеркальных антенн // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 3. С. 3–8. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-3-124-129

10. Artem'ev K.V., Batanov G.M., Berezhetskaya N.K., Davydov A.M., Kossyi I.A., Nefedov V.I., Sarksyan K.A., Kharchev N.K. Subthreshold self-sustained discharge initiated by a microwave beam in a large volume of high-pressure gas // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 907 (1). article № 012022. https://doi.org/10.1088/1742-6596/907/1/012022

11. Luchnikov P.A., Nefedov V.I., Trefilov H.A., Dementiev A.N., Surzhikov A.P. Modeling of radiative – Conductive heat transfer in compositing materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 168, Iss. 1, February 2017, Article № 012097. 12th International Conference Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials; Tomsk; Russian Federation; through 12 September 2016; Code 126532 (Scopus). https://doi.org/10.1088/1757-899X/168/1/012097

12. Krylov V.I., Rukhadze A.A., Nefedov V.I. On a partial solution of the diffusion equation // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2017. V. 44(2). P. 36–39. http://dx.doi.org/10.3103/S1068335617020038

13. Касымов А.И., Борисов В.А., Когновицкий Л.В., Рубцов Д.В., Касымов А.А. Влияние спутника-ретранслятора с нелинейными АМ/АМ-, АМ/ФМ-преобразованиями на энергетические показатели каналов передачи данных широкозонных дифференциальных подсистем спутниковых систем радионавигации, посадки ВС, УВД и связи // Вопросы теории устойчивости и безопасности систем. 2004. Вып. 6. С. 75–84.

14. Нефедов В.И., Сигов А С. Общая теория связи: учебник для академического бакалавриата и магистратуры. М.: Юрайт, 2019. 495 с.

15. Бабенко В.П., Битюков В.К., Кузнецов В.В., Симачков Д.С. Моделирование статических и динамических потерь в MOSFET-ключах // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 1. С. 20–39. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-20-39

About the authors:

Nguyen Minh Tuong (Vietnam), Postgraduate Student, Chair of Communications and Telecommunications, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: nguyenminhtuong31292@gmail.com

Viktor I. Nefedov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Head of the Chair of Communications and Telecommunications, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: Nefedov@mirea.ru.

Igor V. Kozlovsky, Postgraduate Student of the Chair of Communications and Telecommunications, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Alexey V. Malafeev, Postgraduate Student, Chair of Communications and Telecommunications, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Kirill A. Selenya, Postgraduate Student of the Chair of Communications and Telecommunications, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Natalia A Mirolyubova, Senior Lecturer, Chair of Foreign Languages, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: mirolyubova@mirea.ru

Об авторах:

Нгуен Минь Тыонг (Вьетнам), аспирант кафедры систем связи и телекоммуникаций Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nguyenminhtuong31292@gmail.com

Нефедов Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем связи и телекоммуникаций Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nefedov@mirea.ru

Козловский Игорь Валерьевич, аспирант кафедры систем связи и телекоммуникаций Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Малафеев Алексей Викторович, аспирант кафедры систем связи и телекоммуникаций Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Селеня Кирилл Александрович, аспирант кафедры систем связи и телекоммуникаций Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Миролюбова Наталия Алексеевна, старший преподаватель кафедры иностранных языков Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mirolyubova@mirea.ru.

ISSN 2500-316X (Online)

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-105-121

CC BY

УДК 53.084

Термочувствительные тонкопленочные элементы на основе полуметаллов для приемников электромагнитного излучения

М.А. Кик[1],
И.А. Голоколенов[2,3],
А.С. Сигов[4],
А.А. Шиляев[4,5,@],
В.В. Завьялов[2,3]
С.С. Вербицкий[5],
А.Н. Целебровский[5]

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва 119991, Россия
[2]Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва 117334, Россия
[3]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва 101000, Россия
[4]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[5]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва 119991, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: marnya3491@Ya.ru

В статье представлены обобщенные результаты работ авторов по исследованию тонких пленок полуметаллов, которые можно использовать при разработке универсальных приемников электромагнитного излучения. Показано, что тонкопленочные материалы на основе полуметаллов обладают высокой термочувствительностью, низким уровнем собственных шумов и повышенным коэффициентом поглощения излучения в миллиметровой области спектра. Образцы пленок висмута и системы висмут–сурьма были получены методом вакуумно-термического напыления. Было проведено исследование термоэлектрических свойств тонких пленок системы висмут–сурьма в интервале температур от температуры жидкого гелия до комнатной, с целью применения данных пленок в виде чувствительного элемента болометрического типа в диапазоне от инфракрасного до радиочастотного. Представлены схема и описание экспериментальной установки для измерения

вольтамперных характеристик и величины сопротивления образцов в интервале температур 1.4–400 К. В ходе исследования были получены вольтамперные характеристики и зависимости сопротивления образцов пленок толщиной 80 и 20 нм от температуры. Были измерены характеристики изготовленного макетного приемника и на их основе сделаны оценочные расчеты по возможности разработки приемников болометрического типа с повышенной пороговой чувствительностью. Измерена пороговая чувствительность (NEP – Noise Equivalent Power) изготовленных приемников на частоте 147 ГГц, которая при комнатной температуре составляет $\approx(0.3\div1)\cdot10^{-9}$ В Гц$^{1/2}$ и может быть существенно улучшена при охлаждении приемника до температур жидкого азота и жидкого гелия.

Ключевые слова: излучение миллиметрового диапазона, болометрический приемник, пленки полуметаллов.

Для цитирования: Кик М.А., Голоколенов И.А., Сигов А.С., Шиляев А.А., Завьялов В.В., Вербицкий С.С., Целебровский А.Н. Термочувствительные тонкопленочные элементы на основе полуметаллов для приемников электромагнитного излучения. *Российский технологический журнал.* 2019;7(6):105-121. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-105-121

Thin-film heat-sensitive elements on the basis of semimetals for electromagnetic radiation receivers

Mikhail A. Kik[1],
Ilya A. Golokolenov[2,3],
Aleksandr S. Sigov[4],
Anatoly A. Shilyaev[4,5,@],
Vitaly V. Zavyalov[2,3],
Sergey S. Verbitsky[5],
Aleksey N. Tselebrovsky[5]

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
[2]P.L. Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow 117334, Russia
[3]National Research University Higher School of Economics, Moscow 101000, Russia
[4]MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[5]N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: marnya3491@Ya.ru

The paper presents the generalized results of the authors' work on the study of thin films of semimetals, which can be used in the development of universal electromagnetic radiation receivers. It is shown that thin-film materials based on semimetals have high thermal sensitivity, low intrinsic noise and an increased absorption coefficient of radiation in the millimeter region of the spectrum. Samples of bismuth films and bismuth–antimony films were obtained by vacuum thermal spraying. A study was made on the thermoelectric properties of bismuth–antimony thin films in the range from liquid helium temperature

to room temperature in order to use these films as a bolometric type sensitive element in the range from infrared to radio frequency. A scheme and description of experimental installations for measuring current-voltage characteristics and determining the resistance of samples in the temperature range 1.4–400 K are presented. In the course of the study, the current-voltage characteristics and the temperature dependences of the resistance of film samples with a thickness of 80 and 20 nm were obtained. The characteristics of the manufactured prototype receiver were measured and used as a basis for estimating the possibility of developing bolometric-type receivers with increased NEP (Noise Equivalent Power). The NEP of the manufactured receivers at a frequency of 147 GHz was measured at room temperature and appeared to be $\approx(0.3\div1)\cdot10^{-9}$ $Hz^{1/2}$. This NEP value can be improved by cooling the receiver to liquid nitrogen or helium temperatures.

Keywords: millimeter wave radiation, bolometer, films of semimetals.

For citation: Kik M.A., Golokolenov I.A., Sigov A.S., Shilyaev A.A., Zavyalov V.V., Verbitsky S.S., Tselebrovsky A.N. Thin-film heat-sensitive elements on the basis of semimetals for electromagnetic radiation receivers. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):105-121 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-105-121

Введение

Наиболее универсальными по применению считаются тепловые приемники (болометры), с помощью которых можно регистрировать излучение практически любой длины волны в видимом, инфракрасном (ИК), субмиллиметровом (СММ) и миллиметровом (ММ) диапазонах. Существует возможность разработки и создания оптико-электронных систем визуализации изображений во всех упомянутых диапазонах электромагнитного спектра [1–8].

Дальнейшее улучшение характеристик тепловизионных систем сдерживается отсутствием планомерных работ в данном направлении, в частности, отсутствием исследований фундаментальных физических принципов, реализуемых при разработке тепловизионных систем. В России это обусловлено резким сокращением числа физиков-исследователей по данному направлению.

В настоящее время основным фактором, сдерживающим дальнейшее развитие тепловизионных систем диагностики, является «тупиковая» ситуация, сложившаяся в области разработки матричных приемников излучения. Большинство используемых в данной области материалов и технологических приемов практически исчерпали свои возможности, поэтому дальнейшее улучшение потребительских свойств тепловизионных систем возможно только благодаря поиску новых физических принципов поглощения энергии и ее преобразования, новых материалов, а также принципиально новых конструкционных и технологических решений.

В представленной работе дано обобщение основных фундаментальных результатов, касающихся разработки матричных тепловых приемников излучения (МПИ) – основного элемента тепловизионной системы, которые были получены авторами с участием академиков А.М. Прохорова и А.С. Сигова [9–11].

Проведен аналитический обзор литературных источников, что позволило выявить факторы, сдерживающие развитие и совершенствование современной тепловизионной техники, а также заключить, что при выборе основного объекта исследования необходимо отдать предпочтение матричному приемнику излучения, что даст возможность улучшить в итоге все основные параметры тепловизоров.

Тепловизионные системы инфракрасного диапазона

К настоящему времени зарубежные фирмы, несмотря на сильное противодействие фирм-производителей фотонных приемников, достаточно полно решили «стартовую» проблему создания ИК-тепловизора (основная длина волны 10 мкм) на основе МПИ. Однако технические параметры этих тепловизоров еще далеки от предельных. Основные факторы, позволившие создать матричные приемники и видеокамеры на их основе, – это технология микромеханики, которая применяется для создания различных микроминиатюрных конструкций в кремнии, основном материале микроэлектроники, а также успехи в области вычислительной техники.

В основу разработок положен модульный принцип построения тепловизора, основным конструкционным элементом которого является фотоприемный модуль (ФПМ), содержащий МПИ и интегральную схему считывания (ИСС) и предварительной обработки сигналов.

Исследования состояния стандартных разработок ФПМ проведены на модельных тестовых структурах на предприятии «Орион» и достаточно полно изложены в статье [1], а также представлены в обширной литературе последних лет [см., например, 2–7], где главным образом рассматриваются вопросы, связанные с совершенствованием ИСС, в то время как разработка чувствительных элементов (ЧЭ) микроболометров осталась на уровне 2002 г.

Общие недостатки, характеризующие уровень исследований тепловых приемников ИК-излучения, заключаются в следующем:

– отсутствует необходимое теоретическое и экспериментальное обоснование их работы;

– применяются поликристаллические тонкопленочные термочувствительные материалы, которые при высокой термочувствительности обладают недопустимо высоким уровнем шумов;

– используются малоэффективные поглощающие излучение тонкопленочные покрытия.

Тепловизионные системы СММ- и ММ-диапазонов

Миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны электромагнитного излучения подлежат обязательному освоению в части конструирования радарных и тепловизионных систем, так как этот интервал длин волн совмещает преимущества оптического (высокая степень направленности) и радиочастотного (высокая проникающая способность через диэлектрические преграды) диапазонов.

В обнаружительных приборах, где используется СММ-диапазон, вероятно, наиболее заинтересованы службы безопасности, ведущие борьбу со всеми видами преступности, так как с его помощью можно обнаруживать предметы, скрытые под одеждой человека (без активной подсветки на расстоянии ~10 и более метров), и просматривать грузы на таможнях, в аэропортах и т. д. (активные системы).

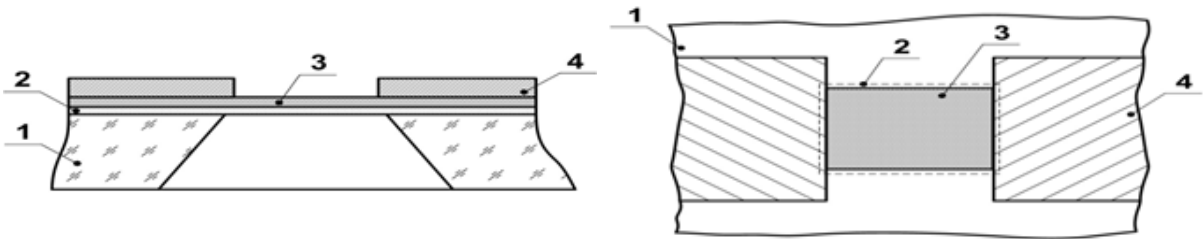
Имеется, по нашему мнению, неудачная попытка создания тепловизора для обнаружения скрытых предметов под одеждой человека с использованием однопиксельного приемника, изготовленного из сверхпроводящего пленочного материала, работающего только при глубоком охлаждении (температура жидкого гелия) в узком температурном диапазоне (рабочая температура приемника должна быть стабилизирована с точностью ~0.02 K). Изображение было получено сканированием объекта и составило 30 мин [8].

Примером использования миллиметрового диапазона может послужить тепловизор фирмы *QINETIQ* (Великобритания), рассчитанный на частоту 94 ГГц, где в качестве приемников (детекторов) используются низкоразмерные малогабаритные линейки рупоров, нагруженных на диоды Шоттки. В рекламном проспекте фирмы представлено изображение объекта, полученное с помощью сканирования. Время получения кадра составляет несколько минут. Представлен рисунок с изображением объекта, полученного с помощью обычной видеокамеры без запыленности, а также с изображением объекта с помехой (запыленность), полученного с помощью тепловизора миллиметрового диапазона. В последнем случае видимость удовлетворительная, но такой тепловизор очень сложен в изготовлении и эксплуатации и имеет низкое быстродействие.

Анализ требований, предъявляемых к характеристикам отдельных пикселей матричных тонкопленочных болометров

В основе работы болометра лежат свойства термочувствительного элемента (ТЧЭ), который меняет свое сопротивление при поглощении падающего на него внешнего излучения из-за нагрева. В роли этого элемента могут выступать различные материалы (платина, никель, кремний, окись ванадия и т. д.), и, как правило, они представляют собой тонкие пластины (пленки), расположенные на подложке для механического крепления. Нами было решено исследовать тонкие пленки Bi и $Bi_{88}Sb_{12}$ на их пригодность в роли ТЧЭ для вышеупомянутых диапазонов. Именно эти материалы при определенных условиях могут иметь высокую термочувствительность при низком уровне внутренних шумовых сигналов, а также дают возможность изготовления пленок с коэффициентом поглощения излучения ~70%. Используя результаты, приведенные в описаниях патентов [9–11] и анализируя данные, представленные в литературе [1–8], можно получить перечень необходимых характеристик материалов, необходимых для разработки и изготовления приемников с параметрами, близкими к предельным. Вначале проведем анализ некоего модельного болометра (рис. 1).

На рис. 1 схематично представлен тонкопленочный приемный элемент (ПЭ) приемника прямоугольной формы. В общем случае он представляет собой тонкую пленку площади S, равной $2a \cdot 2b$, где $2a$ и $2b$ – длины сторон прямоугольника. ПЭ расположен на тонкой мембране с теплопроводностью K_1 и температуропроводностью χ_1, которая, в свою очередь, расположена на массивной подложке с теплопроводностью K_2 и температуропроводностью χ_2. Роль массивной подложки выполняет воздух.



а б

Рис. 1. Схема тонкопленочного приемного элемента (ПЭ) приемника прямоугольной формы: вид сбоку (а); вид сверху (б). 1 – кремниевая подложка; 2 – несущая мембрана; 3 – ТЧЭ; 4 – контакты.

В этой конструкции болометра тонкопленочный ПЭ одновременно выполняет роль поглотителя излучения и ТЧЭ, при этом площадь ТЧЭ равна площади, на которой происходит поглощение энергии. Сам ТЧЭ изготавливается в виде пленки полуметалла Bi или $Bi_{88}Sb_{12}$. Наши измерения показали, что при таком соотношении висмута и сурьмы, как в $Bi_{88}Sb_{12}$, обеспечивается максимальный температурный коэффициент сопротивления (ТКС) с известным коэффициентом поглощения излучения в ИК-, СММ- и ММ-диапазонах. Пленка нанесена на мембрану из $SiO_2 + Si_3N_4$, полиимида или слюды на кремниевой подложке, но кремний из-под мембраны вытравлен. Эта мембрана служит для механического крепления ее к подложке. При этом мы считаем, что теплоотток от ТЧЭ происходит в основном в воздух и достаточно мал, и нагрев ПЭ, площадь которого S, внешним излучением оказывается высоким.

Воспользовавшись данными, приведенными в описаниях патентов [9–11], запишем асимптотическое выражение зависимости температурного отклика $T(t)$ от времени t (усредняя по площади S температуру $T(x, y; t)$, при учете распространения тепла от ТЧЭ во все трехмерное пространство), когда на ПЭ падает излучение с плотностью потока

$$P(t) = \begin{cases} 0, t < 0 \\ P_0, t \geq 0 \end{cases}, \tag{1}$$

$$T(t) = \frac{1}{S}\iint_S T(x, y, t)dxdy = \frac{P_0}{2\pi K_2} L \text{ при } t >> \tau, \tag{2}$$

где τ – быстродействие приемника (время выхода величины $T(t)$ на стационарное значение при воздействии на него импульсом энергии ступенчатой формы), а L – некоторый характерный размер приемника:

$$L = \frac{4}{ab}\left\{b^2 a \cdot \ln\left(\frac{a}{b} + \sqrt{1 + \frac{a^2}{b^2}}\right) + a^2 b \cdot \ln\left(\frac{b}{a} + \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}}\right) + \frac{1}{3}\left(a^3 + b^3 - \sqrt{\left(a^2 + b^2\right)}\right)\right\}. \tag{3}$$

Асимптотические значения для (2) и (3) можно получить при выполнении условия $S/(\chi_2 t) >> 1$. Выражение для вольт-ваттной чувствительности W можно записать:

$$W = \frac{A\Delta U}{P_1} = \frac{AU_0 \alpha L}{2\pi K_2}. \tag{4}$$

Здесь A – коэффициент поглощения приемным элементом излучения, U_0 – напряжение смещения на болометре (при включении болометра по схеме генератора тока), α – ТКС, $P_1 = P_0 \cdot S$.

Теперь возможно сформулировать условия изготовления приемника для регистрации энергии P в полосе частот Δf с минимальным значением NEP (Noise Equivalent Power) – мощности по отношению к шуму.

$$NEP = \frac{U_{\text{ш}}}{W}, \tag{5}$$

где $U_{\text{ш}}$ – сигнал шума на болометре.

Из (4) и (5) следует необходимость применения в приемнике материалов с высоким значением величины A в рабочем диапазоне длин волн $\Delta\lambda$ (например, в ИК-области спектра этот интервал занимает область от 8 до 14 мкм), напряжение смещения на болометре также должно быть максимальным, откуда автоматически вытекает требование увеличения сопротивления болометров R_0 (до сотен кОм). Необходимо также минимальное значение $U_{ш}$ в рабочей полосе частот Δf. То есть тонкопленочный ТЧЭ должен быть изготовлен в виде монокристальной пленки, в которой отсутствуют низкочастотные шумы типа $1/f$, и при разработке матричных модулей приемников оказывается возможным полностью использовать режим накопления сигнала (уменьшение полосы Δf). Напомним, что предельно минимальным шумом является шум Найквиста–Джонсона

$$U_{Ш}^2 = 4kTR_0\Delta f \ , \qquad (6)$$

здесь k – постоянная Больцмана.

Необходимым требованием является также однородность физических (электрических, теплофизических и оптических) параметров приемников в матрице.

Экспериментальные исследования

Было проведено исследование термоэлектрических свойств тонких пленок системы висмут–сурьма $Bi_{88}Sb_{12}$ в интервале температур от температуры жидкого гелия до комнатной, с целью применения данных пленок в виде чувствительного элемента болометрического типа в диапазоне от инфракрасного до радиочастотного.

Свойства одного и того же материала в виде пленки и массивного кристалла могут кардинально отличаться, тем самым определяя его практическое применение. С уменьшением толщины пленок, как правило, снижается температура плавления, изменяется механическая плотность и электросопротивление, кристаллическая структура, а также могут проявляться абсолютно новые эффекты, связанные с увеличением влияния поверхностной энергии. Свойства монокристаллических и поликристаллических пленок также могут серьезно отличаться. Пленки висмута и системы висмут–сурьма могут использоваться как преобразователи сигналов в различных низкоразмерных структурах вследствие их необычных физических свойств, как то высокая чувствительность к температурным, механическим и магнитным изменениям. Эти свойства объясняются в первую очередь электронной структурой полуметалла. Тонкопленочные висмутовые структуры хорошо подходят на роль чувствительного элемента в болометрах из-за высокого значения ТКС, и, кроме того, они могут эффективно поглощать излучение в диапазоне от инфракрасного до радиочастотного.

В наших исследованиях по напылению тонких пленок была выбрана, в основном, система $Bi_{88}Sb_{12}$. Висмут и сурьма являются полностью взаимозамещаемыми в кристаллической решетке: они имеют очень близкие температуры возгонки и давления насыщенных паров. Таким образом, можно считать, что в процессе термического напыления они испаряются одновременно и занимают ячейки в кристаллической решетке с вероятностью, равной их массовой концентрации в лодочке испарителя. По этой причине объемная концентрация сурьмы остается постоянной во всем образце. Массовая доля сурьмы в 12% выбрана в связи с тем, что именно при такой концентрации наблюдается самая большая ширина запрещенной зоны [12].

Схема установки для измерения зависимости физических характеристик тонкопленочных образцов от температуры

Температурная зависимость электропроводности тонкопленочных образцов позволяет определить тип проводимости (металл/полуметалл/полупроводник/диэлектрик/сверхпроводник) и по форме этой зависимости оценить их качество.

Для проведения измерений была собрана экспериментальная установка, схема и фотография которой изображены на рис. 2 и 3.

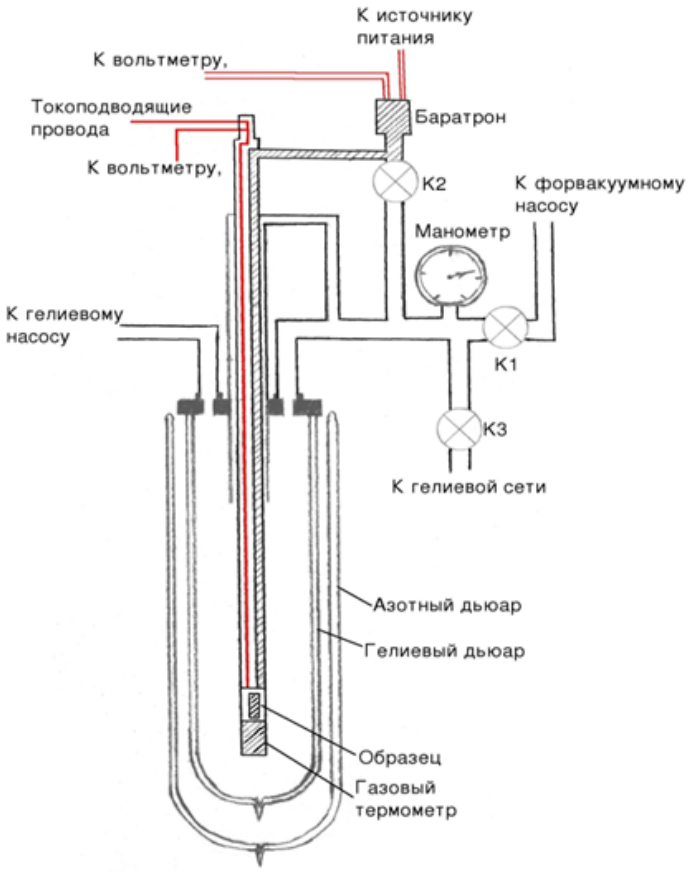


Рис. 2. Схема установки для измерения вольтамперных характеристик и величины сопротивления образцов в интервале температур 1.4–400 K.

Измерение вольтамперных характеристик и определение сопротивления образцов проводились по четырехпроводной схеме при помощи функционального генератора Agilent-33220A и мультиметра Keithley-2000 с 10-ти-канальным мультиплексором. Эти приборы имеют интерфейсы дистанционного управления, что позволило проводить измерения с помощью компьютера.

Для проведения температурных измерений мы использовали два стеклянных сосуда Дьюара. Образец помещали на плоскую медную стенку нижней камеры газового термометра объемом V_2, который можно было поднимать над поверхностью налитого во внутренний сосуд жидкого гелия, изменяя таким образом его температуру в диапазоне 100–4.2 K. Во внешний сосуд был залит жидкий азот. Температуры в диапазоне 1.3–4.2 K достигались путем откачки паров жидкого гелия. При работе в диапазоне 400–90 K жид-

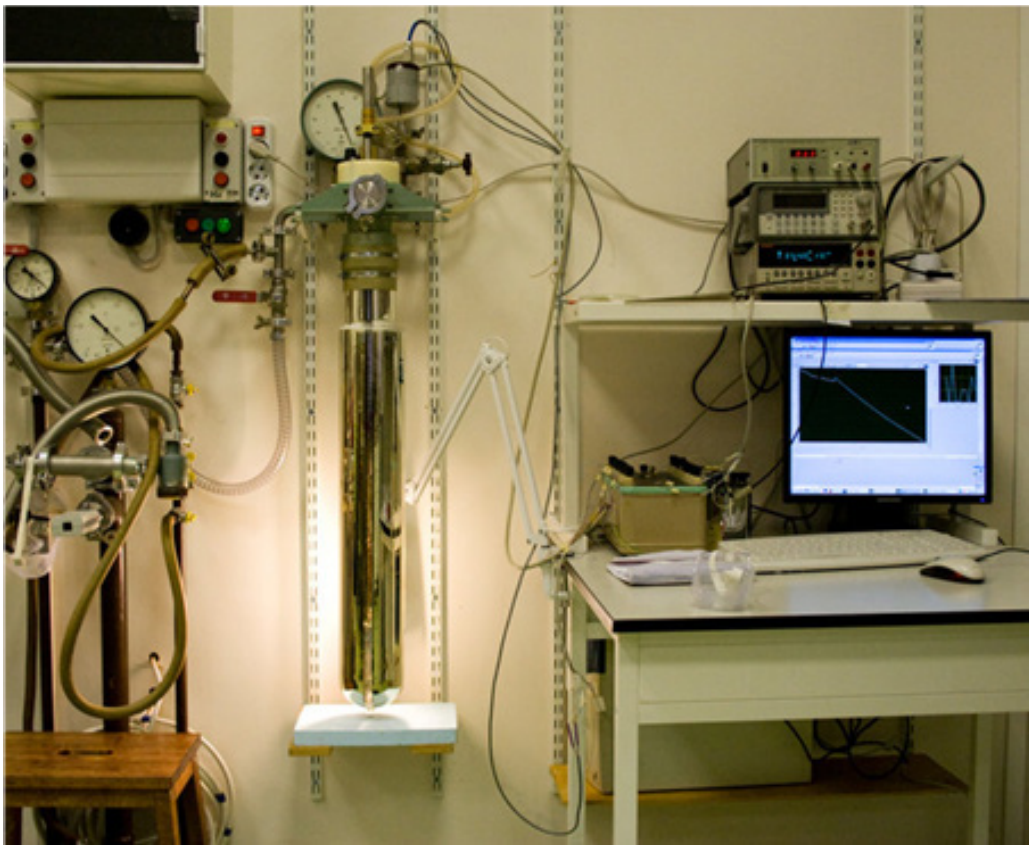


Рис. 3. Установка для измерения вольтамперных характеристик и величины сопротивления образцов в интервале температур 1.4–400 K.

кий гелий во внутренний сосуд не наливали, а заполняли его газообразным гелием. При этом охлаждение образца обеспечивалось залитым во внешний сосуд жидким азотом.

Толстостенный медный экран (на рисунке не показан) окружал нижнюю камеру объемом V_2 газового термометра вместе с закрепленным на ней образцом, что обеспечивало равенство температур образца и камеры и давало возможность проводить непрерывные измерения непосредственно в процессе охлаждения/отогрева прибора.

Давление в газовом термометре измеряли абсолютным мембранным манометром с объемом V_1 (Baratron-626B13TDE, диапазон 0–1000 Торр, разрешение 0.001 Торр), соединенным с нижней камерой объемом V_2 никелевым капилляром диаметром 1 мм и толщиной стенки 0.2 мм. Перед началом работы газовый термометр заполняли чистым газообразным гелием при нормальных условиях. Температура нижней камеры термометра вычислялась по уравнению Менделеева–Клапейрона, калибровка термометра заключалась в вычислении приборной константы V_1/V_2 при двух реперных температурах камеры: комнатной и 4.2 K (температуре жидкого гелия, находящегося при атмосферном давлении). Газовый термометр обеспечивал измерение температуры образца в диапазоне 4–400 K. При необходимости измерения температур в диапазоне 1.3–4 K манометр (Baratron-626B13TDE) открывали на измерение давления насыщенных паров гелия в дьюаре и температуру определяли по стандартной шкале («Шкалы температурные практические», ГОСТ 8.157-75). Программный модуль пересчета температур приведен на рис. 4.

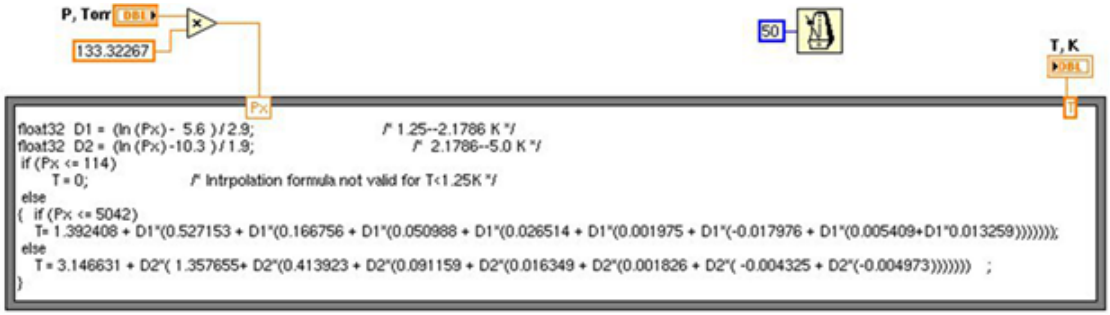


Рис. 4. Программный модуль пересчета температур.

Нами была разработана компьютерная система управления и сбора данных на основе лицензионной платформы LabVIEW-8.6, установленной на компьютере с операционной системой Linux (Gentoo). Управление и получение информации с приборов Agilent-33220A и Keithley-2000 было организовано по GPIB-шине. Написанная на графическом языке LabView программа для измерения вольтамперных характеристик образца и температуры (см. рис. 5) обеспечивала запись измеренных значений в файл данных в течение всего цикла изменения температуры. Обработка данных, анализ и построение графиков программировались на свободном скриптовом языке GnuPlot.

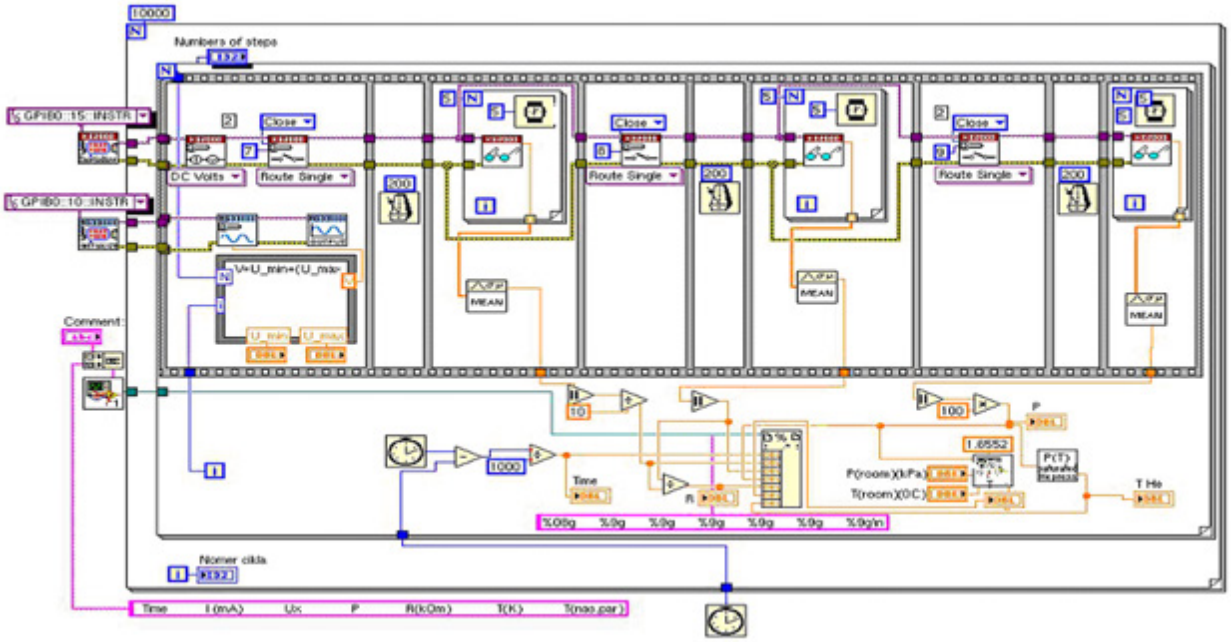


Рис. 5. Программа управления и измерения вольтамперных характеристик
в зависимости от температуры образца, написанная на графическом языке LabView.

Изготовление образцов пленок

Методика роста эпитаксиальных пленок висмута подробно описана в монографии [12], она позволила нам получить стабильные, содержащие минимальное количество дефектов пленки Bi и $Bi_{88}Sb_{12}$, ось C_3 которых ориентирована по нормали к пленке с точностью более 0.1°.

Образцы были получены методом вакуумно-термического напыления [12]. Нагрев смеси порошков $Bi_{88}Sb_{12}$, помещенной в вольфрамовую «лодочку», производили при

температуре ~800 °С. Данное соотношения висмута и сурьмы выбрано по той причине, что при таком количестве сурьмы в висмуте он становится диэлектриком в массивном образце. На расстоянии ~15 см от «лодочки» расположен нагреватель с подложкой, температура которой составляет 95 °С. За счет нагрева смеси в «лодочке» происходит испарение, и $Bi_{88}Sb_{12}$ наносится на подложку. Аналогично производили напыление образцов из чистого висмута.

Температуру нагревателя с подложкой измеряли платиновым термометром сопротивления, а температуру «лодочки» контролировали по ее цвету (см. [7]). В итоге для изучения электрических свойств были получены пленки напылением Bi и $Bi_{88}Sb_{12}$ на подложки из пластинок слюды, $SiO_2 + Si_3N_4$ и полиимида с толщиной от 20 до 200 нм. Все изготовленные образцы имели форму прямоугольника с общей длиной 6 мм, а ширина варьировалась от 0.2 до 3 мм.

Контакты к образцам также изготавливали термическим напылением последовательно: слой хрома толщиной ~10 нм, слой золота толщиной ~100 нм. Хром необходим для обеспечения адгезии контактных площадок к образцам.

Для измерения спектральных характеристик пленок висмута и $Bi_{88}Sb_{12}$ размеры образцов обычно составляли 40×40 мм^2.

Кристаллографическую структуру полученных пленок изучали с помощью рентгеновского дифракционного анализа. На рис. 6 представлены рентгеновские дифрактограммы пленок Bi толщиной 15, 35 и 150 нм на мусковите, снятые в геометрии θ–2θ. Наблюдаются интенсивные рефлексы (00l), l =2, 4, 6 и т. д. от мусковита и рефлексы (00l), l = 3, 6 и т. д. от висмута. Эти данные подтверждают как монокристалличность подложки и пленки Bi, так и ориентацию плоскостей (00l) параллельно поверхности пленки. При этом для Bi и мусковита использовались данные о симметрии и параметрах их элементарных ячеек, взятые из базы данных ICDD по Bi (файл 44-1246: пр. гр. R-3m, a = 0.4547, c = 1.1861 нм) и мусковиту (файл 85-1855: пр. гр. P3112, a = 0.5215, c = 2.9755 нм). Относительная интенсивность рефлекса (003) от висмута понижается с уменьшением толщины пленки, тем не менее этот рефлекс уверенно промеряется и на пленке толщиной 15 нм.

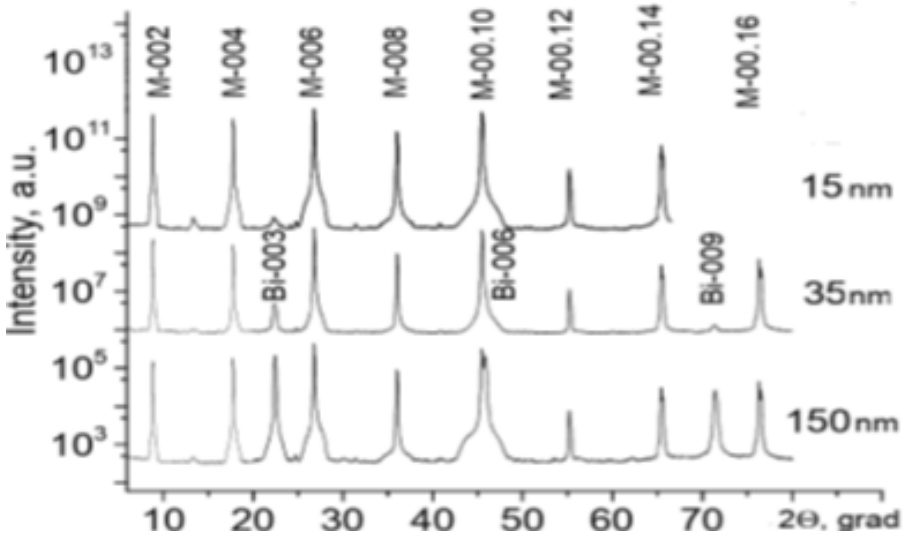


Рис. 6. Рентгеновские дифрактограммы пленок Bi толщиной 15, 35 и 150 нм на подложках мусковита, снятые в геометрии θ–2θ.

Вольтамперные характеристики и зависимости сопротивления тонкопленочных образцов от температуры

В ходе исследования были получены вольтамперные характеристики (ВАХ) и зависимости сопротивления образцов пленок толщиной 80 и 20 нм от температуры.

Здесь представлены наиболее удачные результаты измерений (ВАХ) и зависимость величины ТКС от температуры. Для дальнейших обсуждений мы считаем достаточным приведение результатов только этих измерений. Графики ТКС строились по аппроксимациям кривых $R(T)$ полиномами 5-ой степени.

Серия образцов пленок толщиной 80 нм проявила наибольшую стабильность при измерениях и наилучшую повторяемость результатов, кроме того, результаты оказались в хорошем соответствии (характер кривых идентичен) с результатами схожих измерений, полученных для подобных образцов пленок толщиной 2 мкм в более ранних работах, проводимых в нашей лаборатории. ВАХ этих образцов в измеренном диапазоне (±2 мА) оказались линейными с высокой точностью, таким образом, этот факт позволяет утверждать, что пленки Bi и $Bi_{88}Sb_{12}$ находятся в состоянии «металл».

ВАХ образцов пленок $Bi_{88}Sb_{12}$ толщиной ~20 нм содержат стабильную нелинейность, которая с понижением температуры становится более ярко выраженной (см. рис. 7). В связи с этим обстоятельством для такого образца нельзя ввести нормальное понятие электрического сопротивления, однако можно формально рассмотреть зависимость сопротивления от температуры при постоянном токе (либо напряжении); в нашем случае мы выбрали ток I = 1 мА для измерения ТКС. Измерения проводились на импульсах с шириной 5 мс с задержкой от начала импульса в 1 мс. На графике зависимости ТКС $\alpha = \frac{1}{R}\frac{dR}{dT}$ представлен участок вблизи комнатной температуры и для ВАХ в интервале от температуры жидкого гелия до комнатной.

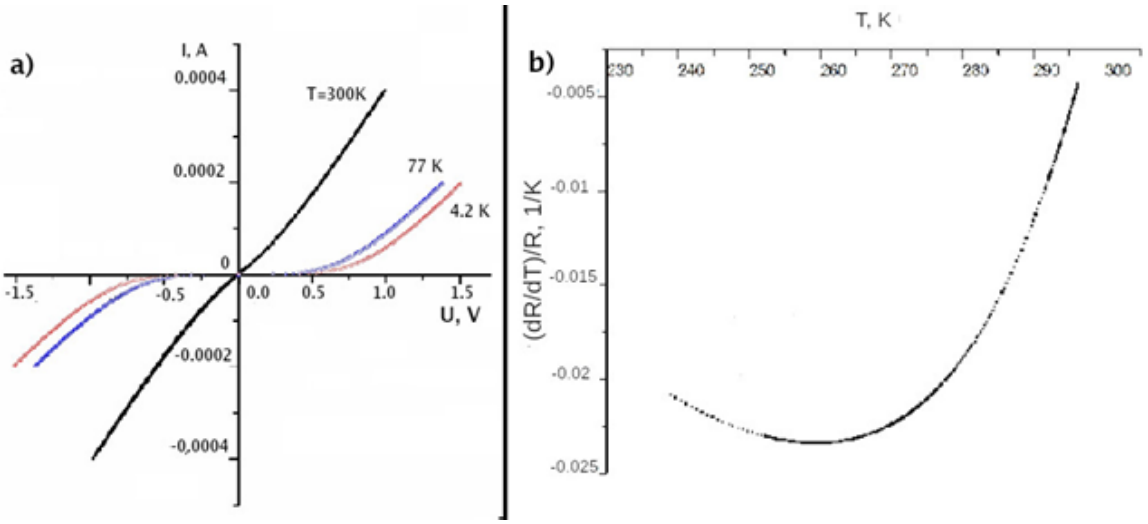


Рис. 7. ВАХ пленок $Bi_{88}Sb_{12}$ толщиной ~ 20 нм (a);
зависимость величины ТКС $\alpha = \frac{1}{R}\frac{dR}{dT}$ от температуры (b).

Из нелинейности ВАХ пленок $Bi_{88}Sb_{12}$ толщиной ~20 нм при низких температурах и сглаживания кривой зависимости I(U) при комнатной температуре следует вывод, что электропроводность пленки носит активационный характер с энергией активации E ~ 0.02 эВ, а величина ТКС таких пленок при понижении температуры может быть увеличена на порядки. ТКС полупроводников оценивается из формулы:

$$\alpha = \frac{1}{R}\frac{dR}{dT} = \frac{E}{kT}\frac{1}{T} \tag{7}$$

Из [12] известно, что максимальное значение ТКС, полученное при исследовании висмутовых образцов, составляет величину менее процента.

Приемник электромагнитного излучения

Макетный приемник излучения был изготовлен по следующей схеме. ПЭ (в данном случае пленка $Bi_{88}Sb_{12}$ толщиной ~30 нм) был напылен на слой SiO_2 + Si_3N_4 толщиной ~2 мкм, который предварительно был выращен на кремнии. ПЭ в данном случае совмещает в себе две функции: поглотитель внешнего излучения и ТЧЭ. Эта чувствительная часть зажата между двумя пластинами кремния Si толщиной ~400 мкм, в которых имеются пирамидоидальные отверстия для пропуска излучения к ТЧЭ. Описанная система помещается на третью, цельную пластину кремния Si, на которую предварительно напылен алюминий Al толщиной ~300 нм, имеющий очень высокий коэффициент отражения и выступающий в роли зеркала, чтобы доля излучения, падающая на ПЭ, поглощалась максимально. Фотография и схема приемника и представлены на рис. 8 и 9.

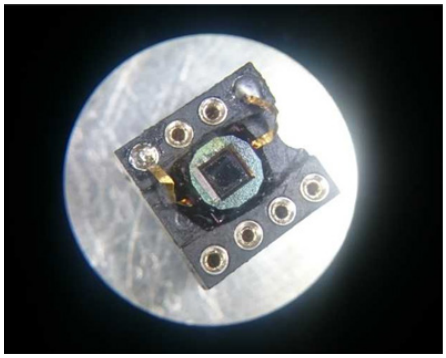


Рис. 8. Увеличенная фотография чипа размером 4.5× 4.5 мм приемника.

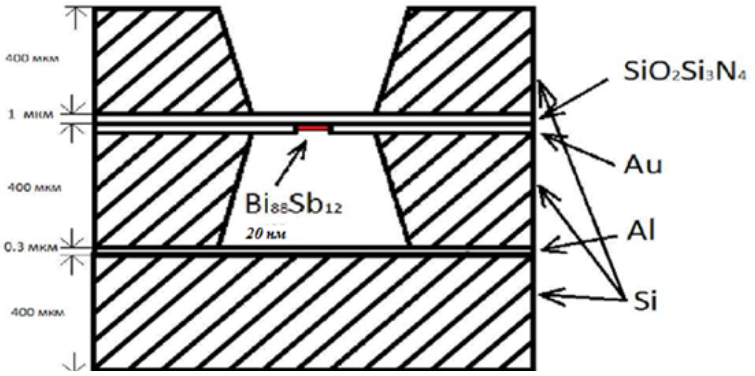


Рис. 9. Устройство приемника (эскиз). Конструкция разработана и изготовлена по МЭМС-технологии [3] болометра.

На основе проведенных исследований нами были измерены характеристики изготовленного макетного приемника и на их основе сделаны оценочные расчеты по возможности разработки приемников болометрического типа с повышенной пороговой чувствительностью (NEP).

Измерения NEP проводились с использованием высокочастотного генератора Г4-161 на частоте 147 ГГц по методике, описанной в [11, 13]. Результаты измерений представлены в таблице.

Характеристики изготовленного макетного приемника

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Толщина пленки $Bi_{88}Sb_{12}$	нм	~30
Коэффициент поглощения излучения	%	67
Температурный коэффициент сопротивления	%	2
Рабочая температура	К	275
Сопротивление болометра	кОм	130
Напряжение смещения на болометре	В	15
Напряжение шума (в полосе 1 Гц)	нВ	≈46
Вольт-ваттная чувствительность	В/Вт	160
Пороговая чувствительность (NEP)	$Вт/Гц^{1/2}$	$\approx(0.3\div1)\cdot10^{-9}$

Непосредственные измерения NEP приемника при температурах, близких к температуре жидкого гелия, не проводились. Тем не менее, нетрудно получить расчетную оценку для NEP, используя полученные экспериментальные данные для пленок и приемника при температуре 275 K, а также формулы (1)–(7).

Из этих оценок следует, что при низких температурах достижимы значения NEP $\sim10^{-11}$–10^{-14} В $Гц^{1/2}$.

Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору А.А. Бушу (кафедра наноэлектроники РТУ МИРЭА) за рентгеноскопическое исследование образцов.

Работа выполнена при поддержке РТУ МИРЭА в рамках инициативной научно-исследовательской работы ИЦМР-13.

Литература:

1. Андрюшин С.Я., Кравченко Н.В., Кулыманов А.В., Либерова Г.В., Таубкин И.И., Тришенков М.А., Филачев А.М., Эскин Ю.М. Состояние разработок микроболометрических матриц в Государственном научном центре «НПО Орион» // Прикладная физика. 2000. № 5. С. 5–17.

2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего типа». М.: «ЛОГОС», 2004. 443 с.

3. Lianjun Sun, Benkang Chang, Junju Zhang. Analysis and measurement of thermal-electrical performance of microbolometer detector // Proceedings of the SPIE. 2007. V. 6782. Optoelectronic Materials and Devices II, 678231. https://doi.org/10.1117/12.745347

4. Ufuk Senveli S., Yusuf Tanrikulu M., Tayfun Akin. A thermal conductance optimization approach for uncooled microbolometers // Proceedings SPIE. 2011. V. 8012. Infrared Technology and Applications XXXVII, 80121T. https://doi.org/10.1117/12.890234

5. Dumas M.J., Lail B.A. A parametric analysis of microbolometer pixel designs // Proceedings SPIE. 2011. V. 8155. Infrared Sensors, Devices and Applications, Single Photon Imaging II, 815517. https://doi.org/10.1117/12.894170

6. Sun L., Chang B., Zhang J., Qian Y., Qiu Y. Thermal and electrical performance of α-Si microbolometer focal plane arrays» // Proceedings SPIE. 2007. V. 6423. 64232D. https://doi.org/10.1117/12.779855

7. Gauntt J.Li, Cabarcos O.M., Basantani H.A., Venkatasubramanian C., Bharadwaja S.S.N. Microstructure of vanadium oxide used in microbolometers // Proceedings SPIE. 2011. V. 8012. Infrared Technology and Applications XXXVII, 80123T. https://doi.org/10.1117/12.884161

8. Luukanen A., Miller A.J. and Grossman E.N. Passive hyperspectral terahertz imagery for security screening using a cryogenic microbolometer // Proceedings SPIE. 2005. 5789. P. 127–134. https://doi.org/10.1117/12.608838

9. Прохоров А.М., Шиляев А.А., Валиев К.А. и др. Датчик для регистрации плотности потока энергии электромагнитного излучения. Авторское свидетельство № 1225342, декабрь 1985.

10. Емохонов В.Н., Клягин А.С., Тальрозе В.Л., Шиляев А.А. Приемник электромагнитного излучения: патент 1 825 246 РФ. № 4641108/25; заявл. 26.12.1988; опубл. 10.04.1995.

11. Кик М.А., Шиляев А.А., Сигов А.С., Шампаров Е.Ю., Завьялов В.В., Богомолов Г.Д., Емохонов В.Н., Терехова Е.В., Шиляева А.А., Денискин В.В. Широкополосный измерительный приемник излучения миллиметрового диапазона с независимой калибровкой: патент 2 616 721 РФ. № 2015154123; заявл. 17.12.2015.; опубл. 18.04.2017. Бюл. № 11.

12. Комник Ю.Ф. Физика металлических плёнок. М.: Атомиздат, 1979. 263 с.

13. Кик М.А., Шиляев А.А., Сигов А.С., Емохонов В.Н., Завьялов В.В., Шампаров Е.Ю., Денискин В.В. Приемник для измерения мощности электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2015. Т. 15. № 4. С. 164–169.

References:

1. Andryushin S.Ya., Kravchenko N.V., Kulymanov A.V., Liberova G.V., Taubkin I.I., Trishenkov M.A., Filachev A.M., Eskin Yu.M. The state of development of microbolometric matrices at the State Scientific Center "NPO Orion". *Prikladnaya fizika* = Applied Physics. 2000;5:5-17 (in Russ.).

2. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. "Looking type" infrared systems. M.: LOGOS Publ., 2004. 443 p. (in Russ.).

3. Lianjun Sun, Benkang Chang, Junju Zhang. Analysis and measurement of thermal-electrical performance of microbolometer detector. In: Proceedings of the SPIE. 2007. V. 6782. Optoelectronic Materials and Devices II, 678231. https://doi.org/10.1117/12.745347

4. Ufuk Senveli S., Yusuf Tanrikulu M., Tayfun Akin. A thermal conductance optimization approach for uncooled microbolometers. In: Proceedings SPIE. 2011. V. 8012. Infrared Technology and Applications XXXVII, 80121T. https://doi.org/10.1117/12.890234

5. Dumas M.J., Lail B.A. A parametric analysis of microbolometer pixel designs. In: Proceedings SPIE. 2011. V. 8155. Infrared Sensors, Devices and Applications, Single Photon Imaging II, 815517. https://doi.org/10.1117/12.894170

6. Sun L., Chang B., Zhang J., Qian Y., Qiu Y. Thermal and electrical performance of α-Si microbolometer focal plane arrays. In: Proceedings SPIE. 2007. V. 6423. 64232D. https://doi.org/10.1117/12.779855

7. Gauntt J.Li, Cabarcos O.M., Basantani H.A., Venkatasubramanian C., Bharadwaja S.S.N. Microstructure of vanadium oxide used in microbolometers. In: Proceedings SPIE. 2011. V. 8012. Infrared Technology and Applications XXXVII, 80123T. https://doi.org/10.1117/12.884161

8. Luukanen A., Miller A.J. and Grossman E.N. Passive hyperspectral terahertz imagery for security screening using a cryogenic microbolometer. In: Proceedings SPIE. 2005. V. 5789. P. 127-134. https://doi.org/10.1117/12.608838

9. Prokhorov A.M., Shilyaev A.A., Valiev K.A. [et al.] A sensor for detecting the energy flux density of electromagnetic radiation. Copyright certificate No. 1225342, December 1985.

10. Emokhonov V.N., Klyagin A.S., Talrose V.L., Shilyaev A.A. Electromagnetic radiation receiver: patent RU 1825246. No. 4641108/25; filled December 24, 1988; publ. October 04, 1995.

11. Kik M.A., Shilyaev A.A., Sigov A.S., Shamparov E.Yu., Zavyalov V.V., Bogomolov G.D., Emokhonov V.N., Terekhova E.V., Shilyaeva A.A., Deniskin V.V. Independently calibrated millimeter-wave radiation measuring receiver: patent 2 616 721 RF (in Russ.).

12. Komnik Yu.F. Physics of metal films. M.: Atomizdat Publ., 1979. 263 p. (in Russ.).

13. Kik M.A., Shilyaev A.A., Sigov A.S., Emokhonov V.N., Zav'yalov V.V., Shamparov E.Yu., Deniskin V.V. A receiver for measuring the power of electromagnetic radiation in a wide range of wavelengths. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya* = Fundamental problems of radioengineering and device construction. 2015;15(4):164-169 (in Russ.).

Об авторах:

Кик Михаил Андреевич, старший научный сотрудник, кафедра квантовой электроники, физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, МГУ). E-mail: prostokik@mail.ru

Голоколенов Илья Алексеевич, старший научный сотрудник, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (117334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2); старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (101000, Россия, Москва, Мясницкая ул., д. 20). E-mail: undante@mail.ru

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, доктор физ.-мат. наук, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru; Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017

Шиляев Анатолий Алексеевич, кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4); старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78) E-mail: marnya3491@yandex.ru

Завьялов Виталий Вадимович, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (117334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2); старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (101000, Россия, Москва, Мясницкая ул., д. 20). E-mail: v_zav@mail.ru

Вербицкий Сергей Сергеевич, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4). E-mail: verbitvs@gmail.com

Целебровский Алексей Николаевич, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4). E-mail: anzeleb@gmail.com

About the authors:

Mikhail A. Kik, Senior Researcher, Chair of Quantum Electronics, Physics Faculty, Lomonosov Moscow State University (119991, Russia, Moscow, Russia, Leninskie gory). E-mail: prostokik@mail.ru

Ilya A. Golokolenov, Senior Researcher, Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences (2, ul. Kosygina, Moscow 119334, Russia); Senior Researcher, National Research University Higher School of Economics (20, Myasnitskaya ul., Moscow 101000, Russia). E-mail: undante@mail.ru

Aleksandr S. Sigov, Academician, Dr. of Sci. (Phys.-Math.), President of the MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia); Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017. E-mail: sigov@mirea.ru

Anatoly A. Shilyaev, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, ul. Kosygina, Moscow 119991, Russia); Senior Researcher, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: marnya3491@yandex.ru

Vitaly V. Zavyalov, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences (2, ul. Kosygina, Moscow 119334, Russia); Senior Researcher, National Research University Higher School of Economics (20, Myasnitskaya ul., Moscow 101000, Russia). E-mail: v_zav@mail.ru

Sergey S. Verbitsky, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, ul. Kosygina, Moscow 119991, Russia). E-mail: verbitvs@gmail.com

Aleksey N. Tselebrovsky, Cand. of Sci. (Phys.-Math.) Senior Researcher, Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, ul. Kosygina, Moscow 119991, Russia). E-mail: anzeleb@gmail.com

ISSN 2500-316X (Online)

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-122-133

CC BY

УДК 53.084

Многоэлементный приемник для субмиллиметрового диапазона с пленочным чувствительным элементом на основе полуметаллов в тепловизорах смотрящего типа

М.А. Кик[1],
Г.Д. Богомолов[2],
А.С. Сигов[3],
А.А. Шиляев[3,4,@],
В.В. Завьялов[2,5],
С.С. Вербицкий[4],
А.Н. Целебровский[4]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ), Москва 119991, Россия
[2]Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (ИФП), Москва 117334, Россия
[3]МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[4]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН Москва 119991, Россия
[5]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва 101000, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: marnya3491@Ya.ru

Рассмотрены перспективы разработки многоэлементных приемников для субмиллиметрового диапазона (СММ) с пленочным чувствительным элементом на основе полуметаллов в тепловизорах смотрящего типа (TV-СММ). Электромагнитные волны СММ-диапазона обладают высокой проникающей способностью через различные диэлектрические материалы, что дает возможность разработки тепловизора, с помощью которого можно обнаруживать и наблюдать предметы через самые разнообразные преграды: ткани, картон, дерево и т.д. В статье обобщены ранее полученные результаты исследований по разработке приемников излучения. Исходя из проведенных теоретических и экспериментальных исследований, обзора научно-технической и патентной литературы, в данной работе в качестве

чувствительного элемента выбран терморезистивный преобразователь на основе монокристальных пленок материалов в переходном состоянии металл–узкозонный полупроводник–диэлектрик. Для определения возможностей использования тонкопленочного Bi и $Bi_{1-x}Sb_x$ в качестве поглотителя терагерцового излучения, а также полиимидной пленки в качестве увеличивающего поглощение просветляющего покрытия были проведены измерения спектров пропускания и спектров отражения пленок монокристаллического Bi, выращенных на полиимидной подложке толщиной 12 мкм. Измерения были выполнены на установке, использующей селективный прием излучения при циклотронном резонансном поглощении в InSb, которая регистрирует тепловое излучение образцов материалов в диапазоне от 1 до 5 ТГц со спектральным разрешением 0.6 ТГц. Изготовлены макетные образцы приемников и измерены их характеристики, характеристики с помощью сконструированного стенда, в котором использован лазер, генерирующий излучение в СММ-области спектра. Пороговая чувствительность (NEP – noise equivalent power) предложенных приемников составила величину порядка $(4\div6)\ 10^{-11}$ Вт/Гц$^{1/2}$.

Ключевые слова: излучение терагерцового диапазона, болометрический приемник, пленки полуметаллов, лазер на парах воды.

Для цитирования: Кик М.А., Богомолов Г.Д., Сигов А.С., Шиляев А.А., Завьялов В.В., Вербицкий С.С., Целебровский А.Н. Многоэлементный приемник для субмиллиметрового диапазонас пленочным чувствительным элементом на основе полуметаллов в тепловизорах смотрящего типа. *Российский технологический журнал*. 2019;7(6):122-133. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-122-123

Multi-element receiver with semimetal film sensing element for the submillimeter thermal imagers of viewing type

Mikhail A. Kik[1],
Genrikh D. Bogomolov[2],
Aleksandr S. Sigov[3],
Anatoly A. Shilyaev[3,4,@],
Vitaly V. Zavyalov[2,5],
Sergey S. Verbitsky[4],
Aleksey N.Tselebrovsky[4]

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991,
[2]P.L. Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow 117334, Russia
[3]MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[4]N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia
[5]National Research University Higher School of Economics, Moscow 101000, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: marnya3491@Ya.ru

Prospects of developing multi-element receivers for the submillimeter range (SMM) on the basis of thin-film semimetallic sensitive bolometers are considered. Electromagnetic

waves of the SMM band have a high penetrating power and allow developing a thermal imager for the detection and observation of objects through various materials: fabrics, cardboard, wood, etc. The previously obtained research results are summarized. On the basis of the theoretical and experimental studies and of a review of scientific, technical and patent literature, in this work, a thermoresistive converter based on single-crystal films of materials in the metal – narrow-bandgap semiconductor – dielectric transition state is selected as a sensitive element. To determine the possibilities of using thin-film Bi and Bi–Sb system as an absorber of terahertz radiation, as well as a polyimide film as an absorption-enhancing antireflection coating, the transmission spectra and reflection spectra of single-crystal Bi films grown on a 12 μm thick polyimide substrate were measured. The measurements were performed on a setup using selective radiation reception at cyclotron resonance absorption in InSb, which records the thermal radiation of material samples in the range from 1 to 5 THz with a spectral resolution of 0.6 THz. The design and characteristics of the model receiver are presented. The experimental setup was performed using a terahertz gas-discharge laser. The NEP of the proposed receiver is $\sim(4 \div 6)\cdot 10^{-11}\,\mathrm{W/Hz^{1/2}}$.

Keywords: terahertz radiation, bolometric receiver, semimetal films, water vapor laser.

For citation: Kik M.A., Bogomolov G.D., Sigov A.S., Shilyaev A.A., Zavyalov V.V., Verbitsky S.S., Tselebrovsky A.N. Multi-element receiver with semimetal film sensing element for the submillimeter thermal imagers of viewing type. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):122-133 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-122-133

Введение

Диапазон длин волн электромагнитного излучения в интервале 1.0–0.1 мм называют субмиллиметровым, а соответствующие частоты 300–3000 ГГц относят к терагерцовому диапазону. До настоящего времени исследования в субмиллиметровом (СММ) диапазоне носят в значительной мере академический характер и связаны с изучением фундаментальных характеристик веществ. Достаточно полное представление о состоянии и направлении исследований в СММ-диапазоне дает монография [1], в которой приведены многочисленные ссылки на работы ученых из разных стран.

Начиная с 1990-х годов, в этой области стали появляться работы, которые носят прикладной характер. Это обусловлено значительным возрастанием уровня в разработке и создании новых полупроводниковых материалов на основе гетероструктур и развитием процессов нанолитографии в микроэлектронике.

Хорошо известно, что электромагнитные волны СММ-диапазона обладают высокой проникающей способностью через различные материалы. Именно этот факт дал возможность разработать и создать тепловизор, работающий в СММ-диапазоне (ТВ-СММ), с помощью которого можно обнаруживать и наблюдать предметы через самые разнообразные преграды: ткани, картон, дерево и т. д. [2]. В таком приборе, вероятно, наиболее заинтересованы службы безопасности, ведущие борьбу со всеми видами преступности, и, в частности, провозом контрабандных товаров, так как его наличие позволяет обнаруживать предметы, скрытые под одеждой человека (без активной подсветки), и просматривать грузы на таможнях, в почтовых отделениях аэропортах и т. д. (активные системы).

Прибор, описанный в [2], не найдет широкого применения, так как время получения одного кадра составляет 30 мин. Это связано с тем, что изображение скрытого под

одеждой человека предмета получено сканированием одиночным приемником. Однако результаты, полученные в [2], дают возможность получить и уточнить параметры матричного приемника, необходимые для разработки ТВ-СММ. В работе будет показано, что применение тонкопленочных монокристальных материалов на основе полуметаллов позволяет разработать и изготовить широкополосный приемник на весь СММ-диапазон.

1. Требования к характеристикам приемника. Необходимая пороговая чувствительность отдельного пикселя в матричном приемнике

Для решения этой задачи необходимо оценить величину плотности потока энергии F от различно нагретых участков поверхности «черного» тела с элементарной площадки ΔS в пределах малого телесного угла $\Delta\Omega$ в направлении, образующего с нормалью к поверхности угол $\theta \approx \pi/2$. Считая, что излучение происходит в полупространство, запишем формулу для оценки величины F в дифференциальном виде [3]:

$$dF = B\Delta\Omega d\omega = \frac{c}{2\pi} U(\omega, T)\Delta\Omega d\omega \cdot \quad (1)$$

Здесь B – яркость объекта; c – скорость света; $U(\omega, T)$ – функция распределения энергии в спектре излучения черного тела:

$$U(\omega, T) = \left(\frac{\hbar}{\pi^2 c^3}\right)\left(\exp\frac{\hbar\omega}{kT} - 1\right)^{-1} \cdot \omega^3 d\omega \quad (2)$$

частота $\omega = 2\pi c/\lambda$, где λ – длина волны; T – температура; k – постоянная Больцмана. Показатель экспоненты в (2) приближенно равен единице при T = 300 K и λ = 48 мкм. Поэтому экспоненту в (2) для СММ-диапазона можно записать:

$$\exp(\hbar\omega/kT) \approx 1 - \hbar\omega/kT \, .$$

Подставив это выражение в (2) и сделав замену переменной $\omega \to \dfrac{2\pi c}{\lambda}$, проинтегрируем выражение (1) по λ. Окончательно для величины F получим выражение:

$$F = \frac{2}{3} kTc\left[(1/\lambda_1)^3 - (1/\lambda_2)^3\right] \cdot \Delta\Omega \, . \quad (3)$$

Это выражение представляет собой формулу Джинса для плотности потока энергии, излучаемого черным телом в телесный $\Delta\Omega$ в интервале длин волн от λ_1 до λ_2. При температуре T_0 = 300 K в единицах Вт/см^2 формула (3) примет вид:

$$F \approx 8.3 \cdot 10^{-11}\left[(1/\lambda_1)^3 - (1/\lambda_2)^3\right] \cdot \Delta\Omega \ \text{[Вт/см}^2\text{]} \quad (4)$$

Для разницы в плотности потока энергии ΔF от различных участков черного тела с температурным контрастом ΔT можно записать: $\Delta F = F \cdot \Delta T/T_0$.

Если сфокусировать это излучение на приемник с помощью линзы диаметром D = 0.5 м, находящейся на расстоянии L = 3 м от объекта, то $\Delta\Omega = \pi(D/2L)^2 \approx 0.022$ (входной зрачок системы).

В этом случае

$$F \approx 1.8 \cdot 10^{-12} \left[\left(1/\lambda_1\right)^3 - \left(1/\lambda_2\right)^3 \right] \cdot \Delta\Omega \ [\text{Вт/см}^2]. \quad (5)$$

В табл. 1 приведены значения величин F и ΔF, полученные с использованием формулы (5), для различных температурных контрастов и величин λ_1.

Таблица 1. Значения величин F и ΔF (Вт/см^2), рассчитанные по формуле (5), для различных температурных контрастов и величин λ_1 (при $\lambda_2 \sim 1$ мм)

ΔT, K	λ_1 = 100 мкм		λ_1 = 200 мкм		λ_1 = 300 мкм	
	F	ΔF	F	ΔF	F	ΔF
3	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-10}$
6	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$1.4 \cdot 10^{-9}$
8	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$

Из анализа таблицы следует, что плотность потока излучения в рассматриваемом нами случае в интервале длин волн $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ достаточно велика и для разработки матричных СММ-приемников не обязательно использовать такие материалы, как сверхпроводники [2]. Необходимость осуществлять их индивидуальную термостабилизацию в узком температурном диапазоне (~0.02 K) при криогенных температурах не дает возможности для широкого их применения в разработках тепловизоров смотрящего типа. Здесь будет показано, что в этом случае могут быть использованы тонкопленочные материалы на основе $Bi_{1-x}Sb_x$. Эти материалы обладают уникальными свойствами. В зависимости от концентрации Sb и толщины пленки они могут находиться в состояниях металл, узкозонный полупроводник и металлическое состояние, в котором электроны представляют собой двумерный Ферми-газ [4–6]. Полуметаллы могут быть использованы в приемниках одновременно и как термочувствительные элементы (ТЧЭ), и в качестве поглощающих излучение структур.

Нами получены тонкопленочные материалы с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) $\alpha_1 = 2\%$ при температурах, близких к комнатной, и с $\alpha_1 \sim 100\%$ при температуре жидкого гелия. ТЧЭ в болометрах могут быть изготовлены с высоким сопротивлением (100 кОм и более), что дает возможность подавать на приемник повышенное напряжение смещения и увеличить вольт-ваттную чувствительность. В [2] представлен приемник, работающий при температуре вблизи сверхпроводящего перехода, у которого величина ТКС (1/град.) $\alpha_2 = 1000\%$. Выбор материала с большим значением α_2 нужен для повышения чувствительности приемника. Приемник, изготовленный из сверхпроводника, является низкоомным, и во избежание перегрева измерительным током напряжение смещения V_2 на нем составляет ~1 мВ. Вольт-ваттная чувствительность W приемников болометрического типа определяется, в основном, произведением $V \cdot \alpha$. Отношение величины $V \cdot \alpha$, полученной из измерений на материалах, предложенных нами (при напряжении смещения $V = 3$ В на испытуемом сопротивлении $R = 100$ кОм при температуре 230 K), к такой же величине для случая, описанного в [2], $W_2/W_1 = V_2 \cdot \alpha_2 / V_1 \cdot \alpha_1 = 6$. При температуре жидкого гелия эта величина увеличится приблизительно на два порядка. В то же время для тонкопленочных болометров на основе $Bi_{1-x}Sb_x$ существует возможность изготовления матрицы, в которой отсутствует (или сведен к минимуму) разброс физических характеристик отдельных пикселей.

2. Анализ спектров материалов

Нами были проведены предварительные эксперименты по изучению свойств пленок в терагерцовой области спектра в качестве моделирования этой ситуации. Результаты для пленки Bi представлены на рис. 1.

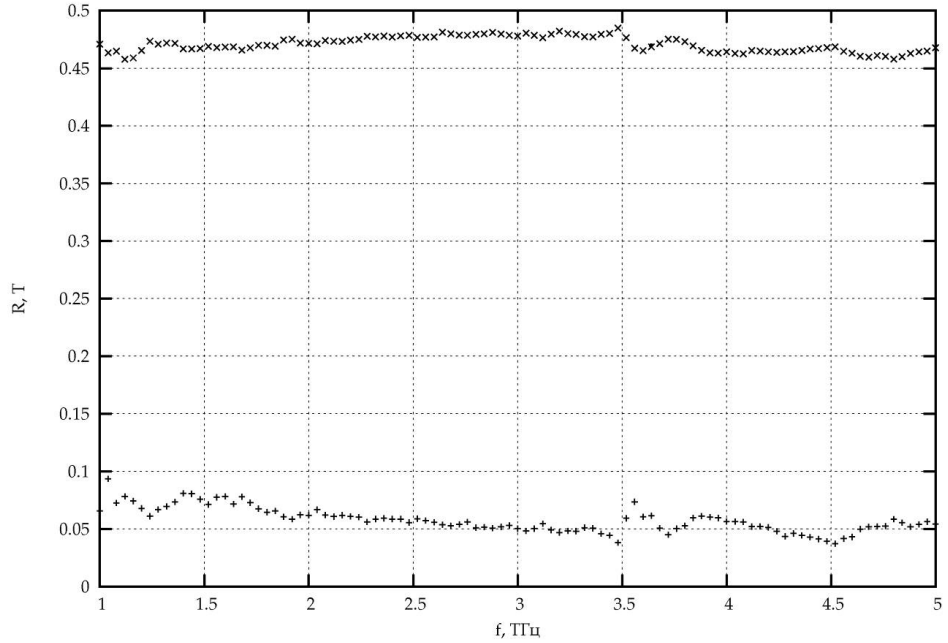


Рис. 1. Спектр пропускания (символ «×») и отражения (символ «+») пленки Bi толщиной 36 нм на полиимидной подложке толщиной 12 мкм. Излучение падает со стороны подложки.

Для определения возможностей использования тонкопленочных Bi и $Bi_{1-x}Sb_x$ в качестве поглотителя терагерцового излучения, а также полиимидной пленки в качестве увеличивающего поглощение просветляющего покрытия были проведены измерения спектров пропускания и спектров отражения пленок монокристаллического Bi, выращенных на полиимидной подложке толщиной 12 мкм.

Измерения были выполнены на установке, использующей селективный прием излучения при циклотронном резонансном поглощении в InSb, которая регистрирует тепловое излучение образцов материалов в диапазоне от 1 до 5 ТГц со спектральным разрешением 0.6 ТГц [7].

Полный анализ спектров дал возможность выбрать конструкцию поглощающей пленки Bi с просветляющей пленкой полиимида + воздушный зазор. На основании данного анализа было также установлено, что показатель преломления полиимида $n = 1.8$.

В итоге был изготовлен тонкопленочный болометр (П-СММ1) по предложенному нами способу, описанному в [8], в котором удалось достичь величины поглощения по всей площади приемника излучения в терагерцовом диапазоне ~70%.

Для испытаний приемников, а также исследования отражательных и поглощающих свойств материалов в СММ-области спектра нами был изготовлен стенд, в котором используется газоразрядный лазер на парах воды с мощностью излучения до 10 мВт [9]. Оптическая часть стенда представлена на рис. 2.

Рис. 2. Терагерцовая часть стенда: локация объекта.

Используемый газоразрядный лазер облучает объект, подвешенный на блоке вращения, слабо расходящимся пучком терагерцового излучения. Отраженное от объекта излучение регистрируется охлажденным до температуры жидкого гелия Ge-приемником, расположенным на нижнем конце лучевода, погруженного в транспортный гелиевый криостат. Излучение направляется на приемник юстируемым зеркалом, расположенным на верхнем конце лучевода.

Для увеличения чувствительности регистрация отраженного от объекта излучения производится модуляционным методом. Для этого применен зеркальный механический модулятор, конструкция которого позволяет направлять часть лазерного излучения через полиэтиленовую линзу на опорный пироэлектрический приемник излучения. Блок-схема измерительной части стенда приведена на рис. 3.

Исследуемый объект подвешивался на тонких нитях и приводился во вращательное движение вокруг вертикальной оси при помощи *механизма вращательного подвеса*, собранного на основе шагового двигателя FL28STH45. Питание двигателя обеспечивается функциональным генератором Agilent3322a, управляемым по программе от компьютера. Сигналы с пироэлектрического приемника (опорный канал) и с охлаждаемого Ge-приемника (рабочий канал) усиливаются узкополосными усилителями Unipan-233, настроенных на частоту модуляции механического модулятора, и поступают на многоканальный вольтметр Keithley-2000, осуществляющий оцифровку сигналов и передачу их на компьютер.

Для передачи данных используется стандарт GPIB.

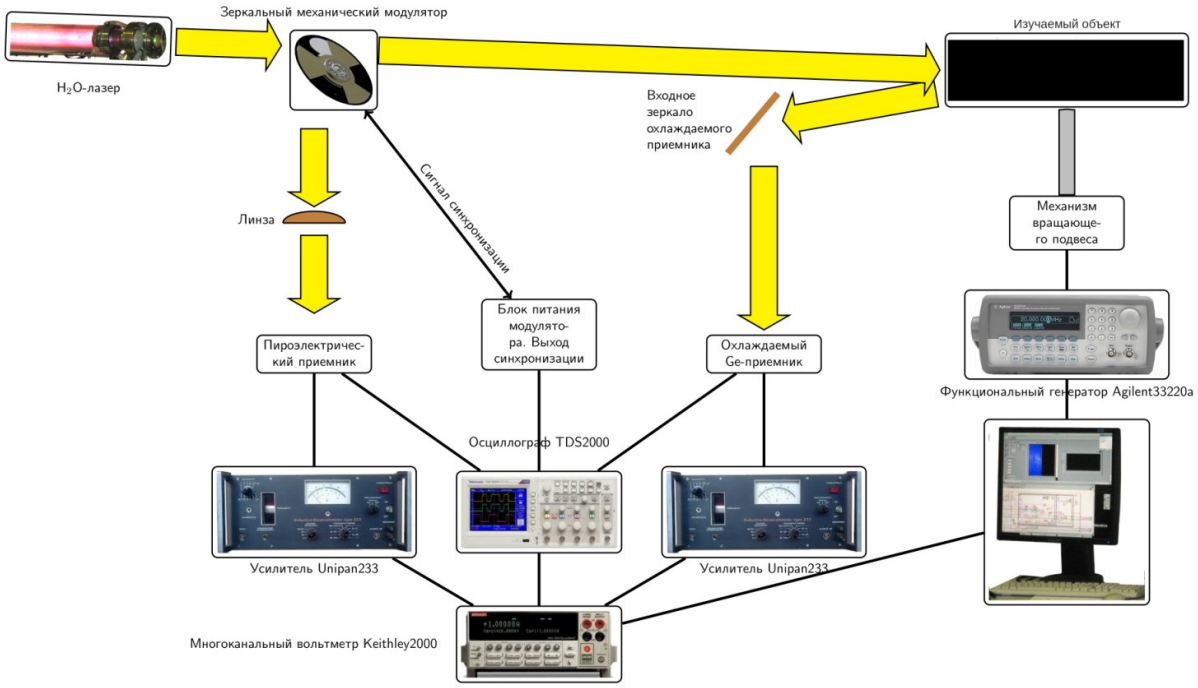


Рис. 3. Блок-схема измерительной части стенда.

3. Источник терагерцового излучения [9]

Лазерная генерация в терагерцовом диапазоне при разряде в парах воды возникает на переходах между вращательными уровнями, на которые расщеплены колебательные уровни молекулы воды.

В режиме непрерывного излучения от лазера на парах воды можно получить генерацию на следующих длинах волн (табл. 2).

Таблица 2. Возможные длины волн непрерывного излучения лазера на парах воды

	$H_2O + H_2$									$D_2O + D_2$			
λ, мкм	28.0	33.0	47.2	55.1	78.4	79.1	115	118.6	220	71.9	84.3	107.7	171.7

Регулируя давление и соотношение компонент газовой смеси и настраивая длину резонатора лазера, можно с одним и тем же выходным зеркалом получить генерацию как на одной, так и одновременно на нескольких длинах волн (см. рис. 4).

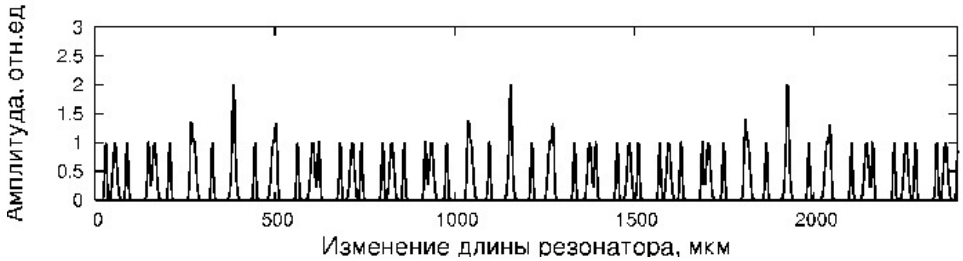


Рис. 4. Возбуждение волн с λ = 78.4, 118 и 220 мкм при изменении длины резонатора.

Расходимость лазерного луча и распределение мощности по его сечению. Эти величины определяются типом (модой) возбужденного в резонаторе лазера колебания. Для основного TEM00-колебания распределение мощности по сечению азимутально симме-

трично и имеет радиальный гауссовский профиль $1 - \exp(r/r(l))^2$ с шириной $r(l)$, вычисляемой по формулам:

$$r(l) = r_0\left(1 + l^2 \Big/ \left(LR - L^2\right)\right)^{1/2},\ r_0 = \left(\left(LR - L^2\right)^{1/2} \times \lambda/4\pi\right)^{1/2}, \quad (6)$$

где l – расстояние от плоскости рассматриваемого сечения до плоского зеркала; r_0 – радиус сечения пучка на плоском зеркале; L – расстояние между плоским и сферическим зеркалами; R – радиус кривизны сферического зеркала.

Практический интерес представляет $r_{99}(l) \approx 2.146\ r(l)$ – радиус сечения пучка в границах, содержащих 99% его мощности, изображенный на рис. 5. Для представляемого в данной работе лазера $R = 7$ м, $L = 3.4$ м, и радиус r_0 сечения пучка на плоском зеркале для длин волн 118.6 и 220 мкм составляет соответственно 0.57 и 0.78 см.

Рис. 5. Гауссовый профиль пучка излучения лазера, рассчитанный на уровне $1/e^2$ потока.

При широкой апертуре резонатора лазера для коротких длин волн, кроме основного TEM_{00}-колебания, могут возбуждаться и высшие типы: TEM_{01} и TEM_{10}, которые легко идентифицировать и отфильтровывать при перестройке длины лазерного резонатора.

Наличие стенда, в котором применяется лазер терагерцового диапазона, позволило нам более надежно протестировать и оценить характеристики экспериментальных макетов болометров, изготовленных нами как предварительный вариант пикселя для матричных приемников, так как в этом случае отсутствуют фоновые помехи.

4. Измерение характеристик болометров (П-СММ1)

Перед испытанием на место пироэлектрического приемника ставился болометр для измерения мощности электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн [10] и производилась калибровка стенда. Поток излучения модулировался с частотой 3 Гц. Далее, используя уже прокалиброванный стенд, мы измеряли вольт-ваттную чувствительность W и пороговую чувствительность, то есть величину $NEP = V_ш/W$, где $V_ш$ – величина шума термочувствительного элемента в полосе 1 Гц.

Характеристики приемника П-СММ1:

сопротивление $R_0 = 130$ кОм;

площадь приемной площадки $S = 1$ мм^2;

чувствительность $W = 400$ В/Вт;

пороговая чувствительность $NEP = (4 \div 6)\ 10^{-11}$ Вт/Гц$^{1/2}$.

5. Пропускание тканями электромагнитного излучения в коротковолновой части СММ-диапазона

В [11] достаточно полно представлены экспериментальные данные по пропусканию тканей в терагерцовой области спектра. Авторами показано, что величина T при частотах от 1 до 5 ТГц принимает значения от 10 до 30%. Эти результаты подтверждены и нами при измерениях на стенде.

Предложенный приемник П-СММ1 является широкополосным. Он может использоваться для регистрации излучения от инфракрасной области спектра до 200 ГГц. Это важно использовать при разработке ТВ-СММ, так как контрастная яркость ΔF увеличивается с уменьшением длины волны по закону ~ $1/\lambda^3$.

Заключение

Исходя из проведенных теоретических и экспериментальных исследований, обзора научно-технической и патентной литературы, в данной работе в качестве чувствительного элемента выбран терморезистивный преобразователь на основе монокристальных пленок материалов в переходном состоянии металл–узкозонный полупроводник–диэлектрик. Одним из таких материалов могут служить пленки висмута (Bi+Sb), полученные в условиях, благоприятствующих образованию кристаллической структуры, с размерами кристаллитов, превосходящими характерные размеры структурных элементов преобразователя. Кроме того, должна быть правильно подобрана толщина таких пленок и учтена зависимость квантового состояния электронов от ширины структурных элементов термочувствительного элемента. Конструкция пикселя должна также соответствовать структуре организации матрицы как с расположением ее на кристалле схемы считывания сигнала (технология chip-on-chip), так и при ее организации с внешним опросом сигнала.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РТУ МИРЭА в рамках инициативной научно-исследовательской работы ИЦМР-13.

Литература:

1. Субмиллиметровая диэлектрическая спектроскопия твердого тела / отв. ред. Г.В. Козлов. М.: Наука, 1990. 221 с.

2. Luukanen A., Miller A.J., Grossman E.N. Passive hyperspectral terahertz imagery for security screening using a cryogenic microbolometer // Proceedings of the SPIE. 2005. V. 5789. P. 127–134. https://doi.org/10.1117/12.608838

3. Королев Ф.А. Теоретическая оптика. М.: Высшая школа, 1966. 557 с.

4. Baba S., Sugawara H., Kinbara A. Electrical resistivity of thin bismuth films // Thin Solid Films. 1976. V. 31. № 3. P. 329–335. https://doi.org/10.1016/0040-6090(76)90379-5

5. Ando Y. Topological Insulator Materials // J. Phys. Soc. Jap. 2013. V. 82. Iss. 10. P.102001-32. https://doi.org/10.7566/JPSJ.82.102001

6. Chu H.T. Comment on “Semimetal-to-semiconductor transition in bismuth thin films” // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. Iss. 8. P. 5532–5534. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.5532

7. Богомолов Г.Д., Завьялов В.В., Зотова Е.А., Шампаров Е.Ю. Быстродействующий перестраиваемый детектор излучения субмиллиметрового диапазона на циклотронном резонансе в InSb // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 1. С. 87–95.

8. Шиляев А.А., Емохонов В.Н., Сигов А.С., Шиляева А.А., Фомина Л.Ф., Денискин В.В., Иванов А.А., Кик М.А. Наноструктурированный ИК-приемник (болометр) с большой поверхностью поглощения: патент RU 2511275. № 2012129709/28; заявл. 16.07.2012; опубл. 10.04.2014. Бюл. № 10.

9. Завьялов В.В., Богомолов Г.Д. Стабильный газоразрядный лазер на парах воды с генерацией ортогональных поляризаций // Приборы и техника эксперимента. 1982. Т. 25. № 3. С. 174–179.

10. Кик М.А., Шиляев А.А., Сигов А.С., Емохонов В.Н., Завьялов В.В., Шампаров Е.Ю., Денискин В.В. Приемник для измерения мощности электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2015. Т. 15. № 4. С. 164–169.

11. Родэ С.В., Шампаров Е.Ю. Влияние влаги на терагерцовые спектры тканей // Дизайн и технологии. 2011. № 24 (66). С. 70–76.

References:

1. Submillimeter dielectric spectroscopy of a solid. Ed. By G.V. Kozlov. M.: Nauka Publ., 1990. 221 p.

2. Luukanen A., Miller A.J., Grossman E.N. Passive hyperspectral terahertz imagery for security screening using a cryogenic microbolometer. *Proceedings of the SPIE.* 2005;5789:127-134. https://doi.org/10.1117/12.608838

3. Korolev F.A. Theoretical optics. M.: Vysshaya shkola Publ., 1966. 557 p. (in Russ.).

4. Baba S., Sugawara H., Kinbara A. Electrical resistivity of thin bismuth films. *Thin Solid Films*. 1976;31(3):329-335. https://doi.org/10.1016/0040-6090(76)90379-5

5. Ando Y. Topological Insulator Materials. *J. Phys. Soc. Jap.* 2013;82(10):102001-32. https://doi.org/10.7566/JPSJ.82.102001

6. Chu H.T. Comment on "Semimetal-to-semiconductor transition in bismuth thin films". *Phys. Rev. B.* 1995;51(8):5532-5534. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.5532

7. Bogomolov G.D., Zav'yalov V.V., Zotova E.A., Shamparov E.Yu. A Fast tunable detector of submillimeter waves on cyclotron resonance in an InSb crystal. *Instruments and Experimental Techniques.* 2002;45(1):78-86. https://doi.org/10.1023/A:1014560528347

8. Shilyaev A.A., Emokhonov V.N., Sigov A.S., Shilyaeva A.A., Fomina L.F., Deniskin V.V., Ivanov A.A., Kik M.A. Nanostructured IR receiver (bolometer) with a large absorption surface: patent RU 2511275. No. 2012129709/28; filled July 16, 2012; publ. April 10, 2014 (in Russ.).

9. Zav'yalov V.V., Bogomolov G.D. A stable water-vapor discharge laser generating orthogonal polarizations. *Instruments and Experimental Technique.* 1982;25(3):708-713.

10. Kik M.A., Shilyaev A.A., Sigov A.S., Emokhonov V.N., Zav'yalov V.V., Shamparov E.Yu., Deniskin V.V. A receiver for measuring the power of electromagnetic radiation in a wide range of wavelengths. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya* = Fundamental problems of radioengineering and device construction. 2015;15(4):164-169 (in Russ.).

11. Rode S.V., Shamparov E.Yu. Effect of moisture on terahertz spectra of tissues. *Design and Technologies.* 2011;24(66):70-76 (in Russ.).

Об авторах:

Кик Михаил Андреевич, старший научный сотрудник, кафедра квантовой электроники, физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, МГУ). E-mail: prostokik@mail.ru

Богомолов Генрих Дмитриевич, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (117334 Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2). E-mail: bogomolov@kapitza.ras.ru

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, доктор физ.-мат. наук, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru; Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017

Шиляев Анатолий Алексеевич, кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4). E-mail: marnya3491@yandex.ru; старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Завьялов Виталий Вадимович, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (117334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2); старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (101000, Россия, Москва, Мясницкая ул., д. 20). E-mail: v_zav@mail.ru

Вербицкий Сергей Сергеевич, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4). E-mail: verbitvs@gmail.com

Целебровский Алексей Николаевич, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4). E-mail: anzeleb@gmail.com

About the authors:

Mikhail A. Kik, Senior Researcher, Chair of Quantum Electronics, Physics Faculty, Lomonosov Moscow State University (119991, Russia, Moscow, Russia, Leninskie gory). E-mail: prostokik@mail.ru

Genrikh D. Bogomolov, Senior Researcher, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences (2, ul. Kosygina, Moscow 119334, Russia). E-mail: bogomolov@kapitza.ras.ru

Aleksandr S. Sigov, Academician, Dr. of Sci. (Phys.-Math.), President of the MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: sigov@mirea.ru; Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017

Anatoly A. Shilyaev, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, ul. Kosygina, Moscow 119991, Russia); Senior Researcher, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: marnya3491@yandex.ru

Vitaly V. Zavyalov, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences (2, ul. Kosygina, Moscow 119334, Russia); Senior Researcher, National Research University Higher School of Economics (20, Myasnitskaya ul., Moscow 101000, Russia). E-mail: v_zav@mail.ru

Sergey S. Verbitsky, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, ul. Kosygina, Moscow 119991, Russia). E-mail: verbitvs@gmail.com

Aleksey N. Tselebrovsky, Cand. of Sci. (Phys.-Math.) Senior Researcher, Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, ul. Kosygina, Moscow 119991, Russia). E-mail: anzeleb@gmail.com

ISSN 2500-316X (Online)

https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-134-150

CC BY

УДК 519.248:54.06:678

Генетический алгоритм кластеризации

М.А. Анфёров

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: anfyorov@inbox.ru

В рамках гибридного подхода построения информационных интеллектуальных технологий поддержки принятия решений предложен генетический алгоритм кластеризации объектов анализа в различных предметных областях. Алгоритм позволяет учитывать при кластеризации различные предпочтения аналитика, отражаемые в расчетной формуле фитнес-функции. Показано место данного алгоритма среди используемых для кластерного анализа. Алгоритм является простым в его программной реализации, что повышает его надежность в использовании. Используемая технология эволюционного моделирования несколько расширена в рассматриваемом алгоритме. Во-первых, используется десятичная система счисления для кодирования хромосом в отличие от традиционной двоичной. Это вызвано множественным, а не бинарным, состоянием генов хромосомы. С этим связано отсутствие в данном алгоритме генетического оператора инверсии. Во-вторых, введен новый генетический оператор фильтрации, который отсеивает хромосомы, не удовлетворяющие условию требуемого количества кластеров в поставленной задаче. Такие хромосомы могут появляться в стохастическом процессе их эволюции. Представленный алгоритм был исследован в серии вычислительных экспериментов. В результате было выявлено, что стабилизация разбиения на кластеры достигается при числе реализованных поколений эволюции от 200 и более при сравнительно небольшом размере популяции от 150 хромосом, не требующем значительного выделения оперативной памяти компьютера. Проведенные вычисления на реальных данных показали для данного алгоритма хорошее качество кластеризации и вполне приемлемую производительность одного порядка с производительностью алгоритмов SOM и "*k*-means".

Ключевые слова: кластеризация, генетический алгоритм, интеллектуальная технология, принятие решений, вычислительный эксперимент.

Для цитирования: Анфёров М.А. Генетический алгоритм кластеризации. *Российский технологический журнал.* 2019:7(6):134-150. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-134-150

Genetic clustering algorithm

M.A. Anfyorov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author, e-mail: anfyorov@inbox.ru

The genetic algorithm of clustering of analysis objects in different data domains has been offered within the hybrid concept of intelligent information technologies development aimed to support decision-making. The algorithm makes it possible to account for different preferences of the analyst in clustering reflected in a calculation formula of fitness function. The place of this algorithm among those used for cluster analysis has been shown. The algorithm is simple in its program implementation, which increases its usage reliability. The used technology of evolutionary modeling is rather expanded in the mentioned algorithm. Firstly, the decimal chromosomes coding is used instead of the traditional binary coding. This has resulted from the fact that the chromosome genes condition is multiple and not binary. Moreover, this is due to the absence of the genetic operator of inversion in this algorithm. Secondly, a new genetic operator used for filtering has been implemented. This operator eliminates chromosomes that do not meet the required clusters quantity condition in a task. Such chromosomes can appear in the stochastic process of their evolution. The presented algorithm has been studied in a series of simulation experiments. As a result, it has been found that stabilization of splitting into clusters is reached when the number of completed generations of evolution is 200 and more, and the population size is rather small: from 150 chromosomes (in this case no considerable amount of random-access store is required). The calculations carried out on real data showed for this algorithm the high quality of clustering and the acceptable computing speed of the same order with the computing speed of SOM and “k-means” algorithms.

Keywords: clustering, genetic algorithm, intellectual technology, decision-making, computing experiment.

For citation: Anfyorov M.A. Genetic clustering algorithm *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):134-150 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-134-150

Введение

Процессы всех этапов жизненного цикла наукоемкой продукции (авиационная техника, электроника и др.) сопровождаются принятием проектных, управленческих, маркетинговых и других решений в условиях неопределенности информации, вызванной незнанием или недостаточностью данных, их неполнотой и расплывчатостью, неточностью (ошибкой) измерения или наблюдения, субъективной нечеткой оценкой. Для раскрытия этих неопределенностей в настоящее время наряду с интеллектом специалистов применяются информационные технологии поддержки искусственного интеллекта, реализующие «мягкие вычисления» с использованием нейронных сетей, генетических алгоритмов, нечетких множеств, кластеризации [1–3]. При этом наибольший эффект достигается при использовании гибридных технологий, использующих сочетание вышеназванных моделей и методов [4–6].

В информационной поддержке принимаемых решений успешно используется технология кластерного анализа в таких областях, как машиностроение [7], экономика (сегментирование рынка [8], стратегическое планирование [9], анализ кредитных рисков [10]), государственное и муниципальное управление (региональная экономическая поли-

тика [11], налоговое администрирование [12], избирательные кампании [13]), медицина [14, 15], образование [16, 17] и др. Еще более широкое распространение получила кластеризация в составе различных информационных технологий, например, распознавания изображений [18], анализа текстов [19], отражения кибератак [20].

В настоящее время использование традиционных алгоритмов кластеризации, например, итеративных ("*k*-means" [21], SOM [22] и т. д.), иерархических дивизимных (BIRCH [23], MST [24] и т. д.) и иерархических агломеративных (CURE [25], ROCK [26] и др.) сменилось гибридным подходом, предполагающим использование при кластеризации вышеназванных технологий «мягких вычислений».

Данное обстоятельство вызвано растущим количеством и сложностью задач, использующих кластеризацию, значительным увеличением объема анализируемых данных, зачастую в режиме онлайн [27]. При этом, рассматривая масштабируемые алгоритмы для работы с большим объемом данных [28, 29], следует отметить их работу с категорийными данными [30].

В настоящее время возможности кластерного анализа расширяются за счет использования наряду с традиционными новых методов (например, метод волновых преобразований в алгоритме WaveCluster [31]), объединения нескольких методов в один [32], выявления и учета при кластеризации взаимозависимости в данных [33, 34], а также за счет гибридного подхода [5, 35].

Предлагаемый алгоритм кластеризации можно также отнести к категории гибридных, так как он использует эволюционный подход, характерный для так называемых генетических алгоритмов. Основанием для его разработки послужила необходимость использования в системах поддержки принятия решений универсального алгоритма по отношению к предпочтениям аналитика в различных ситуациях, то есть формирование кластеров не по одному, а по совокупности нескольких критериев. В представленном алгоритме эта универсальность обеспечивается изменением расчета фитнес-функции (функции приспособленности) используемых в алгоритме хромосом без изменения структуры самого алгоритма. В рассматриваемом случае при кластеризации, кроме близости объектов к центру кластера в метрическом пространстве признаков (критерий формирования более плотных кластеров), учитывается расстояние между кластерами (критерий максимального различия кластеров между собой).

Описание алгоритма кластеризации

Исходные данные представляют собой набор векторов в пространстве из *n* признаков $\mathbf{x}^p = (x_1^p, x_2^p, ..., x_n^p),\ p = \overline{1,k}$. Каждый *p*-й вектор относится к соответствующему группируемому объекту. В составе исходных данных присутствует также требуемое количество кластеров – *m*.

Генетический алгоритм традиционно работает с популяцией хромосом, модифицируемых в итерационном процессе эволюции. В нашем случае в популяции размером w каждая хромосома отображает один из возможных вариантов кластеризации, в качестве которой используется вектор $\mathbf{g}_l^t = (g_{l1}^t, g_{l2}^t, ..., g_{lk}^t),\ t = \overline{1,w}$ (t – номер хромосомы внутри популяции). Количество компонентов вектора хромосомы является фиксированным и равным количеству кластеризуемых объектов, то есть *k*. В отличие от традиционного подхо-

да, при кодировании значений компонентов хромосомы (значений «генов») используется десятичная система счисления. Целое значение компонента g_{lr}^{t} (*r*-го «гена» в хромосоме) кодирует номер кластера, к которому следует отнести *r*-й объект, и находится в интервале [1, *m*].

Критерий качества кластеризации определяется с учетом среднего размера $\overline{R}_t$ формируемых кластеров

$$\overline{R}_t = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\frac{1}{k_j}\sum_{p=1}^{k_j} d^2\left(\mathbf{x}_j^p;\mathbf{x}_{0_j}\right) \tag{1}$$

и оценки удаленности кластеров друг от друга

$$\overline{S}_t = \frac{1}{C_m^2}\sum_{i=1}^{m-1}\sum_{j=i+1}^{m} d^2\left(\mathbf{x}_{0_i};\mathbf{x}_{0_j}\right), \tag{2}$$

где k_j – число входных образов (объектов), попавших в *j*-й кластер; $\mathbf{x}_{0_j}$ – точка центра *j*-го кластера в пространстве признаков; $d\left(\mathbf{x}_j^p;\vec{\mathbf{x}}_{0_j}\right)$ – евклидово расстояние от входного образа $\mathbf{x}_j^p$ до центра своего *j*-го кластера; C_m^2 – число сочетаний из *m* по 2; *m* – количество кластеров; $d^2\left(\mathbf{x}_{0_i};\mathbf{x}_{0_j}\right)$ – квадрат расстояния между центрами *i*-го и *j*-го кластеров.

Данный критерий качества исполняет в генетическом алгоритме роль фитнес-функции хромосом и рассчитывается по формуле[1]:

$$\mu(\mathbf{g}_l^t) = \overline{S}_t / \overline{R}_t. \tag{3}$$

Кластеризация с бóльшим значением фитнес-функции характеризуется более плотной группировкой образов кластеризуемых объектов вокруг центра своего кластера в пространстве признаков и более удаленным расположением этих центров друг от друга.

В алгоритме используются генетические операторы селекции, кроссовера, мутации, а также новый оператор фильтрации, исключающий из рассмотрения хромосомы, отображающие недопустимую кластеризацию, то есть не соответствующую требуемому числу кластеров. Вероятность такого события достаточно высока ввиду случайного характера выбора вышеназванных значений компонентов при формировании начальной популяции хромосом, а также вследствие работы других генетических операторов. Истинность такого события определяется значением функции $\phi(\mathbf{g}_l^t)$:

$$\phi(\mathbf{g}_l^t) = \begin{cases} 1 \text{ если } \exists\, r \in [1,k] \text{ такое, что } g_{lr}^t = j \text{ для } \forall j \in [1,m] \\ 0 \text{ если } \exists\, j \in [1,m] \text{ такое, что } \nexists\, r \in [1,k] \text{ , для которого } g_{ir}^t = j \end{cases} \tag{4}$$

В результате выполнения данного оператора рассматриваемая хромосома либо продолжает участвовать в дальнейшей работе алгоритма при $\phi(\mathbf{g}_l^t) = 1$, либо она удаляется

[1] Для других метрических пространств или в случае использования категориальных данных могут использоваться другие формулы и подходы к оценке качества.

при $\phi(\mathbf{g}_l^t) = 0$. Другими словами, оператор фильтрации – Fil ставит в соответствие хромосоме, над которой он выполняется, либо ее саму, либо пустое множество:

$$\mathrm{Fil}(\mathbf{g}_l^t) = \begin{cases} \mathbf{g}_l^t \text{ если } \phi(\mathbf{g}_l^t) = 1 \\ \emptyset \text{ если } \phi(\mathbf{g}_l^t) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Основное описание предлагаемого алгоритма представлено блок-схемой, которая показана на рис. 1. Ниже приводятся пояснения выполняемых шагов алгоритма, за исключением шагов, описанных непосредственно в блок-схеме.

Шаг 1. Исходные данные для работы алгоритма включают множество векторов $\{\mathbf{x}^p\}$, $p = \overline{1,k}$ (см. выше), количество искомых кластеров – m, количество группируемых объектов – k, количество хромосом в популяции – w, количество поколений в процессе эволюции – L, вероятность выполнения генетического оператора кроссовера – P_c, вероятность выполнения генетического оператора мутации – P_m.

Шаг 4. Необходимую последовательность равномерно распределенных целых чисел из диапазона [1, m] можно получить, воспользовавшись соответствующей вычислимой функцией R(a, b), использующей в свою очередь вычислимую функцию Rnd – генератор

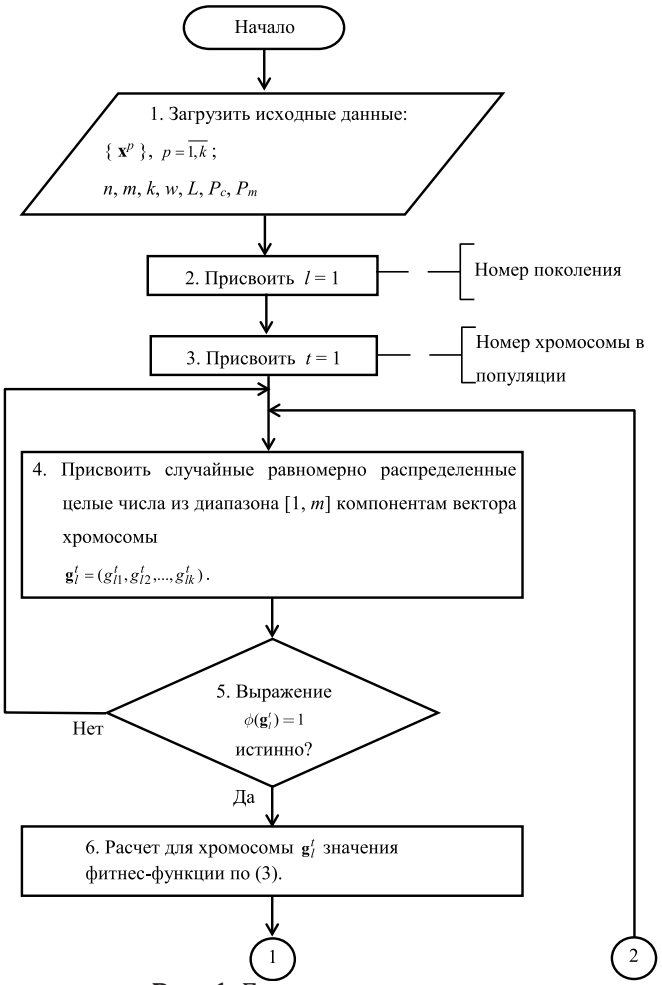


Рис. 1. Блок-схема алгоритма.

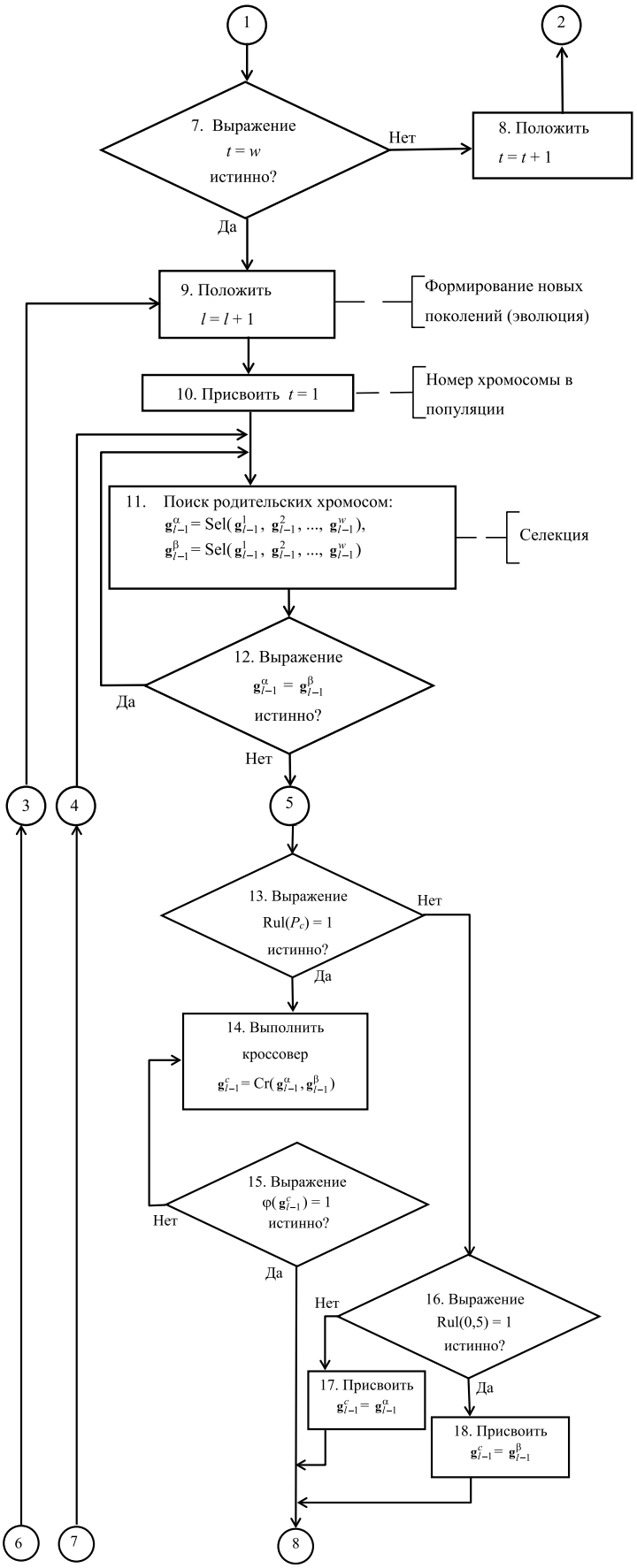


Рис. 1. Продолжение

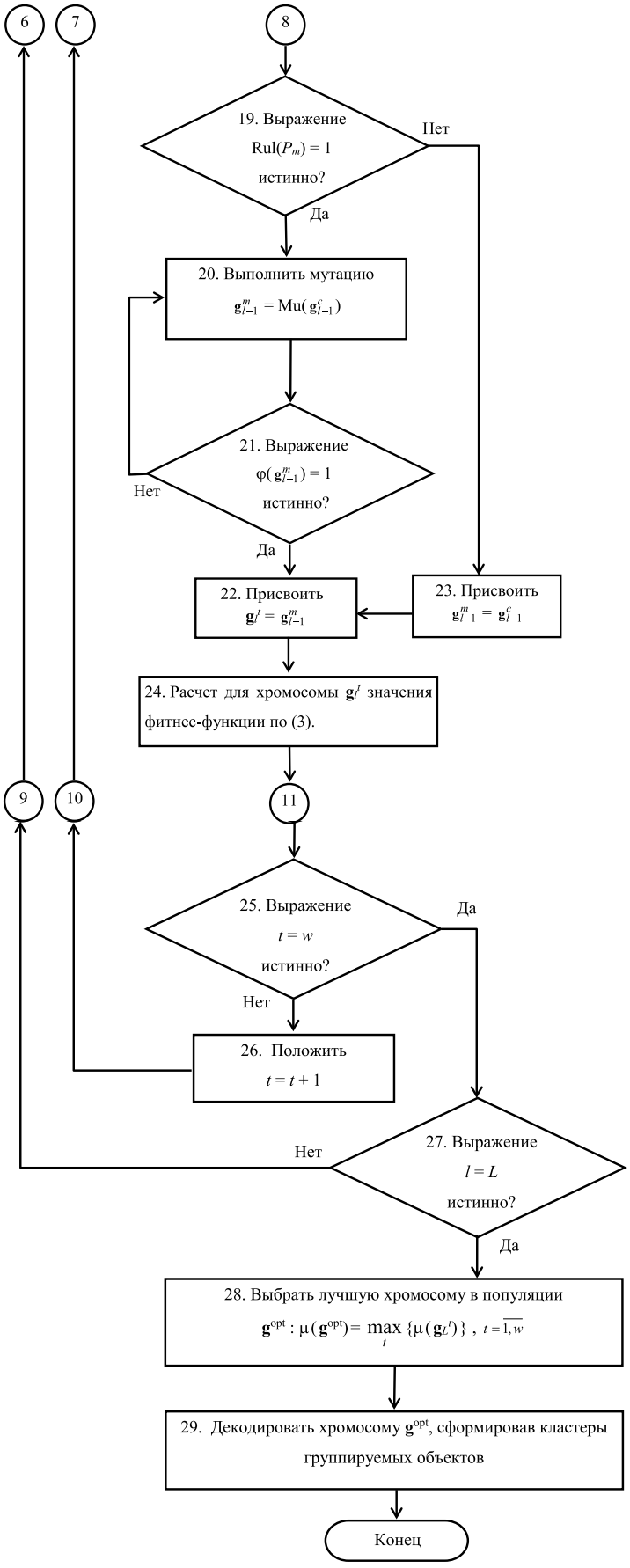


Рис. 1. Окончание

равномерно распределенных случайных действительных чисел из диапазона [0, 1]. Для генерации равномерно распределенных случайных чисел можно воспользоваться одним их известных методов, например, линейным конгруэнтным методом.

Один из возможных вариантов построения алгоритма функции R(*a, b*) приведен ниже, где *a* и *b* – границы диапазона [*a, b*] генерируемых целых чисел.

Алгоритм А. Вычислить значение функции R(a, b):

А1. Задать исходные данные – целые числа *a* и *b* (*a* < *b*).

А2. Рассчитать приращение $\Delta = 1/(b - a + 1)$.

А3. Получить равномерно распределенное в интервале [0, 1] вещественное случайное число λ = Rnd.

А4. Положить $i = 1$.

А5. Проверить: логическое выражение $(i-1)\cdot\Delta \le \lambda \le i \cdot\Delta$ истинно? Если да, то закончить. Присвоить функции R(*a, b*) искомое значение: $a + (i-1)$.

А6. Положить $i = i + 1$ и перейти к шагу А5.

Шаг 5. Функция $\phi(\mathbf{g}_l^t)$ вычисляется согласно (4).

Шаг 11. На данном шаге используется вычислимый оператор селекции Sel, отбирающий хромосому для дальнейшего воспроизводства по принципу «выживает лучший». При отборе участвует процедура «виртуальная рулетка», позволяющая хромосомам с бóльшим значением фитнес-функции быть отобранными с бóльшей вероятностью. Ниже приведен алгоритм оператора селекции.

Алгоритм В. Выполнить селекцию – отобрать хромосому[2]
$\mathbf{g}_{l-1}^{\alpha}$ = Sel($\mathbf{g}_{l-1}^{1}$, $\mathbf{g}_{l-1}^{2}$, ..., $\mathbf{g}_{l-1}^{w}$):

В1. Задать исходные данные – множество хромосом $\{\mathbf{g}_{l-1}^{t}\}$ и множество значений соответствующих им фитнес-функций $\{\mu(\mathbf{g}_{l-1}^{t})\}$, $t = \overline{1,w}$.

В2. Рассчитать суммарное значение фитнес-функции по всей популяции $S = \sum_{t=1}^{w} \mu(\mathbf{g}_{l-1}^{t})$.

В3. Получить равномерно распределенное в интервале [0, 1] вещественное случайное число λ = Rnd.

В4. Положить $\gamma = 1$ и $t = w$.

В5. Проверить: логическое выражение $(\gamma - \frac{\mu(\mathbf{g}_{l-1}^{t})}{S}) \le \lambda \le \gamma$ истинно? Если да, то закончить: $\mathbf{g}_{l-1}^{\alpha} = \mathbf{g}_{l-1}^{t}$.

В6. Положить $\gamma = \gamma - \frac{\mu(\mathbf{g}_{l-1}^{t})}{S}$ и $t = t - 1$. Перейти к шагу В5.

Шаг 13. Используется вычислимая функция Rul(P_c), которая возвращает значение либо 1 в случае наступления случайного события с вероятностью P_c, либо 0 в противном случае. Алгоритм вычисления приведен ниже.

Алгоритм С. Вычислить значение функции Rul(P_c):

С1. Задать исходные данные – значение вероятности P_c.

С2. Получить равномерно распределенное в интервале [0, 1] вещественное случайное число γ = Rnd.

С3. Проверить: логическое выражение $\gamma \le P_c$ истинно? Если да, то присвоить функции Rul(P_c) искомое значение 1, если нет – значение 0.

[2] Для хромосомы $\mathbf{g}_{\beta}$ алгоритм аналогичен.

C4. Закончить.

Шаг 14. На данном шаге используется вычислимый оператор кроссовера Cr, скрещивающий две хромосомы $\mathbf{g}_{l-1}^{\alpha}$ и $\mathbf{g}_{l-1}^{\beta}$ и конструирующий в результате новую хромосому для помещения ее в новую популяцию. Для этого равновероятным случайным образом определяется точка кроссовера $r_c \in [2, k–1]$, т. е. номер «гена», с которого будет производиться обмен значениями рассматриваемых хромосом. Для этого можно воспользоваться рассмотренной выше вычислимой функцией R(2, k–1). Ниже приведен алгоритм оператора кроссовера.

Алгоритм D. Выполнить кроссовер – отобрать хромосому $\mathbf{g}_{l-1}^{c} = \mathrm{Cr}(\mathbf{g}_{l-1}^{\alpha}, \mathbf{g}_{l-1}^{\beta})$:

D1. Задать исходные данные – хромосомы $\mathbf{g}_{l-1}^{\alpha}$, $\mathbf{g}_{l-1}^{\beta}$.

D2. Определить точку кроссовера $r_c = \mathrm{R}(2, k–1)$.

D3. Построить хромосомы $\widetilde{\mathbf{g}}_{l-1}^{\alpha}$, $\widetilde{\mathbf{g}}_{l-1}^{\beta}$:

$\widetilde{\mathbf{g}}_{l-1}^{\alpha} = (g_{(l-1)1}^{\alpha}, g_{(l-1)2}^{\alpha}, ..., g_{(l-1)(r_c-1)}^{\alpha}, g_{(l-1)r_c}^{\beta}, ..., g_{(l-1)k}^{\beta})$,

$\widetilde{\mathbf{g}}_{l-1}^{\beta} = (g_{(l-1)1}^{\beta}, g_{(l-1)2}^{\beta}, ..., g_{(l-1)(r_c-1)}^{\beta}, g_{(l-1)r_c}^{\alpha}, ..., g_{(l-1)k}^{\alpha})$.

D4. Проверить: логическое выражение $\mathrm{Rul}(P_c) = 1$ истинно? Если да, то $\mathbf{g}_{l-1}^{c} = \widetilde{\mathbf{g}}_{l-1}^{\alpha}$, если нет – $\mathbf{g}_{l-1}^{c} = \widetilde{\mathbf{g}}_{l-1}^{\beta}$.

D4. Закончить.

Шаг 20. На данном шаге используется вычислимый оператор мутации Mu, заменяющий значение случайно определенного «гена» с номером $r_m \in [1, k]$ на новое случайно определенное значение с равной вероятностью из интервала [1, m]. Поиск значения r_m осуществляется также с равной вероятностью, для чего можно воспользоваться рассмотренной выше вычислимой функцией R(1, k). Ниже приведен алгоритм оператора мутации.

Алгоритм E. Выполнить мутацию хромосомы $\mathbf{g}_{l-1}^{c}$:

E1. Задать исходные данные – хромосому $\mathbf{g}_{l-1}^{c}$.

E2. Определить номер мутирующего «гена»: $r_m = \mathrm{R}(1, k)$.

E3. Присвоить новое значение мутирующему «гену»:

$g_{(l-1)r_m}^{c} = \mathrm{R}(1, m)$.

E4. Закончить.

Шаг 28. Поиск лучшей хромосомы $\mathbf{g}^{\mathrm{opt}}$ в популяции последнего поколения (L – номер последнего поколения) осуществляется обычным перебором значений фитнес-функций всех хромосом с поиском хромосомы, имеющей максимальное значение данной функции.

Шаг 29. Декодирование найденной хромосомы предполагает сортировку ее компонентов («генов») по их значению, поскольку каждый компонент вектора хромосомы соответствует группируемому объекту, а его значение – номеру кластера.

Исследование алгоритма кластеризации

Поскольку работа алгоритма представляет собой стохастический процесс, то его сходимость является также категорией вероятностной, требующей своей оценки. Для выполнения данного анализа были проведены исследования эффективности работы алгоритма в несколько этапов.

На первом этапе были подготовлены исходные данные в виде множества многомерных векторов значений признаков абстрактных кластеризуемых объектов. Значения

подбирались случайным образом с помощью несложной программы. При этом разброс координат объектов по измерениям внутри кластеров поддерживался в рамках необходимой дисперсии. Данные готовились для двух серий вычислительных экспериментов – с сильно и слабо выраженным удалением кластеров. Во втором блоке данных расстояние между кластерами, оцениваемое методом «ближнего соседа», было соизмеримо с дисперсией значений координат внутри кластеров.

На втором этапе были проведены серии вычислительных экспериментов с использованием специально разработанной для этой цели программы. Работа алгоритма в рамках данной программы выполнялась в различных режимах, отличающихся варьированием размера популяции хромосом w и количества отработанных алгоритмом поколений эволюции L. Значения параметров вероятности для генетических операторов во всех экспериментах задавались следующими: $P_c = 0.9$ и $P_m = 0.1$.

Результаты экспериментов на обоих блоках данных показывают (см. рис. 2, 3), что процесс эволюции хромосом стабилизируется уже при небольших размерах их популяции ($w > 150$) и числе реализованных поколений эволюции ($L > 200$).

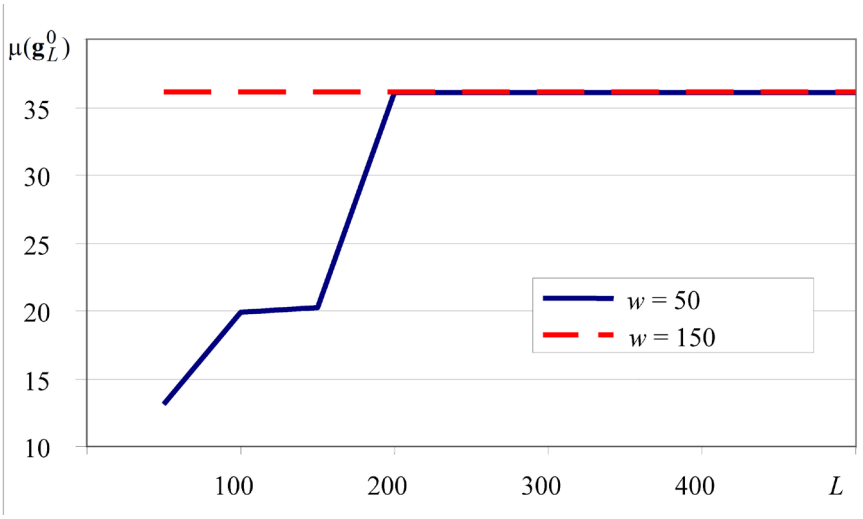


Рис. 2. К определению параметров стабилизации работы алгоритма при сильно выраженной кластеризации.

Значение параметра качества кластеризации Θ выбиралось равным значению фитнес-функции $\mu(\mathbf{g}_L^0)$ ($\mathbf{g}_L^0$ – лучшая хромосома, отображающая результат кластеризации). При сильно выраженной кластеризации, как и предполагалось, значение Θ оказалось выше, чем во втором случае (36.1079 > 3.1977) вследствие большей удаленности кластеров друг от друга.

Значение параметра качества на режимах работы алгоритма ниже стабилизационных описывается эмпирическими функциональными зависимостями, полученными по результатам тех же экспериментов для каждого блока данных (см. рис. 4, 5). Что касается сильно выраженной кластеризации, то эта зависимость имеет вид

$$\Theta = -9{,}759 + 0{,}569w + 0{,}084L - 0{,}001836w^2 - 0{,}000328L^2 . \qquad (6)$$

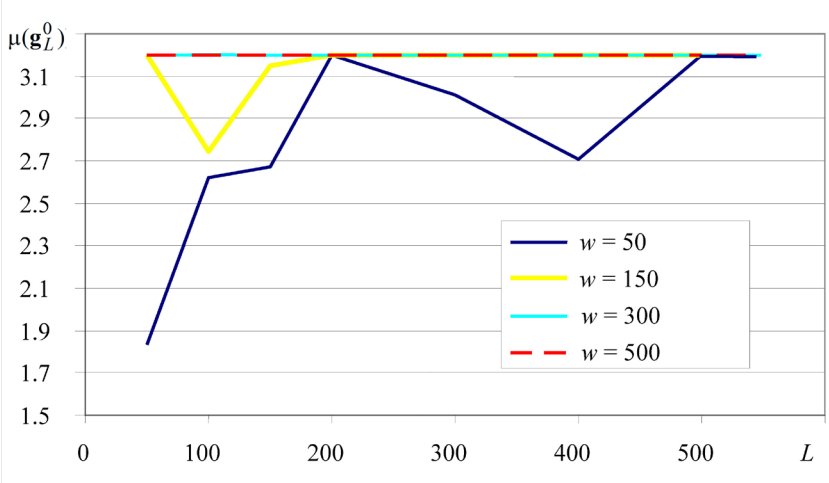


Рис. 3. К определению параметров стабилизации алгоритма при слабо выраженной кластеризации.

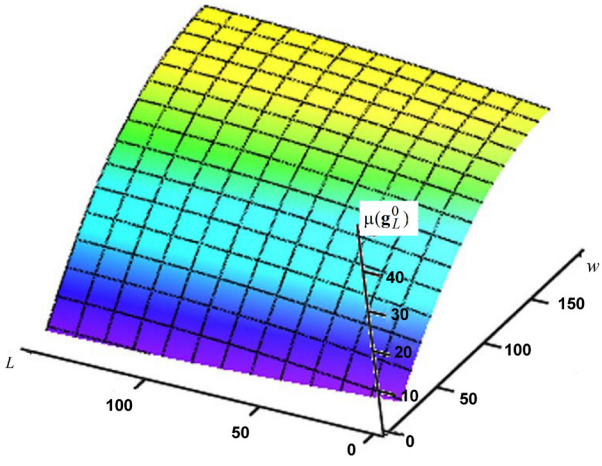


Рис. 4. Работа алгоритма на переходных режимах: сильно выраженная кластеризация.

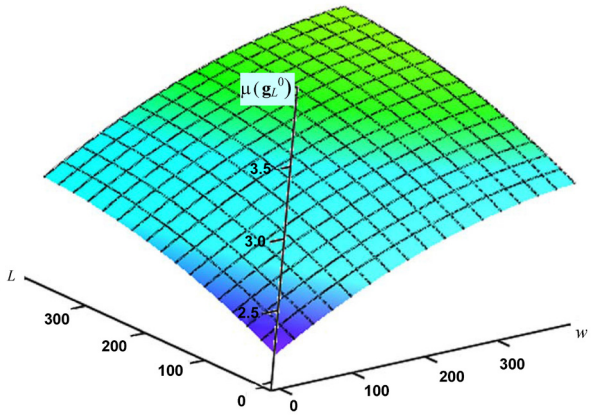


Рис. 5. Работа алгоритма на переходных режимах: слабо выраженная кластеризация.

Для случая слабо выраженной кластеризации мы имеем функцию

$$\Theta = 2{,}1549 + 0{,}0053w + 0{,}0035L - 0{,}00000915w^2 - 0{,}00000646L^2. \quad (7)$$

Обе эмпирические зависимости (6) и (7) были проверены на адекватность по критерию Фишера.

На третьем этапе ставился вычислительный сравнительный эксперимент на реальных данных, использованных автором ранее при выявлении потенциальных объектов выездных налоговых проверок (предприятий) в рамках налогового администрирования [12]. Пространство признаков предприятий, используемых в данной задаче, состоит из 16 финансовых показателей, входящих в состав методических положений по оценке финансового состояния предприятий и установлению неудовлетворительной структуры баланса, утвержденной Федеральным управлением по делам несостоятельности (банкротства) РФ. Показатели образуют четыре группы и характеризуют рентабельность предприятия,

ликвидность и его платежеспособность, деловую активность и финансовую устойчивость (подробно см. [12]).

Для сравнения предлагаемого алгоритма с существующими в первую очередь был выбран SOM-алгоритм [22], который по характеру является также стохастическим и гибридным, а также один из популярных алгоритмов – "*k*-means" [21]. Вычисления с использованием нейронных сетей Кохонена и алгоритма "*k*-means" выполнялись в программе Deductor Studio Basegroup Labs. В пространстве вышеназванных 16 признаков выполнялась кластеризация 24 предприятий с формированием трех кластеров, как и в задаче поддержки налогового управления [36]. Расчет среднего значения параметра качества кластеризации $\Theta'' = \overline{S}^0 / \overline{R}^0$ [3] ($\overline{S}^0$ и $\overline{R}^0$ рассчитаны для лучшей хромосомы популяции по (1) и (2)) по результатам повторных прогонов SOM-алгоритма составил 3.97, а алгоритма "*k*-means" – 2.04. Использование же предлагаемого алгоритма в данной задаче при размерах популяции хромосом (w) и числе реализованных поколений эволюции (L), равных 200, показало среднее значение $\Theta'' = \mu(\mathbf{g}_L^0) = 7.29$. Результат оказался вполне ожидаемым, так как алгоритмы SOM и "*k*-means" учитывают только один критерий кластеризации, тогда как в задаче [36] лучшее решение оценивается двумя критериями, такими же, как и в предлагаемом алгоритме.

Чтобы поставить сравниваемые алгоритмы в равное положение, не связанное с приоритетами принятия решений в [36], в предлагаемом алгоритме была изменена фитнес-функция (см. (3)) на значение $\mu(\mathbf{g}_l^t) = 1/\overline{R}_t$, учитывающее только один критерий кластеризации – близость образов кластеризуемых объектов к центру кластера в пространстве измерений. Именно этот критерий используется в алгоритмах SOM и "*k*-means". По результатам новой серии экспериментов были получены следующие значения критерия качества $\Theta' = 1/\overline{R}^0$: для предлагаемого алгоритма – 0.147, алгоритма SOM – 0.089, алгоритма "*k*-means" – 0.072.

Таким образом, в обоих случаях качество кластеризации оказалось лучше в предлагаемом алгоритме. Это объясняется тем, что в данном алгоритме пространство поиска покрывает все допустимое множество решений (генетический оператор мутации обеспечивает появление в рассматриваемом множестве таких решений, которых не было заложено в генетическом материале начальной стартовой популяции), в то время как в сравниваемых алгоритмах пространство решений зависит от их инициализации (стартовых значений координат центров кластеров в "*k*-means" и координат нейронов в SOM).

Сравнительная оценка алгоритмов по производительности учитывала то обстоятельство, что время работы алгоритма SOM напрямую зависит от количества эпох обучения нейронной сети входными данными, а исследуемого алгоритма – от размеров популяции хромосом и числа реализованных поколений эволюции. В процессе повторных вычислений было выявлено, что стабилизация алгоритма SOM по точности кластеризации наступает в диапазоне от 1500 до 2000 эпох. Для предпочтительной для данного алгоритма оценки было определено время его работы при реализации 1500 эпох обучения нейронной сети на 32-разрядном микропроцессоре с тактовой частотой 1.7 ГГц. Среднее значение времени его работы составило 4.5 с. Среднее время работы предлагаемого алгоритма при $w = 200$ и $L = 200$ на том же микропроцессоре составило 0.89 с, а алгоритма "*k*-means" – 0.64 с. Это говорит о соразмерности производительности сравниваемых алгоритмов.

[3] Сравните с (3).

Для более детального исследования производительности предлагаемого алгоритма была проведена серия вычислений при различных значениях w и L. По полученным результатам (см. таблицу) выполнена оценка воспроизводимости эксперимента с использованием G критерия Кохрена. Расчетное значение критерия (0.299) не превышает табличного (0.478) при уровне значимости 0.05, что не просто подтверждает случайный характер расхождения дисперсий значений времени в повторных вычислениях, но и свидетельствует о стабильной надежной работе алгоритма, результат которого не зависит от его инициализации.

К оценке производительности алгоритма

Размер популяции (w)	Число поколений (L)	Время работы алгоритма при повторных вычислениях, с		
		1	2	3
200	200	0.859	0.907	0.911
200	300	1.359	1.361	1.375
200	400	1.781	1.797	1.812
300	200	1.765	1.735	1.750
300	300	2.562	2.547	2.625
300	400	3.469	3.391	3.531
400	200	2.687	2.828	2.718
400	300	4.125	4.109	4.281
400	400	5.421	5.532	5.359

С использованием полученной статистики (см. таблицу) построена регрессионная модель зависимости времени работы алгоритма (τ) в данном эксперименте от параметров w и L с высоким значением множественного коэффициента детерминации ($R^2 = 0.97$):

$$\tau = -4{,}11639 + 0{,}01383w + 0{,}00885L, \quad (8)$$

позволяющая более полно оценивать производительность предлагаемого алгоритма при $w > 150$ и $L > 200$.

Заключение

Представленный генетический алгоритм кластеризации является гибким по отношению к предпочтениям аналитика в процессе принятия решений, так как позволяет выполнять кластеризацию, исходя из различных критериев, например, максимального взаимного удаления кластеров, близости геометрических образов группируемых объектов к центру кластера, других критериев. Это достигается изменением расчетной формулы фитнес-функции, учитывающей необходимое сочетание критериев кластеризации без изменения структуры алгоритма.

Как и любой генетический алгоритм, данный алгоритм является простым в его программной реализации, что делает его надежным в использовании. Высокая надежность алгоритма была подтверждена проведенными вычислительными экспериментами на данных, отражающих различные кластерные структуры. Эксперименты показали быструю сходимость алгоритма, оцениваемую по небольшому числу поколений эволюции в про-

цессе нахождения искомого решения. При этом необходимы небольшие вычислительные ресурсы компьютера в виде его оперативной памяти, так как надежная работа алгоритма не требует большой популяции генетических хромосом.

Алгоритм отличает нечувствительность к инициализации, так как в процессе эволюции хромосом за счет использования генетических операторов алгоритм полностью покрывает все множество допустимых решений, что, в итоге, обеспечивает высокое качество кластеризации. Проведенный вычислительный эксперимент на реальных данных показал не только хорошее качество кластеризации, но и вполне приемлемую производительность представленного алгоритма, соразмерную с производительностью общепризнанных алгоритмов SOM и "*k*-means".

Литература:

1. Нечеткие системы, мягкие вычисления и интеллектуальные технологии: Труды VII Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 03–07 июля 2017 г. Т. 2. СПб.: Политехника-сервис, 2017. 210 с.

2. Юдин В.Н., Карпов Л.Е. Неполностью описанные объекты в системах поддержки принятия решений // Программирование. 2017. № 5. С. 24–31.

3. Анфёров М.А. Системная оптимизация наукоемких технологий // Известия вузов. Авиационная техника. 2002. № 2. С. 57–60.

4. Батыршин И.З., Недосекин А.А., Стецко А.А., Тарасов В.Б., Язенин А.В., Ярушкина Г.Г. Нечеткие гибридные системы: теория и практика / Под ред. Н.Г. Ярушкиной. М.: Физматлит, 2007. 207 с.

5. Аджемов С.С., Кленов Н.В., Терешонок М.В., Чиров Д.С. Использование искусственных нейронных сетей для классификации источников сигналов в системах когнитивного радио // Программирование. 2016. № 3. С. 3–11.

6. Hu Z., Bodyanskiy Y., Tyshchenko O.K. Self-learning procedures for a kernel fuzzy clustering system // Advances in Computing Science for Engineering and Education. 2019. V. 754. P. 487–497. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_49

7. Анфёров М.А., Ханнанов М.Г. Кластерный подход к проектированию в САПР ТП // Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации. Сб. науч. тр. в 4 т. Т. 3. Ульяновск: УлГТУ, 2009. С. 60–65.

8. Бороздина Н.А. Применение иерархического кластерного анализа для сегментации потребителей рынка сотовой связи // Молодой ученый. 2016. № 29. С. 365–367. URL: https://moluch.ru/archive/133/37358/ (дата обращения: 13.11.2019).

9. Дударин П.В., Ярушкина Н.Г. Подходы к нечеткой и иерархической кластеризации и классифиации ключевых показателей эффективности системы стратегического планирования российской федерации // Труды VII Всероссийской научно-практической конференции «Нечеткие системы, мягкие вычисления и интеллектуальные технологии». Санкт-Петербург, 03–07 июля, 2017г. Т. 2. СПб.: Политехника-сервис, 2017. С. 65–73.

10. Петухова. М.В. Кластеризация заемщиков – физических лиц по уровню дефолтов: рейтинговый подход (на примере регионов Сибирского федерального округа) // Журнал Новой экономической ассоциации. 2012. № 4 (16). С. 71–102.

11. Анфёров М.А. Сети Кохонена в задаче выявления экономически нестабильных региональных структур // Труды XV Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика 13». Москва, 21–25 января, 2013 г. Т. 3. М: НИЯУ МИФИ, 2013. С. 177–184.

12. Анфёров М.А., Рашитова О.Б. SADT моделирование системы налогообложения в Российской Федерации // Экономика и управление: научно-практический журнал. 2015. № 2(124). С. 94–101.

13. González del Pozo R., García-Lapresta J.L., Pérez-Román D. Clustering U.S. 2016 presidential candidates through linguistic appraisals // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. V. 642. P. 143–153. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66824-6_13

14. Хвостиков А.В., Крылов А.С., Камалов Ю.Р. Текстурный анализ ультразвуковых изображений для диагностирования фиброза печени // Программирование. 2015. № 5. С. 39–46.

15. Kumar S., Mishra S., Asthana P. Automated detection of acute leukemia using k-mean clustering algorithm // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. V. 554. P. 655–670. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3773-3_64

16. Abadi S., Sari T.I., Maseleno A., Muslihudin M., Mat The K.S., Nasir B.M., Huda M., Ivanova N.L., Satria F. Application model of k-means clustering: insights into promotion strategy of vocational high school // International Journal of Engineering and Technology. 2018. V. 7. № 2.27. P. 182–187. http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i2.11491

17. Hussain S., Atallah R., Kamsin A., Hazarika J. Classification, clustering and association rule mining in educational datasets using data mining tools: A case study // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. V. 765. P. 196–211. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91192-2_21

18. Харинов М.В. Кластеризация пикселей для сегментации цветового изображения // Программирование. 2015. № 5. С. 20–30.

19. Астраханцев Н.А., Федоренко Д.Г. Турдаков Д.Ю. Методы автоматического извлечения терминов из коллекции текстов предметной области // Программирование. 2015. № 6. С. 33–52.

20. Lakhno V., Zaitsev S., Tkach Y., Petrenko T. Adaptive expert systems development for cyber attacks recognition in information educational systems on the basis of signs' clustering // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. V. 754. P. 673–682. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_66

21. Hartigan, J.A., Wong, M.A. Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm // Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics). 1979. V. 28. № 1. P. 100–108.

22. Kohonen T. Self-Organizing Maps: 3rd edition. Berlin - New York: Springer-Verlag, 2001. 521 p.

23. Zhang T., Ramakrishnan R., Livny M. BIRCH: an efficient data clustering method for very large databases // Proceedings of the ACM SIGMOD international conference on Management of data (SIGMOD '96). 1996. P. 103–114. https://doi.org/10.1145/235968.233324

24. Päivinen N. Clustering with a minimum spanning tree of scale-free-like structure // Pattern Recognition Letters. 2005. V. 26. Iss. 7. P. 921–930. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2004.09.039

25. Sudipto Guha, Rajeev Rastogi, Kyuseok Shim. CURE: An Efficient Clustering Algorithm for Large Databases // Information Systems. 1998. V. 26. № 1. P. 35–58. https://doi.org/10.1016/S0306-4379(01)00008-4

26. Sudipto Guha, Rajeev Rastogi, Kyuseok Shim. ROCK: a robust clustering algorithm for categorical attributes // Information Systems. 2000. V. 25. № 5. P. 345–366. https://doi.org/10.1016/S0306-4379(00)00022-3

27. Bodyanskiy Y., Didyk O. On-line robust fuzzy clustering for anomalies detection // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. V. 754. P. 402–409. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_40

28. Иванова Е.В., Соколинский Л.Б. Методы параллельной обработки сверхбольших баз данных с использованием распределенных колоночных индексов // Программирование. 2017. № 3. С. 3–21.

29. Shao J., Yang Q., Schmidt B., Dang H-V., Kramer S. Scalable Clustering by Iterative Partitioning and Point Attractor Representation // ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data. 2016. V. 11. № 1. P. 5:1–5:23. https://doi.org/10.1145/2934688

30. Songlei J.https://orcid.org/0000-0001-5760-6431, Guansong P., Longbing C., Kai L., Hang G. CURE: Flexible Categorical Data Representation by Hierarchical Coupling Learning // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2019. V. 31. Iss. 5. P. 853–866. https://doi.org/10.1109/TKDE.2018.2848902

31. Sheikholeslami G., Chatterjee S., Zhang A. WaveCluster: A Wavelet-Based Clustering Approach for Spatial Data // VLDB Journal. 2000. № 8(3-4). P. 289–304. http://dx.doi.org/10.1007/s007780050009

32. Gionis A., Mannila H., Tsaparas P. Clustering Aggregation // ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data. 2007. V. 1. № 1. Article 4. 30 p. https://doi.org/10.1145/1217299.1217303

33. Wang C., She Z., Stantic B., Chi C.H., Cao L. Coupled Clustering Ensemble by Exploring Data Interdependence // ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data. 2018. V. 12. № 6. P. 63:1-63:38. http://dx.doi.org/10.1145/3230967

34. Zhang X., Zhang X., Liu H. Smart Multitask Bregman Clustering and Multitask Kernel Clustering // ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data. 2015. V. 10. № 1. P. 8:1-8: p. https://doi.org/10.1145/2747879

35. Abasi A., Sajedi H. Fuzzy-clustering based data gathering in wireless sensor network // International Journal on Soft Computing (IJSC). 2016. V.7. № 1. P.1–15. https://doi.org/10.5121/ijsc.2016.7101

36. Горбатков С.А., Рашитова О.Б. Моделирование налоговых управленческих решений на основе нейронных сетей Кохонена // Информационные технологии. 2013. № 5. С. 60–65.

References:

1. Fuzzy systems, soft calculations and intellectual technologies: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference. St. Petersburg, July 03-07, 2017. V. 2. St. Petersburg: Politekhnika-servis Publ., 2017. 210 p. (in Russ.).

2. Yudin V.N., Karpov L.E. Incompletely described objects in decision support. *Programming and Computer Software.* 2017;43(5):294-299.

3. Anfyorov M.A. System optimization of high technologies. *Izv. VUZ. Aviatsionnaya tekhnika* = Russian Aeronautics. 2002;2:57-60 (in Russ.).

4. Batyrshin I.Z., Nedosekin A.A., Stetsko A.A., Tarasov V.B., Yazenin A.V., Yarushkina N.G. Fuzzy hybrid systems: theory and practice. Ed. N.G. Yarushkina. Moscow: Fizmatlit Publ., 2007. 207 p. (in Russ.).

5. Adzhemov S.S., Klenov N.V., Tereshonok M.V., Chirov D.S. The use of artificial neural networks for classification of signal sources in cognitive radio systems. *Programming and Computer Software.* 2016;42(3):121-128. 10.1134/S0361768816030026

6. Hu Z., Bodyanskiy Y., Tyshchenko O.K. Self-learning procedures for a kernel fuzzy clustering system. *Advances in Computing Science for Engineering and Education.* 2019;754:487-497. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_49

7. Anfyorov M.A., Khannanov M.G. Cluster approach to design in CAM. In: Provedeniye nauchnykh issledovaniy v oblasti obrabotki, khraneniya, peredachi i zashchity informatsii = Conducting scientific research in the field of

processing, storage, transmission and protection of information. Collection of scientific papers in 4 v. V. 3. Ul'yanovsk: UlGTU Publ., 2009; pp. 60-65 (in Russ.).

8. Borozdina N.A. The use of hierarchical cluster analysis for segmentation of consumers of the market of cellular communication. *Molodoi uchenyi* = Young scientist. 2016;29:365-367. (in Russ.). URL: https://moluch.ru/archive/133/37358/ (accessed November 13, 2019).

9. Dudarin P.V., Yarushkina N.G. Approaches to fuzzy and hierarchical clustering and classification of key process indicators of the strategic planning system of the Russian Federation. In: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference "Fuzzy Systems, Soft Computing and Intelligent Technology". St. Petersburg, July 03–07, 2017. V. 2. SPb.: Polytekhnik servis Publ., 2017; pp. 65-73 (in Russ.).

10. Petukhova M.V. Clustering of borrowers at the level of defaults: Rating approach (regions of Siberian Federal District). *Zhurnal Novoi ekonomicheskoi assotsiatsii* = J. New Economic Association. 2012;4(16):71-102 (in Russ.).

11. Anfyorov M.A. Kohonen networks in a problem of identification of economically unstable regional structures. Proceedings of the XV All-Russian Scientific and Practical Conference "Nejroinformatika 13" [Neuroinformatics-2013]. Moscow, 21–25 January, 2013. V. 3. M.: NIYaU MIFI, 2013; pp. 177-184 (in Russ.).

12. Anfyorov M.A., Rashitova O.B. SADT modeling of the Russian Federation tax system. *Ekonomika i upravlenie: nauchno-prakticheskii zhurnal* = Economics and Management: Research and Practice Journal. 2015;2(124):94-101 (in Russ.).

13. González del Pozo R., García-Lapresta J.L., Pérez-Román D. Clustering U.S. 2016 presidential candidates through linguistic appraisals. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2018;642:143-153. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66824-6_13

14. Kvostikov A.V., Krylov A.S., Kamalov U.R. Ultrasound image texture analysis for liver fibrosis stage diagnostics. *Programming and Computer Software.* 2015;41(5):273-278. https://doi.org/10.1134/S0361768815050059

15. Kumar S., Mishra S., Asthana P. Automated detection of acute leukemia using k-mean clustering algorithm. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2018;554:655-670. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3773-3_64

16. Abadi S., Sari T.I., Maseleno A., Muslihudin M., Mat The K.S., Nasir B.M., Huda M., Ivanova N.L., Satria F. Application model of k-means clustering: insights into promotion strategy of vocational high school. *International Journal of Engineering and Technology.* 2018;7(2.27):182-187. http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i2.11491

17. Hussain S., Atallah R., Kamsin A., Hazarika J. Classification, Clustering and Association Rule Mining in Educational Datasets Using Data Mining Tools: A Case Study. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2019;765:196-211. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91192-2_21

18. Kharinov M.V. Pixel clustering for color image segmentation. *Programming and Computer Software.* 2015:41(5):258-266. https://doi.org/10.1134/S0361768815050047

19. Astrakhantsev N.A., Fedorenko D.G. Turdakov D.YU. Methods for automatic term recognition in domain-specific text collections: A survey. *Programming and Computer Software.* 2015;41(6):336-349. https://doi.org/10.1134/S036176881506002X

20. Lakhno V., Zaitsev S., Tkach Y., Petrenko T. Adaptive expert systems development for cyber attacks recognition in information educational systems on the basis of signs' clustering. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2019;754:673-682. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_66

21. Hartigan, J.A., Wong, M. A. Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics).* 1979;28(1):100-108.

22. Kohonen T. Self-Organizing Maps: 3rd edition. Berlin - New York: Springer-Verlag, 2001. 521 p.

23. Zhang T., Ramakrishnan R., Livny M. BIRCH: an efficient data clustering method for very large databases. In: Proceedings of the ACM SIGMOD international conference on Management of data (SIGMOD '96). 1996; pp. 103-114. https://doi.org/10.1145/235968.233324

24. Päivinen N. Clustering with a minimum spanning tree of scale-free-like structure. *Pattern Recognition Letters.* 2005;26(7):921-930. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2004.09.039

25. Sudipto Guha, Rajeev Rastogi, Kyuseok Shim. CURE: An Efficient Clustering Algorithm for Large Databases. *Information Systems.* 1998;26(1):35-58. https://doi.org/10.1016/S0306-4379(01)00008-4

26. Sudipto Guha, Rajeev Rastogi, Kyuseok Shim. ROCK: a robust clustering algorithm for categorical attributes. *Information Systems.* 2000;25(5):345-366. https://doi.org/10.1016/S0306-4379(00)00022-3

27. Bodyanskiy Y., Didyk O. On-line robust fuzzy clustering for anomalies detection. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2019;754:402-409. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_40

28. Ivanova E.V., Sokolinsky L.B. Parallel processing of very large databases with using distributed columnar indexes. *Programming and Computer Software.* 2017;43(3):131-144. https://doi.org/10.1134/S0361768817030069

29. Shao J., Yang Q., Schmidt B., Dang H-V., Kramer S. Scalable Clustering by Iterative Partitioning and Point Attractor Representation. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data.* 2016;11(1):5:1-5:23. https://doi.org/10.1145/2934688

30. Songlei J.https://orcid.org/0000-0001-5760-6431, Guansong P., Longbing C., Kai L., Hang G. CURE: Flexible Categorical Data Representation by Hierarchical Coupling Learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering.* 2019;31(5):853-866. https://doi.org/10.1109/TKDE.2018.2848902

31. Sheikholeslami G., Chatterjee S., Zhang A. WaveCluster: A Wavelet-Based Clustering Approach for Spatial Data. *VLDB Journal.* 2000;8(2-4):289-304. http://dx.doi.org/10.1007/s007780050009

32. Gionis A., Mannila H., Tsaparas P. Clustering Aggregation. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data.* 2007;1(1):Article 4. 30 p. https://doi.org/10.1145/1217299.1217303

33. Wang C., She Z., Stantic B., Chi C.H., Cao L. Coupled Clustering Ensemble by Exploring Data Interdependence. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data.* 2018;12(6):63:1-63:38. https://doi.org/10.1145/3230967

34. Zhang X., Zhang X., Liu H. Smart Multitask Bregman Clustering and Multitask Kernel Clustering. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data.* 2015;10(1):8:1-8:29. https://doi.org/10.1145/2747879

35. Abasi A., Sajedi H. Fuzzy-clustering based data gathering in wireless sensor network. *International Journal on Soft Computing (IJSC).* 2016:7(1):1-15. https://doi.org/10.5121/ijsc.2016.7101

36. Gorbatkov S.A., Rashitova O.B. Modeling of tax administrative decisions on the basis of Kohonen's neural networks. *Informatsionnye tekhnologii* = Information Technology. 2013;5:60-65 (in Russ.).

Об авторе:

Анфёров Михаил Анисимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная и бизнес-информатика» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the author:

Mikhail A. Anfyorov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Chair "Applied and Business Informatics," Institute of Complex Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

ISSN 2500-316X (Online)
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-151-167
УДК 004.827; 165.18; 165.4; 37.026

CC BY

Тринитарные системы

С.А. Кудж,
В.Я. Цветков@

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: cvj2@mail.ru

Статья посвящена исследованию тринитарных систем, применяемых в естественных и технических науках. Рассмотрены различные типы тринитарных систем. Проведен системный анализ тринитарных систем. Выявлено, что тринитарная система является наиболее простой сложной системой. Исследована связь тринитарных систем с теорией категорий и показано, что тринитарная система служить базой категориального анализа. Продемонстрировано, что тринитарная система является простейшим мультиграфом. Показано, что она позволяет трансформировать пространства разной кривизны друг в друга. Тринитарная система в линейных системах задает цикличность, что может повлечь: развитие, деградацию или бифуркацию. Триангуляция по существу развивает тринитарный подход и может быть рассмотрена как применение тринитарной системы для решения теоретических или технических задач в таких областях, как, к примеру, психология, социальные науки, политика, геометрия, наземная съемка. Общий вывод состоит в том, что тринитарная система является универсальным инструментом познания.

Ключевые слова: знание, тринитарная система, триада, триангуляция, системный анализ, моделирование, категории, механизмы познания.

Для цитирования: Кудж С.А., Цветков В.Я. Тринитарные системы. *Российский технологический журнал.* 2019;7(6):151-167. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-151-167

Trinitarian systems

Stanislav A. Kudzh,
Viktor Ya. Tsvetkov@

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author, e-mail: cvj2@mail.ru

The article explores the trinitarian systems used in the natural and technical sciences. Various types of trinitarian systems are considered. A systematic analysis of trinitarian systems was carried out. The article proves that the trinitarian system is the simplest complex system. The paper examines the relationship of trinitarian systems with the theory of categories. It is shown that the trinitarian system serves as the basis for categorical analysis. The paper proves that the trinitarian system is the simplest multigraph. The trinitarian system allows transforming spaces of different curvature into each other. The trinitarian system in linear systems defines a cyclicity, which can entail: development, degradation or bifurcation. Triangulation essentially develops a trinitarian approach and can be considered as the use of a trinitarian system to solve theoretical or technical problems in areas such as, for example, psychology, social sciences, politics, geometry, and ground surveying. The general conclusion is that the Trinitarian system is a universal instrument of cognition.

Keywords: knowledge, Trinitarian system, triad, triangulation, system analysis, modeling, categories, mechanisms of cognition.

For citation: Kudzh S.A. Tsvetkov V.Ya. Trinitarian systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):151-167 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-151-167

Введение

Существуют понятия тринитаризм и тринитарная доктрина, которые в первую очередь связывают с христианской теологией и философией [1–4]. Тринитарная доктрина, то есть учение о троичности Бога, интерпретируется как трансцендентное миру, личное и творческое Первоначало [5]. Троичность является важнейшей составной частью христианского вероучения и христианской философии. Понятие тринитарная система редко применяют в этих направлениях, заменяя его понятием «Троица» (*Trinity*) [6]. Слово «троица» происходит от латинского *trinitas* и означает «номер три, триада, три». Соответствующее слово на греческом языке *Τριας, τριάδα*. Число «три» на греческом языке звучит как τρία, что вызывает ассоциации с городом «Троя». Но пока ученые не обращают внимания на эту ассоциацию. Анализ архивов показывает, что «троичность» существовала задолго до появления христианства. Христиане внесли в эту концепцию свои «поправки» и назвали ее составляющие другими именами. За четыре тысячи лет до рождения Иисуса древние вавилоняне разделили божества на три группы: божество небес, божество земли и божество моря. Троица существовала за десять веков до появления христианства в индуизме: Брахма – Вишну – Шива. Это три ипостаси одного бога. Во время раскопок в Индии была найден идол с одним телом и тремя головами, символизирующий троицу. У древних египтян тоже была троица: Осирис, Исида, Гор. И у персов: Ахриман, Митра и

Ахурамазда. Троица существовала у дохристианских славян. У мексиканцев тоже была троица: Тескатлипока, Уицилопочтли, Тлалок. Даже у греческих философов была своя троица, состоящая из Бытия, Знания и Жизни. Перечисленное показывает многообразие троичности в существовании и эволюции человечества.

Независимо от религиозных доктрин, тринитарный подход и тринитарный анализ как метод познания применялся в разных направлениях. Следует отметить философию [7, 8], политологию [9], лингвистику [10, 11], логику [12–14], управление [15, 16], включая управление сложностью [17]. Существует понятие тринитарная онтология [18], что определяет познавательные аспекты тринитарных систем. Трансформируя термин «тринитарность» в «триангуляцию», в математике, науках о Земле развивается обширное направление методов триангуляции [19–22]. Тринитарный подход, реализованный через понятие триангуляция, применяют в информационной безопасности [23], медицине [24], психологии [25] и искусственном интеллекте [26]. Разнообразие и разнонаправленность применения и использования тринитарного подхода и тринитарных систем делает актуальным обобщение этого феномена и исследование тринитарных систем в их большей связи с трансцендентальным, а не с трансцендентным.

Тринитарный системный анализ

Тринитарный системный анализ имеет два варианта применения [27]: 1) Разбиение сложной системы на совокупности простых тринитарных систем; 2) Построение сложной системы на основе простейшей тринитарной системы. Тринитарная система является аналогом треугольной системы. Однако она имеет более широкий круг представлений, которые не всегда описываются обычным треугольником. Для проведения тринитарного анализа необходимо исследовать тринитарную систему с разных аспектов.

Системный подход [28–30] дает основание рассматривать тринитарную систему или триаду как сложную систему. Простейшее описание сложной системы включает структуру системы, связи, элементы и отношения:

$$SYS = < Str, E, C, R >. \quad (1)$$

В выражении (1) *Str* – структура системы; *E* – множество элементов в системе; *C* – множество связей в системе; *R* – множество отношений между элементами, частями и подсистемами. Это определение указывает, что система состоит из разнородных частей и имеет структуру. В тринитарной системе присутствуют все перечисленные компоненты.

Особенность тринитарных систем в том, что их топологическая модель часто представляет собой мультиграф [31, 32]. В теории графов мультиграфом называют граф, который имеет кратные ребра, имеющих одинаковые конечные вершины. В мультиграфе две вершины могут быть соединены более чем одним ребром. Это является существенным отличием тринитарной системы от обычного треугольника и обычного графа, которые представляют ее частные случаи. Тринитарная система (TS) как мультиграф имеет описание в виде упорядоченной четверки

$$TS = (V, A, s, t).$$

В это описание, кроме V – множества вершин и A – множества дуг, включены разметки s и t. Разметка s: $A \rightarrow V$ назначает каждой дуге начальную вершину. Разметка t: $A \rightarrow V$ назначает каждой дуге конечную вершину. На рис. 1 приведена структура тринитарной системы в виде мультиграфа.

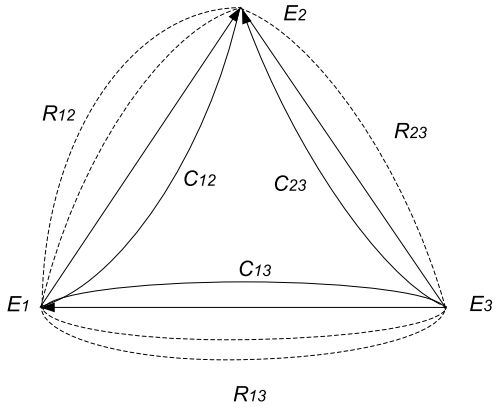


Рис. 1. Тринитарная система как мультиграф.

На рис. 1 множество элементов E_1, E_2, E_3 соответствует вершинам триады. Между каждой вершиной существует семейство отношений (R – пунктирные линии) и семейство связей (C – сплошные линии). Связи могут иметь ориентацию, что отмечается стрелками. В общем случае тринитарную систему (рис. 1) можно рассматривать как информационную конструкцию, которая приобретает различный смысл в зависимости от связей между вершинами.

Для триады появляется свойство эмерджнентности, которое заключается в наличии у нее площади $S(E_1,E_2,E_3)$. Бинарная конструкция площади не имеет. Это дает основание считать тринитарную систему простейшей сложной системой. С позиций топологии (рис. 1) тринитарную систему можно считать простейшим мультиграфом.

Категориальный тринитарный анализ

Теория категорий [33] изучает свойства отношений между математическими объектами, не зависящие от внутренней структуры объектов. Триада или тринитарная система отвечает эти требованиям и может служить средством категориального анализа. Ребра или отношения тринитарной системы представляют собой морфизмы. Тринитарная система может быть рассмотрена как простая коммутативная диаграмма. Коммутативной диаграммой называют ориентированный граф, в вершинах которого находятся объекты, а стрелками (дугами) являются морфизмы. При этом результат композиции стрелок не зависит от выбранного пути. Не углубляясь в теорию категорий, остановимся на простейшей модели категории (рис. 2).

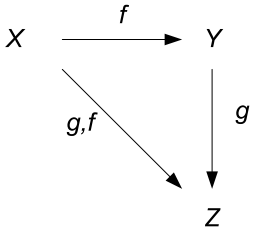


Рис. 2. Простая модель категории.

Схематическое представление категории [34] включает объекты *X, Y, Z* и морфизмы *f, g, g, f*. Принципиальным является то, что простая модель категории по существу представляет собой триаду или тринитарную систему (см. рис. 1). Следовательно, категориальный анализ в своей основе использует тринитарный подход и триангуляционное разложение.

Параметры тринитарной системы *A, B, C* (см. далее) могут принадлежать к одной категории или к разным категориям. Это дает основание различать типы тринитарных систем. Монокатегориальная тринитарная система (триада) – это такая триада, все три параметра которой принадлежат одно категории. Примером может служить триада Декартовых координат, которая описывает трехмерное пространство и положение в нем точек и объектов. Можно ввести понятие разнокатегориальной тринитарной системы, например, «ум – чувство – воля», «цель – метод – результат», «Бытие – Знание – Жизнь» и др. Такое деление дает возможность не смешивать разные типы триад.

Модель тринитарной системы

Тринитарная система чаще всего представляет собой три сущности, три категории, три фактора, между которыми существуют взаимности: отношения, связи, процессы, потоки, взаимодействия, соответствия. Это дает основание изображать конструкцию тринитарной системы в виде триады или треугольника (рис. 3).

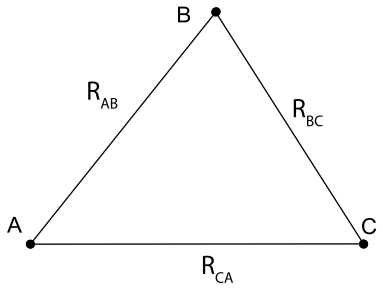


Рис. 3. Тринитарная система.

Простая топологическая модель тринитарной системы включает три вершины *A, B, C* и три дуги, которые обозначают три разных вида связанности R_{AB}, R_{BC}, R_{CA}. Вершины *A, B, C* могут обозначать: сущности, категории, факторы, части, элементы, системы, объекты, ситуации, процессы, феномены. Если процесс рассматривается как сущность, то его обозначают как вершину. Если процесс служит средством связи между сущностями, то его обозначают дугой. В дальнейшем будем обозначать вершину термином сущность. Вершины *A, B, C* могут принадлежать к одной категории или к разным категориям

Дуги R_{AB}, R_{BC}, R_{CA} могут обозначать: отношения, связи процессы, потоки, взаимодействия, соответствия, взаимность, предпочтительность. Дуги также могут принадлежать к одной категории или к разным категориям. Дуги задают трансформационные свойства между вершинами. Например, если вершины *A, B, C* принадлежат к одной категории и обозначают единицы, сотни, тысячи одинаковых единиц, то дуги выполняют масштабирующие функции.

В общем виде в тринитарной системе трем вершинам могут соответствовать не три дуги, а три семейства дуг. На рис. 4 приведен пример тринитарной системы с двойственными отношениями между вершинами. Вершины изображают сущности, а дуги – отно-

шения. В этой модели три сущности: A – дед, B – отец, C – внук. R_{AB}, R_{BC} – отношения отца к сыну или отцовские отношения. С точки зрения качества и иерархии отношения R_{AB}, R_{BC} одинаковы, но с точки зрения содержания они различны. В тринитарной системе существуют обратные отношения, которые можно отразить перестановкой индексов. R_{BA}, R_{CB} – отношения сына к отцу или сыновьи отношения. Качественно отношения R_{AB}, R_{BC} одинаковы, но содержательно они различны.

Третий тип отношений, который создает триаду, это R_{CA} – отношения внука к деду; R_{AC} – отношения деда к внуку. Отношения R_{AB}, R_{BC}, R_{AC} отражают отношения иерархии.

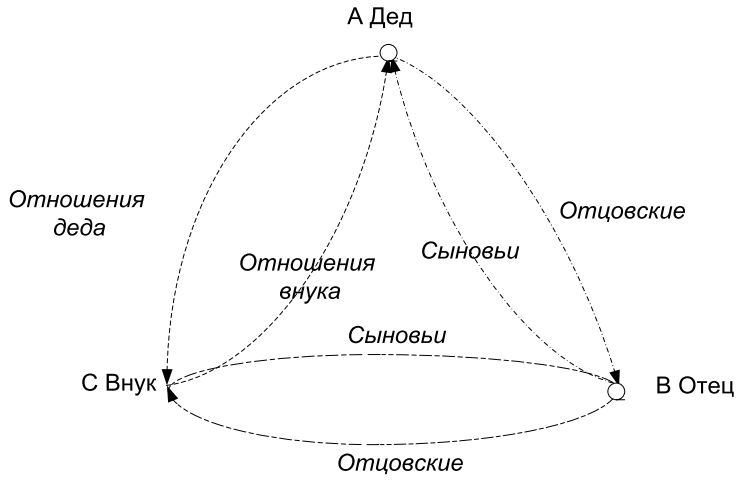


Рис. 4. Тринитарная система с двойственными отношениями.

Изолированно каждая дуга представляет сама по себе линейный объект или диаду:

$$R_{AB} : A \rightarrow B,\ R_{BC} : B \rightarrow C,\ R_{CA} : C \rightarrow A,\ R_{BA} : B \rightarrow A, \quad (2)$$

Линейный объект обладает геометрическим свойством – протяженностью. Это задает его качество и принадлежность к категории линейных объектов. Системное свойство связанность, которое появляется между тремя вершинами, преобразует три разрозненных линейных объекта в связанную тринитарную систему. Тринитарная система по отношению к линейным объектам приобретает новое качество – площадь. Мы говорим о линейных объектах и о тринитарной системе объектов. Следовательно, тринитарная система может быть рассмотрена как простейшая модель сложной системы или как системный элемент. Диадные модели (2) отображают линейные объекты. Тринитарная конструкция на графике отображает площадные (ареальные) объекты. Она является симплексом, то есть простейшим элементом площади. В плоских системах координат для обозначения элементарной единицы площади чаще используют квадрат или прямоугольник.

Однако преимущество треугольника проявляется при отображении криволинейных поверхностей. Три точки с одинаковым успехом лежат и на плоской, и на криволинейной поверхности. На рис. 5 приведены три треугольника. Первый (1) лежит на сферической поверхности. Это сферический треугольник, сумма внутренних углов в котором может быть больше π, например 3π/2, второй треугольник (2) лежит на плоскости. Сумма внутренних углов в этом треугольнике всегда равна только π. Третий треугольник (3) лежит на конической поверхности. Сумма внутренних углов в этом треугольнике переменная и

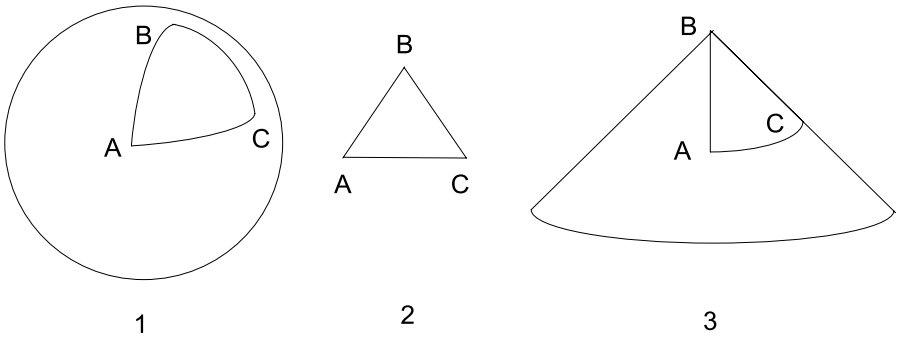


Рис. 5. Тринитарная система как связь между разными пространствами.

может быть больше π. Принципиально вершины плоского треугольника (2) могут быть совмещены с вершинами «сферического треугольника» (1) или с вершинами «конического треугольника» (3). При этом поверхности, на которых лежат эти треугольники, не будут совпадать. Для четырехугольника такое свойство не выполняется. Таким образом, треугольник (тринитарная система) является симплексом также на криволинейной поверхности и может служить основой для ее аппроксимации.

Кроме того, в пределе, при стремлении треугольника к малым размерам, площади треугольников разных поверхностей (рис. 5) стремятся к одинаковой величине. Это определяет важное уникальное свойство тринитарной модели – возможность создания связи между разными пространствами и разными поверхностями.

С точки зрения устойчивости треугольник является математически и технически самой устойчивой фигурой среди других геометрических фигур. Это свойство используется в триангуляции при уравнивании геодезических измерений. Триангуляционное уравнивание обеспечивает минимум ошибок, а построение триангуляционных сетей на поверхности любой планеты обеспечивает наивысшую точность измерения данной поверхности. Это свойство используется при построении механических конструкций и инженерных сооружений.

Если рассматривать тринитарную систему как отражение потоков, то здесь также выявляется новое качество модели – цикличность. В топологии и управлении тринитарную систему применяют для отображения цикла. На рис. 6 показана триада, встроенная в линейную цепочку.

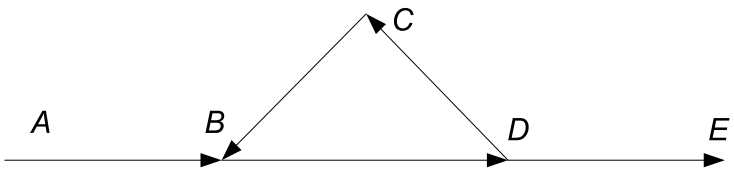


Рис. 6. Обратная связь.

Обратная связь может быть как «положительной», так и «отрицательной». Она может приводить к усилению потока, а может ослаблять его. Такая вариабельность создает возможность деградации или развития. Обратная связь создает возможность бифуркации, то есть может приводить к синергетическому эффекту. Тринитарная система служит основой развития деградации и бифуркации.

Тринитарные рассуждения

Устойчивость треугольника часто переносится в область рассуждений для построения логически устойчивых конструкций. Если *A – денотат*, *B – концепт*, *C – знак*, то на рис. 7 получаем семиотический треугольник Фреге [35]. Общей характеристикой фигуры на рис. 7 является скалярный треугольник.

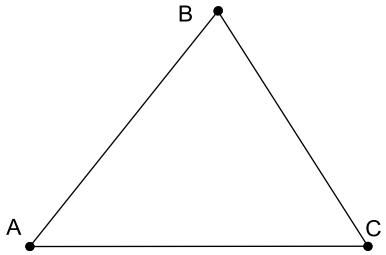


Рис. 7. Скалярный треугольник.

Тринитарная информационная конструкция описывает вершины и различные отношения между ними. Например, таким отношением может быть отношение «больше» (>). При выполнении условия транзитивности имеет место, если $A>B$ и $B>C$, следует $A>C$. Если треугольник является ориентированным графом и дуги выражают направленные отношения, то возможны разные случаи отношений. На рис. 8 приведены два случая отношений. Если вектор обозначать двумя буквами начала и конца, то рис. 8-1 изображает векторную сумму, для которой имеет место правило векторной суммы и правило переноса транзитивности:

$$AB + BC = AC$$

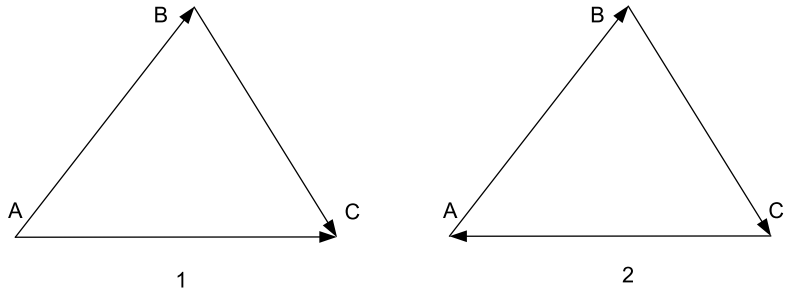


Рис. 8. Ориентированный тринитарный граф.

Треугольник 1 (рис. 8) называют треугольником согласованности. Если отношение «больше» (>) заменить на отношение предпочтительности (≻) [36], то возможно нарушение условия транзитивности, что показано на рис. 8-2. Правило транзитивности выполняется для некой системы и для множества объектов, принадлежащих этой системе. Если объекты взаимодействуют индивидуально и вне системы, то правило транзитивности может нарушаться. Такая информационная ситуация противоречит правилу векторной суммы, но встречается на практике и как раз служит характеристикой противоречивости в данной ситуации.

Подобная ситуация часто встречается в спортивных соревнованиях. Например, команда *A* победила команду *B* ($A \succ B$). Команда *B* может победить команду *C* ($B \succ C$). Однако

из этого не следует обязательно, что команда *A* победит команду *C*. То есть допустимо при ($A \succ B$ и $B \succ C$) как $A \succ C$, так и $A \prec C$ (команда *A* проиграет команде *C*). В случае ничьей складывается ситуация эквивалентности $A = C$, которая на рис. 8-2 не изображена. Но там как раз изображена противоречивая ситуация: $A \succ B$, $B \succ C$ и $A \prec C$. Такой треугольник называют треугольником рассогласования. Таким образом, тринитарная информационная конструкция описывает новое свойство, которое в диадных моделях представить нельзя. Это свойство согласованности или несогласованности связанных троек факторов.

При оппозиционном анализе [37–39] также применима тринитарная информационная конструкция (рис. 9). Эта конструкция соответствует трехзначной логике Аристотеля: 1 – истина; -1 ($\neg 1$) – ложь; 0 – неизвестно [12–14].

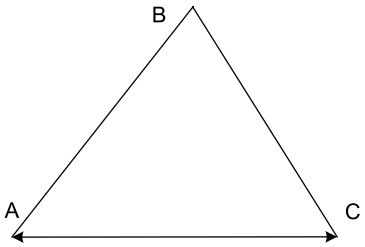


Рис. 9. Оппозиционный треугольник.

Подобная триада образуется при дихотомическом анализе, который задает три компонента: *A* – пропозиция, *B* – объект, *C* – оппозиция. Два элемента *A, C* задают оппозицию, все три задают оппозиционную триаду. Такая тринитарная система или триада может отображаться в виде функции $Tr(A, B, C, R_{AB}, R_{BC}, R_{CA})$, где R_{AB}, R_{BC}, – отношения части и целого. R_{CA} или R_{AC} – отношения противоположности или оппозиционные отношения.

При исключении среднего члена получается диадная оппозиционная пара «пропозиция–оппозиция»: «добро–зло», «белое–черное», «достоинства–недостатки». То есть описание сводится к диадному, или бинарному. Это диадное описание является упрощенным. Оно хорошо подчеркивает различие, но полным не является.

Триангуляция как метод применения тринитарных систем

Триангуляция по существу развивает тринитарный подход и может быть рассмотрена как применение тринитарной системы или триады для решения теоретических или технических задач. Однако, для того чтобы избежать ассоциаций с тринитарной теологией, тринитарной философией и мистикой, в технических и естественных науках применяют термин «триангуляция» как средство разграничения технического или теоретического использования тринитарной системы от ее религиозного толкования.

В буквальном смысле «триангуляция» (лат. *triangulatio*) означает покрытие треугольниками. Триангуляция, как и тринитарные системы, применяется в разных направлениях. В геодезии и фотограмметрии это один из методов создания сети опорных геодезических пунктов. Триангуляция в радиолокации – один из методов радиопеленгации подвижных объектов. Задача о триангуляции многоугольника – нахождение триангуляции многоугольника без дополнительных вершин. Рассмотрим некоторые характерные виды триангуляции.

Триангуляция в психологии

Триангуляция в психологии рассматривается как тактика манипуляции, когда первый человек не связывается напрямую со вторым человеком, а использует третьего человека

для передачи связи второму. Этим образуется триада или тринитарная система. Другой вариант триангуляции в психологии состоит в создании информационной ситуации, в которой один человек манипулирует отношениями между двумя сторонами, контролируя связь между ними. В силу этого триангуляция может проявляться как средство или техника для развития соперничества между двумя людьми, известное как «разделяй и властвуй» [40], или как игра одного против другого [41].

В области психологии триангуляции являются необходимыми шагами в развитии ребенка, когда бинарные отношения раскрываются третьей стороной в новую форму отношений. Таким образом, ребенок приобретает новые интеллектуальные способности. Эта концепция была введена в 1971 году швейцарским психиатром Эрнестом Л. Абелиным, особенно ранней триангуляции, для описания переходов в теории психоаналитических объектных отношений и отношений между родителями и детьми в возрасте 18 месяцев. В этой транскрипции мать является ранним опекуном с почти «симбиотическими» отношениями с ребенком, а отец завлекает ребенка к внешнему миру, в результате чего отец является третьей стороной [42]. Позднее Абелин разработал «модель организатора и триангуляции» [43], в которой он основывал всё ментальное и психическое развитие человека на нескольких этапах триангуляции.

Триангуляция в социальных науках

В социальных науках тринитарная система часто используется, когда два или более метода применяются в исследовании для проверки результатов одного и того же исследования. «Концепция триангуляции заимствована из навигационных и землемерных методов, которые определяют единую точку в пространстве с конвергенцией измерений, взятых из двух других отдельных точек» [44]. Идея состоит в том, что можно быть более уверенным в результате, если разные методы приведут к одному и тому же результату.

Триангуляция в социальных науках является методом, который облегчает проверку данных путем перекрестной проверки из двух или более источников. Это распространяется на комбинацию нескольких методов исследования при исследовании одного и того же явления. Он может использоваться как в валидационных, так и в качественных исследованиях. Концепция триангуляции как применения тринитарной системы соответствует методам установления достоверности при качественных рассуждениях [45]. Целью триангуляции в качественных исследованиях является повышение надежности и достоверности результатов. Дензин Н. определил четыре основных типа триангуляции [46]:

- Триангуляция данных: включает время, пространство и людей;
- Триангуляция следования: включает несколько маршрутов исследования;
- Теория триангуляции: предполагает использование более чем одной теоретической схемы в интерпретации явления;
- Методологическая триангуляция: предполагает использование более одного метода сбора данных или анализа, таких, как интервью, наблюдения, вопросники и документы.

Триангуляция в политике

Триангуляция в политике представляет собой политическую стратегию, при которой политический кандидат представляет свою идеологию как находящуюся выше и между левой и правой сторонами (или «крыльями») политического спектра (рис. 10).

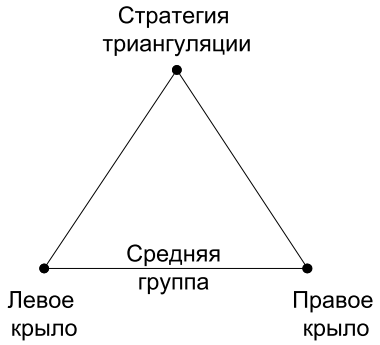


Рис. 10. Политическая триангуляция.

Политическая триангуляция предполагает принятие для себя некоторых идей своего политического противника. Логика этого действия заключается в том, что политический деятель берет идеи противника и изолирует свою позицию от атак на эту конкретную проблему. Этот термин был впервые использован бывшим главным политическим советником президента США Билла Клинтона Диком Моррисом в качестве способа описания его стратегии по переизбранию Клинтона на президентских выборах 1996 года. По словам Дика Морриса, триангуляция означала: «президент должен был занять позицию, которая не только сочетала лучшие взгляды каждой стороны, но и превосходила их, чтобы стать третьей силой в дебатах» [47]. В аналитических статьях и книгах эта стратегия иногда упоминается как «клинтоновская триангуляция»[1]. Моррис выступал за политику, которая отличается от традиционной политики Демократической партии. Эта политика включала дерегулирование и сбалансированные бюджеты. Одним из наиболее широко цитируемых утверждений стратегии триангуляции Клинтона было то, что в своем обращении к государству Соединенных Штатов в 1996 году он заявил, что «эпоха большого правительства закончилась»[2].

Триангуляция в наземной съемке

При наземной съемке триангуляция [48] представляет собой процесс определения местоположения точки путем измерения только углов на нее из известных точек на обоих концах фиксированной базовой линии, а не измерения расстояний до точки непосредственно, как в трилатерации. Затем точка может быть зафиксирована как третья точка треугольника с одной известной стороной и двумя известными углами (рис. 11). На рис. 11 условно показано определение местоположения судна с береговой линии.

Если мы можем измерить L – расстояние между точками наблюдения A и B, то из геометрических построений имеем:

$$L = (d/\tan \alpha) + (d/\tan \beta)$$

Несложные геометрические преобразования дают выражение для определения дальности d до точки местоположения S:

$$D = L\ (\sin \alpha \sin \beta) / (\sin (\alpha + \beta)$$

[1] Goldberg J. Clintonian triangulation comes full circle. Los Angeles Times. December 18, 2007. Retrieved December 29, 2014.
[2] Sanger D.E. Where Clinton Turned Right, Obama Plowed Ahead. The New York Times. January 29, 2010. Retrieved May 26, 2010.

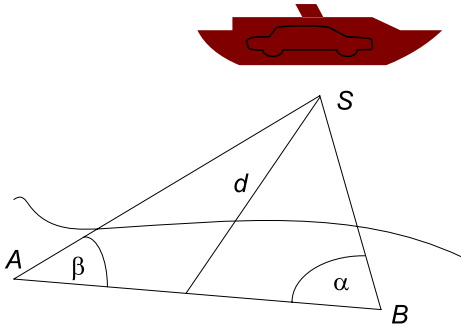


Рис. 11. Триангуляция как определение планового положения.

Триангуляция также может относиться к точной съемке систем очень больших треугольников, называемых сетями триангуляции [49]. Ошибка сети минимизируется, если установить сетку треугольников в наибольшей соответствующей шкале. Точки внутри треугольников могут быть точно расположены со ссылкой на него. Такие методы триангуляции использовались для точной крупномасштабной съемки Земли до появления Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Геометрическая триангуляция

В геометрии триангуляция – это разбиение геометрического объекта на симплексы. Например, на плоскости это разбиение на треугольники. Триангуляция множества точек $P \subset R^{n+1}$ – это разбиение выпуклой оболочки точек на симплексы так, что выполняется первое условие из предыдущего определения, и множество точек, являющихся вершинами симплексов разбиения, совпадает с P. Триангуляция T пространства R^{n+1} – это подразбиение R^{n+1} на $(n+1)$-мерные симплексы, такие, что:

1) любые два симплекса в T пересекаются в общей грани ребра или вершины, или вообще не пересекаются;

2) любое ограниченное множество в R^{n+1} пересекает конечное количество симплексов с T.

Триангуляция Делоне является наиболее известным видом триангуляции множества точек [51]. Существует большое количество задач триангуляции в геометрии, но следует отметить общее свойство тринитарности.

Заключение

Анализ тринитарных систем позволяет выделить их специфические свойства. С системных позиций, как система, тринитарная система является простейшей сложной системой. С другой стороны, как элемент системы, тринитарная система является элементом, содержащим системные свойства. С позиций топологии тринитарная система является простейшим мультиграфом, что делает ее не эквивалентной геометрическому треугольнику. Тринитарная система может быть рассмотрена как простая коммутативная диаграмма или как базовая схема категориального анализа. Тринитарная система дает возможность связывать морфизмы и объекты в категории. Монокатегориальные тринитарные системы служат основой описания пространств. Разнокатегориальная тринитарная система связывает разные категории и качества и дает возможность строить переходы между этими категориями и качествами. В частности, тринитарная система позволяет связывать пространства разной кривизны и создавать методы трансформации

пространств разной кривизны друг в друга. Тринитарная система как конструкция обладает наибольшей устойчивостью или максимальной жесткостью среди других конструкций. Математически это обусловливает более высокую точность и сходимость алгоритмов, использующих тринитарный принцип. Тринитарная система в линейных системах задает цикличность, что может повлечь развитие, деградацию или бифуркацию. Тринитарная система позволяет моделировать рассуждения и отделять противоречивые рассуждения от непротиворечивых. Реализация тринитарной системы или ее возможностей осуществляется через различные виды триангуляции. По существу, триангуляция означает многократное и множественное использование тринитарных систем. Триангуляция применяется в политике, психологии, социальных науках, геометрии. И везде она дает возможность получать качественно новые результаты, которые диадными или бинарными моделями получить нельзя.

Общий вывод состоит в том, что тринитарная система, несмотря на ее разнообразие, является универсальным инструментом познания окружающего мира. В целом, несмотря на широкое применение и широкие возможности в области тринитарных систем, отсутствуют попытки написать теорию таких систем и систематизировать исследования в этой области. Данная работа является попыткой в этом направлении.

Литература:

1. McDonnell K. A Trinitarian Theology of the Holy Spirit? // Theological Studies. 1985. V. 46. № 2. P. 191–227. https://doi.org/10.1177/004056398504600201

2. Grenz S.J. The social god and the relational self: A Trinitarian theology of the imago Dei. Louisville: Westminster John Knox Press, 2001. 345 p.

3. Gunton C.E. The promise of trinitarian theology. A&C Black, 2003. 251 p.

4. Emery G. The Trinitarian Theology of St Thomas Aquinas. Oxford: Oxford University Press, 2007. 440 p.

5. Фокин А.Р. Античная философия и формирование тринитарной доктрины в латинской патристике: дис … д-ра философских наук. М.: Институт философии РАН, 2013. 472 с.

6. Kärkkäinen V.M. Trinity and Religious Pluralism: The Doctrine of the Trinity in Christian Theology of Religions. Routledge, 2017. 204 p.

7. Баранцев Р.Г. О тринитарной методологии // Философский век. Альманах. Вып. 7. Между физикой и метафизикой: наука и философия. СПб., 1998. С. 51–61.

8. Баранцев Р.Г. Системная триада – структурная ячейка синтеза // Системные исследования. Ежегодник 1988. М.: Наука, 1989. С. 193–209.

9. Stone J. Technology and War: A Trinitarian Analysis // Defense & Security Analysis. 2007. V. 23. № 1. P. 27–40. http://dx.doi.org/10.1080/14751790701254441

10. Олейник А.Н. Триангуляция в контент-анализе. Вопросы методологии и эмпирическая проверка // Социологические исследования. 2009. № 2. С. 65–79.

11. Цветков В.Я. Триада как интерпретирующая система // Перспективы науки и образования. 2015. № 6(18). С. 18–23. Адрес статьи: pnojournal.wordpress.com/archive15/15-06/

12. Papanikolaou A. Reasonable faith and a trinitarian logic: Faith and Reason in Eastern Orthodox Theology. In: Restoring Faith in Reason / eds. L.P. Hemming. Notre Dame, Indiana: University of Notre Dame Press, 2002. P. 237–255.

13. Бубнов В.А. Логические операции трехзначной логики // Вестник Омского государственного педагогического университета. Выпуск 2006 www.omsk.edu. Дата обращения 12.10.2019.

14. Jongsma C. Poythress's Trinitarian Logic: A Review Essay // Pro Rege. 2014. V. 42. № 4. P. 6–15. Available at: https://digitalcollections.dordt.edu/pro_rege/vol42/iss4/2

15. Zhu Z. Trinitarian relation inquiry system in systems/management approaches? - More findings // in Sustainable Technology and Complex ecological and Social Systems, proceedings of the 42nd Annual Conference of the International Society for the Systems Sciences, July 19–24, Atlanta, Georgia, ISBN 0-9664183-0-1, eds., Allen, J. and Wilby, J., the last chapter

16. Цветков В.Я. Тринитарные системы в управлении // Современные технологии управления. 2017. №. 3 (75). С. 2–10. Режим доступа: http://sovman.ru/article/7501/

17. Опрятная О.Н. Тринитарный подход как методологическое основание управления сложностью // Социология: методология, методы, математическое моделирование. 2005. Т. 10. № 21. С. 29–50.

18. Calton P.M. Hegel's Metaphysics of God: The Ontological Proof as the Development of a Trinitarian Divine Ontology. Ashgate Publishing, 2001. 140 p.

19. Ильман В.М. Алгоритмы триангуляции плоских областей по нерегулярным сетям точек //Алгоритмы и программы, ВИЭМС. 1985. № 10(88). С. 3–35.

20. Юсов Е.А., Турлапов В.Е. Адаптивная триангуляция ландшафта с представлением квадрадерева вершинной текстурой и вейвлет-оценкой значимости вершин // Программирование. 2008. Т. 34. № 5. С. 3–18

21. Пехтерев В.В., Вишняков С.В., Чобану М.К. Адаптивная триангуляция и сжатие изображений // Информационные технологии. 2013. № 5. С. 41–46.

22. Фираго Б.А. Космическая триангуляция методом астрометрии спутников Земли // Astronomicheskiĭ zhurnal. 1969. Т. 46. № 1-3. С. 180–191.

23. Веричев А.В., Федосеев В.А. Защита изображений цифровыми водяными знаками на триангуляционной сетке характеристических точек // Материалы межд. Научно-практической конф. «Перспективные информационные технологии ПИТ-2013», 2013. С. 92–96. http://repo.ssau.ru/handle/Perspektivnye-informacionnye-tehnologii/Zashita-izobrazhenii-cifrovymi-vodyanymi-znakami-na-triangulyacionnoi-setke-harakteristicheskih-tochek-59356

24. Гайсин Р.Р., Никифорова А.В., Кугуракова В.В., Саченков О.А. Трехмерная платформонезависящая визуализация данных томографии // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 4. С. 137–139.

25. Гусельцева М.С. Триангуляция как метафорический конструкт: история и методологические перспективы // Вопросы психологии. 2014. № 5. С. 3–14.

26. Бусыгин Б.С., Зацепин Е.П. Метод трехмерной триангуляции в задачах кластерного анализа // Штучний інтелект. 2010. № 1. С. 16–24. http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/56117

27. Цветков В.Я. Тринитарные системы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 11(3). С. 556–556. URL: https://applied-research.ru/ru/article/view?id=10539 (дата обращения: 06.12.2019).

28. Берталанфи фон Л. Общая теория систем – критический обзор / В кн. Исследования по общей теории систем. М.: Прогресс, 1969. С. 23–82

29. Волкова В. Н., Денисов А. А. Основы теории систем и системного анализа. СПб.: Изд-во СПбГТ, 2001. 512 с.

30. Цветков В.Я. Решение проблем с использованием системного анализа // Перспективы науки и образования. 2015. № 1(13). С. 50–55. http://www.pnojournal.wordpress.com/archive15/15-01/

31. Визинг В.Г., Тофт Б. Раскраска инциденторов и вершин неориентированного мультиграфа // Дискретный анализ и исследование операций. 2001. Т. 8. № 3. С. 3–14.

32. Кузнецов А. М. Математическая модель мультиграфа телекоммуникационной сети и иерархия классов // Научно-исследовательские публикации. 2013. № 1. С. 87–93.

33. Маклейн С. Категории для работающего математика. М.: Физматлит, 2004. 351 с. ISBN 5-9221-0400-4 (в пер.)

[Mac Lane S. Categories for the working mathematician. Springer, 1998. 315 p.]

34. Awodey S. Category Theory. Oxford Logic Guides. 49 (2nd ed.). Oxford University Press, 2010. 328 p. ISBN 978-0-19-923718-0.

35. Wright S.E. From the semiotic triangle to the semantic web // Journal of the International Institute for Terminology Research. 2003. V. 14. P. 111–135.

36. Tsvetkov V. Ya. Not Transitive Method Preferences // Journal of International Network Center for Fundamental and Applied Research. 2015. V. 3. Is. 1. P. 34–42. https://doi.org/ 10.13187/jincfar.2015.3.34

37. Ожерельева Т.А. Оппозиционный анализ информационных моделей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 11 (часть 5). С. 746–749. URL: https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6219

38. Номоконова О. Ю. Оппозиционный метод в диагностике // Славянский форум, 2016. 3(13). С. 207–211.

39. Tsvetkov V.Ya. Opposition Variables as a Tool of Qualitative Analysis // World Applied Sciences Journal. 2014. 30 (11). P. 1703–1706. https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.30.11.14237

40. http://outofthefog.website/top-100-trait-blog/2015/11/4/triangulation-divide-conquer

41. Cloud H., Townsend J. Boundaries with Kids: When to Say Yes, How to Say No. Zondervan, 2009. 270 p. ISBN 978 0310565666.

42. Abelin E. The role of the father in the separation-individuation process // in J.B. McDevitt, C.F. Settlage (eds.) Separation-individuation: essays in honor of Margaret S. Mahler. New York: International Universities Press, 1971. P. 229–252. ISBN 9780823660650.

43. Abelin E. The organizer and triangulation model. http://organisator-modell.org/wcms/ftp//o/organisator-odell.org/uploads/explicittable_of_contents_final_1.1.5_14-11-16.pdf.

44. Rothbauer P.M. Triangulation // In Given L.M. (Ed.) The SAGE Encyclopedia of Qualitative Research Methods. Sage Publications, 2008. P. 892–894. http://dx.doi.org/10.4135/9781412963909.n468

45. Кудж С.А., Цветков В.Я. Качественные рассуждения: Монография. М.: МАКС Пресс, 2017. 112 с. ISBN 978-5-317-05681-0.

46. Denzin N.K. Sociological Methods: A Sourcebook. (5th Edn). Aldine Transaction, 2006. 600 p. ISBN 978-0-202-30840-1

47. Morris D. Behind the Oval Office: getting reelected against all odds (2th. ed.). Los Angeles: Renaissance Books, 1999. P. 80. ISBN 978-1580630535.

48. Goldberg J. Clintonian triangulation comes full circle // Los Angeles Times. December 18, 2007. Retrieved 29 December 2014.

49. Sanger D.E. Where Clinton Turned Right, Obama Plowed Ahea // The New York Times. 2010-01-29. Retrieved 2010-05-26

50. Геодезия, картография, геоинформатика, кадастр: Энциклопедия. В 2 х т. / Под ред. А.В. Бородко, В.П. Савиных. М.: ООО «Геодезкартиздат», 2008. Т. II. 464 с.

51. Delaunay B. Sur la sphère vide // Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk. 1934. V. 7. P. 793-800. (in French).

References

1. McDonnell K. A Trinitarian Theology of the Holy Spirit? *Theological Studies.* 1985;46(2):191-227. https://doi.org/10.1177/004056398504600201

2. Grenz S.J. The social god and the relational self: A Trinitarian theology of the imago Dei. Louisville: Westminster John Knox Press, 2001. 345 p.

3. Gunton C.E. The promise of trinitarian theology. A&C Black, 2003. 251 p.

4. Emery G. The Trinitarian Theology of St Thomas Aquinas. Oxford: Oxford University Press, 2007. 440 p.

5. Fokin A.R. Antique Philosophy and the Formation of Trinitarian Doctrine in Latin Patristics: Thesis ... of Doctor of Philosophy. M.: Institute of Philosophy of the Russian Academy of Sciences, 2013. 472 p. (in Russ.)

6. Kärkkäinen V.M. Trinity and Religious Pluralism: The Doctrine of the Trinity in Christian Theology of Religions. Routledge, 2017. 204 p.

7. Barantsev R.G. On Trinitarian Methodology. In: Philosophical Century. Almanac. Vol. 7. Between physics and metaphysics: science and philosophy. St. Petersburg, 1998. P. 51-61.

8. Barantsev R.G. System Triad: Structural Cell for Synthesis. *Sistemnye issledovaniya. Yezhegodnik 1988* = Systems Research. Yearbook 1988. Moscow: Publishing house Nauka, 1989. P. 193-209. (in Russ.)

9. Stone J. Technology and War: A Trinitarian Analysis. *Defense & Security Analysis.* 2007;23(1):27-40. http://dx.doi.org/10.1080/14751790701254441

10. Oleynik A.N. Triangulation in content analysis. Methodology issues and empirical testing. *Sotsiologicheskie issledovaniya = Sociological Stadies.* 2009;2:65-79. (in Russ.)

11. Tsvetkov V.Ya. Triad as an interpretive system. Persektivy nauki i obrazovaniya = Perspectives of Science &Education. 2015;6(18):18-23/ (in Russ.) Available: psejournal.wordpress.com/archive15/15-06/

12. Papanikolaou A. Reasonable faith and a trinitarian logic: Faith and Reason in Eastern Orthodox Theology. In: Restoring Faith in Reason / eds. L.P. Hemming. Notre Dame, Indiana: University of Notre Dame Press, 2002. P. 237–255.

13. Bubnov V.A. Logical operations of three-valued logic. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta = Bulletin of the Omsk State Pedagogical University. 2006. www.omsk.edu. Access date 10/12/2017 (in Russ.)

14. Jongsma C. Poythress's Trinitarian Logic: A Review Essay // Pro Rege. 2014. V. 42. № 4. P. 6–15. Available at: https://digitalcollections.dordt.edu/pro_rege/vol42/iss4/2

15. Zhu Z. Trinitarian relation inquiry system in systems/management approaches? - More findings // in Sustainable Technology and Complex ecological and Social Systems, proceedings of the 42nd Annual Conference of the International Society for the Systems Sciences, July 19–24, Atlanta, Georgia, ISBN 0-9664183-0-1, eds., Allen, J. and Wilby, J., the last chapter

16. Cvetkov V.Ya. Trinitarian systems in management. *Sovremennye tekhnologii upravleniya = Modern Management Technology.* 2017;3(75):2-10. Available at: https://sovman.ru/en/article/7501/ (in Russ.)

17. Opryatnaya O.N. Trinitarian approach as a methodological basis for complexity management. *Sotsiologiya: metodologiya, metody, matematicheskoe modelirovanie = Sociology: Methodology, Methods, Mathematical Modeling.* 2005;0(21):29-50. (in Russ.)

18. Calton P.M. Hegel's Metaphysics of God: The Ontological Proof as the Development of a Trinitarian Divine Ontology. Ashgate Publishing, 2001. 140 p.

19. Ilman V.M. Algorithms for triangulation of plane regions along irregular networks of points. *Algoritmy i programmy = Algorithms and Programs, VIEMS.* 1985;10 (88): S. 3-35. (in Russ.)

20. Yusov E.A., Turlapov V.E. Adaptive terrain triangulation using the representation of quad trees by vertex textures and wavelet estimation of significance. *Programming and Computer Software.* 2008;34(5):245-256. https://doi.org/10.1134/S0361768808050010

21. Pekhterev V. V., Vishnyakov S. V., Tchobanou M. K. Adaptive Triangulation and Image Compression.

Informatsionnye tekhnologii = Information technologies. 2013;5:41-46. (in Russ.)

22. Firago B.A. Cosmic triangulation by the method of astrometry of Earth satellites. *Astronomicheskii zhurnal = Astronomy Reports.* 1969;1-3:180-191. (in Russ.)

23. Verichev A.V., Fedoseev V.A. Protecting images with digital watermarks on a triangulation grid of characteristic points. In: Advanced Information Technologies and Scientific Computing (PIT 2013): Proceedings of the International Scientific Conference. 2013. P. 92-96. (in Russ.)

24. Gaisin R.R., Nikiforova A.V., Kugurakova V.V., Sachenkov O.A. Method for threedimensional cross-platform visualization tomography data. Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2013;4:137-139. (in Russ.)

25. Guseltseva M.S. Triangulation as a metaphorical construct: history and methodological perspectives. Voprosy psikhologii. 2014;5:3-14. (in Russ.)

26. Busygin B.S., Zatsepin E.P. The 3-D Triangulation Method in Problems of Cluster Analysis. *Штучний інтелект.* 2010;1:16-24.http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/56117

27. Tsvetkov V.Ya. Trinitarian systems. *International journal of applied and fundamental research.* 2016;11(3): 556-556. URL: https://applied-research.ru/ru/article/view?id=10539 (дата обращения: 06.12.2019). (in Russ.)

28. Bertalanffy L. von. General System Theory – A Critical Review. In: Research on the general theory of systems. M.: Progress Publ., 1969. P. 23-82. (in Russ.)

29. Volkova V.N., Denisov A.A. Fundamentals of systems theory and system analysis. SPb.: Publishing house of SPbGT, 2001. 512 p. (in Russ.)

30. Tsvetkov V.Ya. Solving problems using a systematic analysis. *Perspektivy nauki i obrazovaniya = Perspectives of Science and Education.* 2015;1(13):50-55. (in Russ.) http://www.pnojournal.wordpress.com/archive15/15-01/

31. Vizing VG, Toft B. The coloring of incidentors and vertices of an undirected multigraph. *Diskretnyi analiz i issledovanie operatsii = Discretn. Anal. Issled. Oper. Ser. 1.* 2001;8(3):3-14. (in Russ.)

32. Kuznetsov A.M. Network multigraph mathematical model and class hierarchy. *Nauchno-issledovatel'skie publikatsii. = J. Scientific Research Publications.* 2013:1:87-93. (in Russ.)

33. Mac Lane S. Categories for the working mathematician. Springer, 1998. 315 p.

34. Awodey S. Category Theory. Oxford Logic Guides. 49 (2nd ed.). Oxford University Press, 2010. 328 p. ISBN 978-0-19-923718-0.

35. Wright S.E. From the semiotic triangle to the semantic web. *Journal of the International Institute for Terminology Research.* 2003;14:111-135.

36. Tsvetkov V. Ya. Not Transitive Method Preferences. *Journal of International Network Center for Fundamental and Applied Research.* 2015;3(1):34-42. https://doi.org/ 10.13187/jincfar.2015.3.34

37. Ozherelyeva T.A. Oppositional analysis of information models. *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2014;11(5):746-749. URL: https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6219

38. Nomokonova O.Yu. Opposition method in the diagnosis. *Slavyanskiy forum.* 2016;3(13):207-211. (in Russ.)

39. Tsvetkov V.Ya. Opposition Variables as a Tool of Qualitative Analysis // World Applied Sciences Journal. 2014. 30 (11). P. 1703–1706. https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.30.11.14237

40. http://outofthefog.website/top-100-trait-blog/2015/11/4/triangulation-divide-conquer

41. Cloud H., Townsend J. Boundaries with Kids: When to Say Yes, How to Say No. Zondervan, 2009. 270 p. ISBN 978 0310565666.

42. Abelin E. The role of the father in the separation-individuation process // in J.B. McDevitt, C.F. Settlage (eds.) Separation-individuation: essays in honor of Margaret S. Mahler. New York: International Universities Press, 1971. P. 229-252. ISBN 9780823660650.

43. Abelin E. The organizer and triangulation model. http://organisator-modell.org/wcms/ftp//o/organisator-odell.org/uploads/explicittable_of_contents_final_1.1.5_14-11-16.pdf.

44. Rothbauer P.M. Triangulation. In: Given L.M. (Ed.) The SAGE Encyclopedia of Qualitative Research Methods. Sage Publications, 2008. P. 892-894. http://dx.doi.org/10.4135/9781412963909.n468

45. Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya. Qualitative Reasoning: Monograph. M.: MAX Press Publ., 2017. 112 p. ISBN 978-5-317-05681-0. (in Russ.)

46. Denzin N.K. Sociological Methods: A Sourcebook. (5th Edn). Aldine Transaction, 2006. 600 p. ISBN 978-0-202-30840-1

47. Morris D. Behind the Oval Office: getting reelected against all odds (2th. ed.). Los Angeles: Renaissance Books, 1999. P. 80. ISBN 978-1580630535.

48. Goldberg J. Clintonian triangulation comes full circle. *Los Angeles Times.* December 18, 2007. Retrieved 29 December 2014.

49. Sanger D.E. Where Clinton Turned Right, Obama Plowed Ahea. *The New York Times.* 2010-01-29. Retrieved 2010-05-26

50. Geodesy, cartography, geoinformatics, cadastre: Encyclopedia. In 2th V. / Ed. A.V. Borodko, V.P. Savinykh. M.: *LLC "Geodezkartizdat"*, 2008. V. II. 464 p. (in Russ.)

51. Delaunay B. Sur la sphère vide. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk.* 1934;7:793-800. (in French).

Об авторах:

Кудж Станислав Алексеевич, доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 56521711400

Цветков Виктор Яковлевич, доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, советник ректората ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 56069916700

About the authors:

Stanislav A. Kudzh, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Rector of the MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 56521711400

Viktor Ya. Tsvetkov, Dr. of Sci. (Engineering), Dr. of Sci. (Economics), Professor, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 56069916700

Свидетельство о регистрации СМИ *Эл № ФС 77-74578 от 14 декабря 2018 г.*

Дата опубликования *29 ноября 2019 г.*

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

https://www.rtj-mirea.ru

МИРЭА
Российский
технологический
университет