



ISSN 2413-9599 (Print)
ISSN 2541-870X (Online)

РАДИО ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Том 29, № 2, 2019

RADIO INDUSTRY (Russia)

Vol. 29, no. 2, 2019

РАДИОПРОМЫШЛЕННОСТЬ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С 1991 ГОДА

Т. 29, № 2. 2019

Научный журнал «Радиопромышленность» публикует научные материалы по теоретическим и прикладным разработкам в радиопромышленности. В журнале публикуются материалы по приборостроению, метрологии, информационно-измерительным приборам и системам, радиолокации и радионавигации, радиотехнике и связи, информатике, вычислительной технике и управлению, организации и управлению предприятиями оборонно-промышленного комплекса.

Журнал выходит ежеквартально.

Журнал осуществляет научное рецензирование («двустороннее слепое») всех поступающих в редакцию материалов с целью экспертной оценки.

Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в издательстве и редакции в течение 5 лет.

Редакция проверяет присланные материалы на заимствования и плагиат.

Редакция направляет авторам предоставленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ.

Редакция оставляет за собой право не вступать в переписку с авторами статей, получившими мотивированный отказ в публикации.

Материалы, переданные в редакцию, не возвращаются.

Журнал придерживается стандартов редакционной этики в соответствии с международной практикой редактирования, рецензирования, изданий и авторства научных публикаций и рекомендациями Комитета по этике научных публикаций.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-41699 от 20 августа 2010 года).

Журнал входит в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК).

Журнал индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), РГБ, EBSCO, Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Журнал является членом Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef.

Рукописи печатаются бесплатно.

Требования к оформлению статей размещены на сайте www.radioprom.org.

Ответственность за наличие в присланных материалах данных, не подлежащих открытой публикации, несут авторы.

Ответственность за содержание рекламных материалов несут рекламодатели.

При перепечатке материалов ссылка на журнал «Радиопромышленность» обязательна.

Полное или частичное воспроизведение в СМИ материалов, опубликованных в журнале, допускается только с разрешения редакции.

Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная 

Учредитель и издатель
АО «ЦНИИ «Электроника»

Генеральный директор,
главный редактор
Алёна Фомина
instel@instel.ru
+7 (495) 940-65-00

Руководитель
издательского отдела
Полина Корсунская
korsunskaia_p@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Выпускающий редактор
Елена Басова
redaktor@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Реклама
Михаил Фельдман
feldman_m@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Распространение и подписка
Вероника Филиппова
filiippova_v@instel.ru
+7 (495) 940-65-46

Корректор
Екатерина Врублевская
Компьютерная верстка
Григорий Арифулин

Адрес редакции
127299, г. Москва,
ул. Космонавта Волкова, д. 12
+7 (495) 940-65-00
www.instel.ru
instel@instel.ru

Подписка
В редакции
publish@instel.ru
+7 (495) 940-65-46

Агентство «Роспечать»
Индекс 25885
(каталог «Газеты. Журналы»)
Индекс 59982
(каталог «Научно-технические издания»)

Агентство «Урал-Пресс»
www.ural-press.ru
+7 (495) 961-23-62

Подписано в печать 20.05.2019.
Отпечатано в ООО «Типография «Миттель Пресс».

RADIO INDUSTRY (RUSSIA)

(Radiopromyshlennost)

SCIENTIFIC JOURNAL

PUBLISHED FROM 1991

Vol. 29, no. 2. 2019

«Radio industry (Russia)» publishes scientific materials on theoretical and applied developments in radio industry. The journal welcomes materials exploring the following problems: instrumentation, metrology, information-measuring devices and systems, radiolocation and radio navigation, radio engineering and communications, computer science, computer technology and management, organization and management of enterprises of the military-industrial complex.

The journal is published quarterly.

For complex expert evaluation all manuscripts undergo «double-blind» review.

All reviewers are acknowledged experts in areas they are responsible for. Reviews are stored in the publishing house and publishing office during 5 years.

Editorial staff checks all incoming manuscripts on plagiarism.

Editorial staff sends to the authors of the submitted materials copies of reviews or a substantiated refusal.

Editorial staff does not correspond with authors, whose articles are considered unsuitable for the publication.

Manuscripts sent to the editor will not be returned.

The journal is registered in Russian Index of Scientific Citations and submits information about the published articles to Russian Index of Scientific Citations.

The opinions expressed by authors in the journal do not necessarily reflect those of the Editorial Staff.

The journal is registered at the Federal Service for Compliance with the Law in Mass Communications and Cultural Heritage Protection (Certificate PI № FS77-41699 of August 20th, 2010).

The journal is listed in the catalogue of peer-reviewed academic journals and publications for publishing of principal scientific findings of dissertations.

The journal is indexed and archived by Russian Index of Scientific Citations, Russian State Library (RSL), EBSCO, Directory of Open Access Journals (DOAJ).

The journal is a member of CrossRef and ASEP.

Manuscripts are published free of charge.

Requirements for articles are available on the website www.radioprom.org.

Authors are responsible for classified information in their articles.

Advertisers are responsible for the content of advertisements.

All the materials of the «Radio industry (Russia)» journal are available under Creative Commons «Attribution» 4.0 license 

Founder and publisher

Central Research Institute
of Economy, Management Systems
and Information «Electronics»

General director, Editor in Chief

Alena Fomina
instel@instel.ru
+7 (495) 940-65-00

Head of publish department

Polina Korsunskaya
korsunskaya_p@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Managing editor

Elena Basova
redaktor@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Advertising

Mikhail Feldman
feldman_m@instel.ru
+7 (495) 940-65-24

Distribution and subscription

Veronika Filippova
filippova_v@instel.ru
+7 (495) 940-65-46

Proofreader

Ekaterina Vrublevskaya

Design

Grigory Arifulin

Editorial office

127299, Moscow,
Kosmonavta Volkova st., 12
+7 (495) 940-65-00
www.instel.ru
instel@instel.ru

Subscription

publish@instel.ru
+7 (495) 940-65-46

Signed to print 20.05.2019.

Printed in Mittel Press.

РАДИОПРОМЫШЛЕННОСТЬ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С 1991 ГОДА

Т. 29, № 2. 2019

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Фомина Алёна Владимировна – доктор экономических наук, доцент, член-корреспондент Академии военных наук, генеральный директор АО «ЦНИИ «Электроника», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5853-0309>, instel@instel.ru (Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Агеев Александр Иванович – доктор экономических наук, профессор, эксперт РАН, генеральный директор Института экономических стратегий РАН и Международного научно-исследовательского института проблем управления, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2826-2702>, ines@inesnet.ru (Москва, Россия)

Анцев Георгий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, генеральный директор – генеральный конструктор АО «НПП «Радар ммс», radar@radar-mms.com (Санкт-Петербург, Россия)

Балашов Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального конструктора по программно-целевому развитию АО «НПП «Радар ммс», ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4642-5701>, balashov_vm@radar-mms.com (Санкт-Петербург, Россия)

Батковский Александр Михайлович – доктор экономических наук, советник генерального директора АО «ЦНИИ «Электроника», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5145-5748>, batkovskiy_a@instel.ru (Москва, Россия)

Белоус Анатолий Иванович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заместитель генерального директора по науке и маркетингу ОАО «ИНТЕГРАЛ», office@integral.by (Минск, Республика Беларусь)

Богословский Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора научно-производственного комплекса «Микроэлектроники, микросистемотехники и нанотехнологий» АО «НПП «Радар ммс», radar@radar-mms.com (Санкт-Петербург, Россия)

Бутаев Михаил Матвеевич – доктор технических наук, профессор, ученый секретарь АО «НПП «Рубин», mail@npp-rubin.ru (Пенза, Россия)

Жибуртович Николай Юрьевич – доктор технических наук, профессор, руководитель группы координации перспективных научных исследований АО «Корпорация Фазotron-НИИР», info@phazotron.com (Москва, Россия)

Зозуля Юрий Викторович – доктор экономических наук, профессор, руководитель представительства в Новосибирской области ГК «Ростех» (Новосибирск, Россия)

Исаев Вячеслав Михайлович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора ФГУП «МНИИРИП», info@mniirip.ru (Москва, Россия)

Канащенков Анатолий Иванович – доктор технических наук, профессор, главный конструктор АО «Корпорация «Фазotron-НИИР», info@phazotron.com (Москва, Россия)

Козлов Геннадий Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, заместитель руководителя Аппарата генерального директора – руководитель секретариата АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», antey@almaz-antey.ru (Москва, Россия)

Красников Геннадий Яковлевич – доктор технических наук, профессор, академик РАН, генеральный директор АО «НИИМЭ», gkrasnikov@niime.ru (Москва, Россия)

Красовский Виктор Евгеньевич – кандидат технических наук, профессор, ученый секретарь ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука», ineum@ineum.ru (Москва, Россия)

Курносов Валерий Игоревич – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе АО «НИИ «Рубин», inforubin@rubin-spb.ru (Санкт-Петербург, Россия)

Левитас Борисас – кандидат технических наук, директор Geozondas Ltd., levitas@geozondas.com (Вильнюс, Литва)

Махутов Николай Андреевич – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, председатель рабочей группы при президенте РАН по анализу риска и проблем безопасности, kei51@mail.ru (Москва, Россия)

Николашин Юрий Львович – кандидат технических наук, генеральный директор ПАО «Интелтех», генеральный конструктор системы управления ВМФ, intelteh@inteltech.ru (Санкт-Петербург, Россия)

Петричкович Ярослав Ярославович – доктор технических наук, профессор, президент АО «Элвис-НеоТек», welcome@elkeesneotek.com (Москва, Россия)

Сазонов Андрей Юрьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий радиоконструктор Scanreco AB, info@scanreco.com (Скархолмен, Швеция)

Сергеев Виктор Игоревич – доктор технических наук, доцент, начальник Воронежского конструкторского бюро антенно-фидерных устройств (ВКБ АФУ), vcb-ad@vcb-ad.vrn.ru (Воронеж, Россия)

Смирнов Павел Игоревич – кандидат технических наук, доцент, генеральный директор АО «НИИ «Масштаб», info@mashtab.org (Санкт-Петербург, Россия)

Сорокин Сергей Александрович – доктор технических наук, генеральный конструктор АО «НИИВК им. М.А. Карцева», postoffice@niivk.ru (Москва, Россия)

Топфер Ханнес – доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института информационных технологий, Hannes.Toepfer@tu-ilmenau.de (Ильменау, Германия)

Хохлов Сергей Владимирович – директор Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, khokhlov@minprom.gov.ru (Москва, Россия)

Якунин Александр Сергеевич – кандидат социологических наук, генеральный директор АО «Воентелеком», info@voentelecom.ru (Москва, Россия)

RADIO INDUSTRY (RUSSIA)

(Radiopromyshlennost)

SCIENTIFIC JOURNAL

PUBLISHED FROM 1991

Vol. 29, no. 2. 2019

EDITOR IN CHIEF

Alena V. Fomina – Dr.Sci. (Economics), Associate Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Military Sciences, General Director of Central Research Institute of Economy, Management Systems and Information «Electronics», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5853-0309>, instel@instel.ru (Moscow, Russia)

EDITORIAL COUNCIL

Alexander I. Ageev – Dr.Sci. (Economics), General Director of Institute for Economic Strategies, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2826-2702>, ines@inesnet.ru (Moscow, Russia)

Georgy V. Antsev – Ph.D. (Engineering), Associate Professor, General Director – General Designer of the Research and Production Enterprise «Radar mms», radar@radar-mms.com (Saint-Petersburg, Russia)

Victor M. Balashov – Dr.Sci. (Engineering), Professor, Deputy General Designer of the Research and Production Enterprise «Radar mms» for Program-Target Development, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4642-5701>, balashov_vm@radar-mms.com (Saint-Petersburg, Russia)

Alexander M. Batkovskiy – Dr.Sci. (Economics), Advisor to the General Director of Central Research Institute of Economy, Management Systems and Information «Electronics», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5145-5748>, batkovskiy_a@instel.ru (Moscow, Russia)

Anatoly I. Belous – Dr.Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Deputy General Director of Joint-stock company «INTEGRAL» for Science and Marketing, office@integral.by (Minsk, Republic of Belarus)

Sergey V. Bogoslovsky – Dr.Sci. (Engineering), Professor, Deputy Director of the Research and Production Complex «Microelectronics, Microsystems and Nanotechnologies» of the Research and Production Enterprise «Radar mms», radar@radar-mms.com (Saint-Petersburg, Russia)

Mikhail M. Butaev – Dr.Sci. (Engineering), Professor, Scientific Secretary of the Research and Production Enterprise «Rubin», mail@npp-rubin.ru (Penza, Russia)

Nikolay Yu. Zhiburovich – Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Coordinating Group for Advanced Scientific Research of Corporation «Phazotron-Scientific Research Institute of Radio», info@phazotron.com (Moscow, Russia)

Yuriy V. Zozulya – Dr.Sci. (Economics), Professor, Head of the Novosibirsk Representative Office of the State Corporation «Rostec» (Novosibirsk, Russia)

Vyacheslav M. Isaev – Dr.Sci. (Engineering), Professor, Deputy Director of Federal state unitary enterprise «Mytishchi Scientific Research Institute of Radio Measuring Instruments», info@mniirip.ru (Moscow, Russia)

Anatoly I. Kanaschenkov – Dr.Sci. (Engineering), Professor, Chief Designer of Corporation «Phazotron-Scientific Research Institute of Radio», info@phazotron.com (Moscow, Russia)

Gennady V. Kozlov – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Deputy Head of the General Director's Office – Head of the Secretariat of Joint-stock company «Almaz-Antey» Air and Space Defence Corporation», antey@almaz-antey.ru (Moscow, Russia)

Gennady Ya. Krasnikov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Engineering), Professor, General Director of Molecular Electronics Research Institute, gkrasnikov@niime.ru (Moscow, Russia)

Viktor E. Krasovsky – Ph.D. (Engineering), Professor, Scientific Secretary of Institute of Electronic Control Computers named after I.S. Brook, ineum@ineum.ru (Moscow, Russia)

Valery I. Kurnosov – Dr.Sci. (Engineering), Professor, Deputy Director General for Research of Rubin Research Institute, inforubin@rubin-spb.ru (Saint-Petersburg, Russia)

Borisas Levitas – Ph.D. (Engineering), Director of Geozondas Ltd., levitas@geozondas.com (Vilnius, Lithuania)

Nikolay A. Makhutov – Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Chairman of the Working Group under the President of the Russian Academy of Sciences on Risk Analysis and Security Problems, kei51@mail.ru (Moscow, Russia)

Yuriy L. Nikolashin – Ph.D. (Engineering), General Director of Public Joint-stock company «Inteltech», General Designer of Russian Navy Management System, intelteh@inteltech.ru (Saint-Petersburg, Russia)

Yaroslav Ya. Petrichkovich – Dr.Sci. (Engineering), Professor, President of Joint-stock company «ELVEES NeoTek», welcome@elveesneotek.com (Moscow, Russia)

Andrey Yu. Sazonov – Ph.D. (Engineering), Leading Radio Designer of Scanreco AB, info@scanreco.com (Skarholmen, Sweden)

Viktor I. Sergeev – Dr.Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Voronezh Design Bureau of Antenna-Feeder Devices, vcb-ad@vcb-ad.vrn.ru (Voronezh, Russia)

Pavel I. Smirnov – Ph.D. (Engineering), General Director of Masshtab Research Institute, info@mashtab.org (Saint-Petersburg, Russia)

Sergey A. Sorokin – Dr.Sci. (Engineering), General Designer of M. A. Kartsev R&D Institute for Computer Complexes, postoffice@niivk.ru (Moscow, Russia)

Hannes Toepfer – Dr.Sci. (Engineering), Full Professor, Head of Advanced Electromagnetics Group, Deputy Director of Institute of Information Technology, Vice Dean, Hannes.Toepfer@tu-ilmenau.de (Ilmenau, Germany)

Sergey V. Khokhlov – Head of Department of Radioelectronic Industry of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, khokhlov@minprom.gov.ru (Moscow, Russia)

Alexander S. Yakunin – Ph.D. (Sociology), General Director of Joint-stock company «Voentelecom», info@voentelecom.ru (Moscow, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

Стратегическое преимущество.....	7	Чеботарева И. Я., Камшилин А. Н. Экспериментальное изучение механоэлектрических преобразований при слабом насыщении горных пород.....	45
ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ			
Байбекова Ф. Н., Подольцев В. В., Беспалова Н. М., Сологубова Л. А.		Слободзян Н. С. Оценка точности разомкнутого линейного привода, достигимой методом калибровки и компенсации линейного теплового расширения.....	54
Обзор способов снижения избыточности телеметрической информации	8		
Знаменский Д. В., Куцевол В. Н.			
Разработка потактового симулятора подсистемы памяти процессорного ядра «Эльбрус».....	17		
Ануфриенко А. Ю.			
Особенности проектирования систем Интернета вещей.....	28		
Крылов В. П., Богачев А. М., Пронин Т. Ю.			
Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и неразрушающий контроль потенциальных дефектов полупроводниковой электронной компонентной базы	35		
ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВО			
Каримов К. Н., Липатов Ю. В., Хайбуллин Р. К. Проектирование и оценка крупного автостереоскопического лазерного дисплея с широким обзором для наружного применения.....	62		
Лестев А. М., Федоров М. В., Евстафьев С. Д.			
Идентификация структуры шумов микромеханических инерциальных преобразователей параметров движения	69		
Волков В. Ю., Богачев М. И., Маркелов О. А. Многопороговая селекция объектов на изображениях в системах дистанционного наблюдения	76		
ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ 89			

(Radiopromyshlennost)

www.radioprom.org
 DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2

ISSN 2413-9599 (Print)
 ISSN 2541-870X (Online)

CONTENTS

Strategic advantage.....	7
RESEARCH AND DEVELOPMENT OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT AND SYSTEMS	
Baibekova F. N., Podoltsev V. V., Bespalova N. M., Sologubova L. A.	
Overview of the ways to reduce telemetric information redundancy	8
Znamenskiy D. V., Kutsevol V. N.	
Development of a cycle-accurate simulator of the Elbrus processor core memory subsystem	17
Anufrienko A. Yu.	
Features of designing IoT systems.....	28
Krylov V. P., Bogachev A. M., Pronin T. Yu.	
Deep level relaxation spectroscopy and non-destructive testing of potential defects in the semiconductor electronic component base	35

Chebotareva I. Ya., Kamshilin A. N.	
Experimental study of mechanolectric transformations in low saturated rocks	45
Slobodzyan N. S.	
Evaluation of open-loop linear drive accuracy achieved by calibration and linear thermal expansion compensation	54

TECHNOLOGIES AND PRODUCTION

Karimov K. N., Lipatov Yu. V., Khaybullin R. K.	
Design and evaluation of a large, wide-scope autostereoscopic laser display for outdoor use.....	62
Lestev A. M., Fedorov M. V., Evstafiev S. D.	
Identification of the noise structure of micromechanical inertial transducers of motion parameters	69
Volkov V. Yu., Bogachev M. I., Markelov O. A.	
Multi-threshold object selection in images of remote sensing systems	76

RULES FOR SUBMITTING ARTICLES



Стратегическое преимущество

Конкурентная борьба в чистом виде опирается на повышение эффективности деятельности субъектов, будь то человек, организация или государство в целом. Цифровизация открывает новые возможности в части повышения эффективности управления информацией – автоматизированный сбор, обработку и выдачу в нужный момент данных для поддержки управленческих решений, а также индикации возникающих проблем развития. Разработка новых решений, от личных помощников для контроля здоровья до систем управления отраслями промышленности национального уровня, – одно из приоритетных направлений цифровизации экономики. Успех государства в целом складывается из эффективности каждого ее гражданина и каждой компании, работающей на ее территории.

Казалось бы, во внедрении таких систем должны иметь высокую личную заинтересованность практически все субъекты. Однако на практике все значительно сложнее. Развитие подобных систем в силу высокой стоимости и сложности их разработки, а также требований к высокой культуре производства вызывают серьезное недопонимание в промышленности. Для получения эффекта от внедрения систем проектирования, управления и сопровождения иных ключевых функций требуется значительно больше трудозатрат, чем при традиционной модернизации организации.

Одной из тенденций последних лет становится развитие сенсорных сетей в рамках концепции Интернета вещей. Количество подключенных к сети устройств и, как следствие, объемы получаемой и требующей обработки информации стремительно увеличиваются. Современные реалии требуют повышения производительности и безопасности технических систем, вследствие чего усложняются процессы их проектирования, модернизируются производственные технологии и методы анализа данных.

Системы телеметрии, применяемые для удаленного сбора информации, поступающей с многочисленных датчиков, позволяют в реальном времени отслеживать изменения в параметрах работы различных устройств. Наличие актуальной информации позволяет при необходимости оперативно принимать решения. Тем не менее появляются и сложности – большие объемы собираемых данных и избыточность информации. В результате ресурсоемкость процессов обработки информации резко возрастает, при этом увеличивается вероятность возникновения ошибки в процессе принятия решений. Во избежание образования дефицита вычислительной мощности обрабатывающей сети повышают производительность используемых вычислительных систем и каналов связи, либо устраниют избыточность информации, либо применяют оба решения. И если первое, как правило, требует высоких затрат, то второе, в конечном итоге, способно снизить объем затрат на эксплуатацию сетей. Для оптимизации трафика, передаваемого телеметрическими системами, применяется комплекс средств: проводится анализ передаваемой информации, данные проходят фильтрацию – осуществляются выделение полезной информации и выявление ошибок, для уменьшения объема передаваемых данных применяются сжатие и удаление нецелевых сведений.

На сегодняшний день процесс формирования цифровой экономики в России находится в начальной фазе. Развитие концепции Интернета вещей только начинается, однако следует понимать, что без него невозможно соответствовать современным глобальным тенденциям. Низкая доля автоматизации отдельных производств в России демонстрирует необходимость внедрения современных и перспективных технологий для перехода к концепции Индустрии 4.0. В таких условиях особенно важно стимулировать и поддерживать разработку отечественных инновационных решений. Реализация технологического потенциала способна обеспечить устойчивое будущее нашей страны.

А.В. Фомина,
доктор экономических наук,
главный редактор журнала
«Радиопромышленность»

**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ /
RESEARCH AND DEVELOPMENT
OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT AND SYSTEMS**

DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-8-16

УДК 621.398

Обзор способов снижения избыточности телеметрической информации

**Ф. Н. Байбекова¹, В. В. Подольцев¹, Н. М. Беспалова¹,
Л. А. Сологубова¹**

¹ Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С. М. Штеменко, Краснодар, Россия

Избыточность телеметрической информации (ТМИ) ощутимо усложняет обработку потоков информации в реальном времени. Для ускорения процесса обработки телеметрии необходимо применение методов снижения избыточности ТМИ с целью сокращения потоков ТМИ, поступающих в системы мониторинга с сохранением при этом высокой скорости обработки и достоверности информации. В статье представлен обзор методов сокращения избыточности ТМИ, таких как увеличение физической скорости канала передачи ТМИ, алгоритм Хаффмана, пакетный механизм формирования и передачи ТМИ, адаптивный разностный алгоритм, алгоритм преобразования данных на основе представления их образами-остатками, коды Голомба–Райса, метод обратимого сжатия. Рассмотрены достоинства и недостатки каждого из них. Даны рекомендации по использованию многоуровневой системы сжатия ТМИ, позволяющей эффективно комбинировать целевые алгоритмы сжатия данных, которые дают наибольший коэффициент сжатия в зависимости от типа передаваемой ТМИ.

Ключевые слова: телеметрическая информация, избыточность, метод сжатия, управляемая телеметрия, пакетная телеметрия, обратимое сжатие

Для цитирования:

Обзор способов снижения избыточности телеметрической информации / Ф. Н. Байбекова, В. В. Подольцев, Н. М. Беспалова, Л. А. Сологубова // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 2. С. 8–16. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-8-16

© Байбекова Ф. Н., Подольцев В. В., Беспалова Н. М., Сологубова Л. А., 2019



Overview of the ways to reduce telemetric information redundancy

F.N. Baibekova¹, V.V. Podoltsev¹, N.M. Bespalova¹, L.A. Sologubova¹

¹Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Shtemenko, Krasnodar, Russia

The redundancy of telemetric information significantly complicates the real-time processing of the information flows. To speed up the telemetry processing process, the methods for telemetric information redundancy reduction should be applied in order to reduce its flows entering the monitoring systems while maintaining a high speed of processing and reliability of the information. The article provides an overview of the methods for reduction of telemetric information redundancy, such as the increase in PHY-rate of telemetry channel, the Huffman algorithm, the batch mechanism for generation and transmission of telemetry information, the adaptive difference algorithm, the algorithm for transmission of the information based on its representation by residual images, Golomb-Rice codes, reversible compression method. The advantages and disadvantages of each of them are considered. Recommendations on the use of multi-level telemetry information compression system are given, which makes it possible to effectively combine target data compression algorithms that give the highest compression ratio depending on the type of telemetry information transmitted.

Keywords: telemetry information, redundancy, compression method, controlled telemetry, packet telemetry, reversible compression

For citation:

Baibekova F.N., Podoltsev V.V., Bespalova N.M., Sologubova L.A. Overview of the ways to reduce telemetric information redundancy. Radiopromyshlennost, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 8–16 (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-8-16

Введение

Для большинства современных многоканальных телеметрических станций характерна одинаковая частота опроса по всем телеметрическим каналам. При штатном режиме работы бортовой системы частота опроса оказывается сильно завышенной, и объем получаемой телеметрической информации (ТМИ) избыточен.

В настоящее время автоматизированные системы обработки информации в ракетно-космической технике характеризуются высокими требованиями к качеству обработанной информации и оперативностью многопотоковой обработки в условиях весьма ограниченного количества времени, отводимого на решение этих задач. Избыточность ТМИ ощутимо усложняет обработку потоков информации в реальном времени. Чтобы ускорить процесс обработки информации, необходимо сократить потоки ТМИ, поступающие в системы мониторинга технического состояния космических аппаратов (КА) с сохранением при этом высокой скорости и достоверности обработки информации.

Причинами избыточности данных могут быть не соответствующий требованиям выбор контролируемых параметров, погрешности измерений, нерациональная структура передаваемых сообщений (транспортных кадров, сегментов передачи) и т.д.

Для уменьшения избыточности применяются следующие методы: оптимизация параметров

канала передачи ТМИ, предварительное сжатие ТМИ, алгоритм Хаффмана и т.д.

Снижение избыточности путем оптимизации параметров канала передачи ТМИ

В ряде случаев ширина частотной полосы передающего канала, соединяющего бортовые системы и системы сбора ТМИ, ограничена, как и его пропускная способность, в то время как доставка информации об измеряемых параметрах от всех источников должна быть гарантированно своевременной. Пакеты данных от источника, имеющие большую длину и занимающие канал передачи на значительные промежутки времени, затрудняют управление потоками ТМИ по причине вынужденной большой буферизации телеметрии от источников, для которых канал оказывается в данный промежуток времени недоступен. Избежать этих затруднений можно путем создания виртуальных каналов и сегментации пакетов ТМИ.

Один из очевидных способов сокращения избыточности – увеличение физической скорости канала передачи ТМИ. Для этого необходимо переключить канал ТМИ на диапазон более высоких частот, что невозможно без привлечения большего количества технических средств, поскольку используемые в настоящее время скорости передачи телеметрии (2, 4, 8 кбит/с) недостаточны для передачи больших объемов информации в кратчайшие сроки [1].

Предварительное сжатие ТМИ, алгоритм Хаффмана

Для сжатия данных чаще всего применяется так называемое прореживание отсчетов, когда для передачи осуществляется отбор одного из заданного количества отсчетов для каждого измеряемого параметра. Однако использование такого метода уменьшения объема ТМИ может привести к сокращению достоверности данных, особенно при возникновении нештатных ситуаций на борту КА в том случае, если отсчеты с важной информацией были исключены. В какой-то степени ликвидировать эту проблему можно, осредняя отсчеты и передавая среднее значение.

Достаточно распространенным методом сжатия данных также служит алгоритм Хаффмана. Он может помочь осуществить идеальное сжатие (сжатие данных до их энтропии) при соблюдении условия: вероятность символа равна отрицательной степени числа 2. Подробно суть алгоритма описана в [2, 3]. Кодирование Хаффмана является беспрефиксным, т.е. ни одно кодовое слово не является префиксом другого. Кодовые слова беспрефиксного кода представляются вершинами двоичного дерева.

Порядок построения двоичного дерева следующий:

- 1) составляется перечень символов кодируемого алфавита (в порядке уменьшения их вероятностей);
- 2) последовательными шагами от корня строится дерево:
 - a) кодируемые символы – листья строящегося дерева;
 - b) выбираются два символа с минимальной вероятностью;
 - c) выбранные символы помещаются в узлы и удаляются из перечня символов;

символ	код
A	0
B	100
C	101
D	11

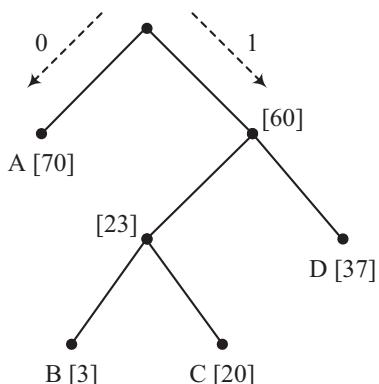


Рисунок 1. Пример дерева Хаффмана для четырех букв А, В, С, Д

Figure 1. An example of a Huffman tree for four letters A, B, C, D

- г) исключенные символы заменяются вспомогательным, вероятность которого определяется сложением вероятностей исключенных;
- д) если в перечне остается только один вспомогательный символ, дерево считается построенным (оставшийся символ представляет весь кодируемый алфавит) [3];
- 3) путем спуска по дереву определяются коды символов.

Каждый узел дерева либо является условным листом, либо имеет две ветви. Поворот налево – 0, поворот направо – 1. Нахождение в листе означает, что код следующего символа найден. Найденный символ фиксируется.

Повтором вышеперечисленных шагов определяются коды для всех символов. Пример такого дерева для четырех букв А, В, С, Д представлен на рис. 1.

Частоты – количество символов в кодируемом слове. Чтобы определить оптимальное дерево Хаффмана, имея информацию о частотах, нужно максимально сократить стоимость дерева. Определение стоимости дерева подробно рассмотрено в [4].

Чем больше символов в алфавите с минимальной вероятностью, тем больше вариантов построения дерева Хаффмана возможно, а следовательно, и больше различных кодов Хаффмана с одинаковой средней длиной можно получить.

По мере формирования кодов сжатые данные размещаются в буфере и далее передаются в канал передачи.

Длина кодов зависит от кодируемого алфавита. Логично, что чем больше символов в алфавите, тем меньше их вероятность, и наоборот. При малых вероятностях длина кодов Хаффмана велика. В алфавите с небольшим количеством символов ситуация противоположная.

В случае алфавита, состоящего только из двух символов, алгоритм Хаффмана неприменим, поскольку одному из символов будет определен код 0, а присваиваемый код не может быть меньше 1 бита.

Хотя и предполагается, что декодеру известны частоты символов алфавита, это редкий случай. Повторное чтение исходных данных может помочь решить проблему. При первом чтении определяются частоты, при втором данные сжимаются. Дерево Хаффмана формируется при этом между этапами. Такой полуадаптивный алгоритм, хотя и работает на практике, обладает низкой скоростью.

Целесообразнее использовать адаптивный (динамический) алгоритм Хаффмана, суть которого в том, что сначала формируется пустое дерево и коды символам не определяются. Первый входящий символ при размещении в выходной файл не сжимается. Далее этот символ размещается на дереве и ему определяется код, который тоже

будет размещен в файл при повторном появлении символа. При этом частота упомянутого символа увеличится на единицу. По завершении назначения каждого кода необходимо проверять, является ли измененное дерево деревом Хаффмана. Если это не так, требуется переформировать дерево и коды.

Все эти шаги зеркально дублируются декодером. Здесь появляется еще одна сложность. Необходимо знать, является ли образец еще не сжатым символом или это код переменной длины. Для устранения этой неоднозначности перед каждым несжатым символом должен идти специальный код esc (escape). При обнаружении этого кода декодер однозначно распознает далее следующий код, впервые появившийся на входе. Поскольку коды символов алфавита постоянно претерпевают изменения, код esc тоже должен изменяться. Единственным выходом является создание на дереве еще одного пустого листа с неизменяющейся частотой, равной нулю. В таком случае коду esc постоянно будет определяться ветвь из одних нулей. Даже при постоянном изменении дерева и расположении на нем пустого листа код esc будет указывать на каждый несжатый символ.

Если дерево строится для слишком большого количества символов, может произойти кодовое переполнение. В этом случае коды становятся длиннее. Слишком длинные коды (когда их длина превышает разрядность формируемого целого) приведут к сбою программы. Спасти ситуацию можно, если накопление битов кода будет происходить в связанным списке с возможностью добавления новых узлов. Тогда ограничивать длину кодов будет только доступный объем памяти. В качестве альтернативы можно накапливать код в длинной целой переменной. Первый вариант снижает быстродействие алгоритма, второй может привести к переполнению счетчиков символов [3].

Таким образом, можно сказать, что благодаря свойству префиксности коды Хаффмана обладают возможностью однозначного декодирования. Но вместе с тем у них есть и ряд недостатков, один из которых – сложность реализации [2]. Хранение частот символов открытого текста (вещественных чисел) ведет к потере точности и не только уменьшает быстродействие, но и требует дополнительной памяти, в связи с чем на практике чаще всего используют целочисленные переменные.

Пакетный механизм формирования и передачи ТМИ

Пакетная телеметрия представляет собой механизм, включающий стандартные структуры данных и протоколы, позволяющие упростить разработку и расширить возможности передачи ТМИ от источников.

Принцип пакетной телеметрии заключается в следующем. В соответствии с источниками ТМИ о различных процессах и состояниях бортовых систем КА группируются в информационные блоки (пакеты). Далее пакеты ТМИ транслируются по каналу передачи с возможностью полного и достоверного восстановления их принимающими устройствами. Согласно ГОСТ Р 56096–2014 «Системы передачи космических данных и информации. Пакетная телеметрия», телеметрическая система должна быть иерархической структурой, представляющей систему как формализованный набор операций в соответствии с рекомендациями Международного Консультативного Комитета по космическим системам передачи данных – Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS). Иерархическая модель телеметрических служб CCSDS состоит из семи уровней (рис. 2).

В рекомендациях комитета CCSDS речь идет только об уровнях пакетирования, сегментации и передачи. Сокращения избыточности данных не произойдет, если уровень, на котором осуществляется преобразование физических величин в блоки ТМИ, будет функционировать аналогично форматному механизму формирования и передачи телеметрии. Пакеты данных, принимаемые наземным комплексом управления (НКУ), будут содержать в большинстве своем повторяющуюся информацию. Кроме того, с точки зрения защиты информации использование этих рекомендаций небезопасно, так как облегчает противнику процесс дешифрования.

Для уменьшения избыточности пакетной ТМИ требуется дополнительно к пакетной ТМИ применить режим управляемой телеметрии, суть которого заключается в том, что блоки данных передаются исключительно по командным запросам, направляемым с НКУ в командно-измерительную систему (КИС) КА. Без запроса передача телеметрии не осуществляется.

Управляемая выдача ТМИ освобождает канал передачи данных от значительной части нагрузки, что позволяет увеличить число опрашиваемых источников. Одним из таких источников может быть система журналирования, отслеживающая управляющие команды бортового компьютера, взаимодействие бортовых систем и блоков, неисправность оборудования и аварийные ситуации на борту КА.

Важно правильно оценивать возможности реализации предложенного механизма управляемой выдачи ТМИ. Поскольку при соединении источников телеметрии с телеметрической КИС напрямую реализовать запросный механизм возможности нет, возникает необходимость создания аппаратного хранилища для накопления данных и дальнейшей передачи их в канал ТМИ.

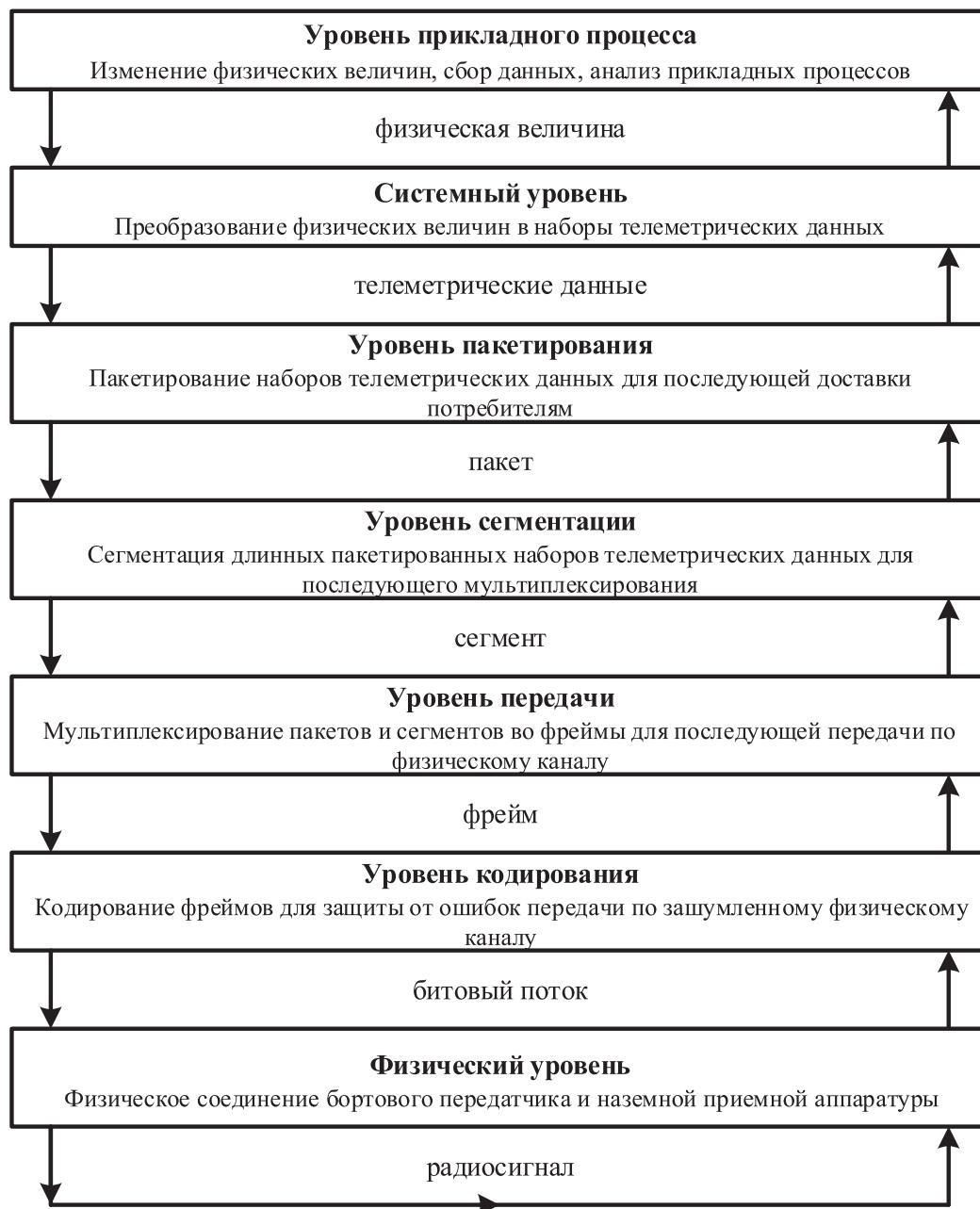


Рисунок 2. Семиуровневая иерархическая модель телеметрических служб

Figure 2. The seven-level hierarchical model of telemetry services

База данных (БД) может быть оптимальным вариантом такого хранилища. Она позволяет наиболее эффективно осуществлять хранение, запись, поиск и отбор информации, но с определенными условиями. База данных должна быть размещена в памяти с независимым энергообеспечением и обладающей возможностью ее перепрограммирования. Располагающаяся в КИС БД, состоящая из пакета взаимосвязанных файлов (символьных комбинаций, таблиц), позволит существенно разгрузить бортовой компьютер в части управления БД. Система управления БД должна быть организована как некая система, осуществляющая согласно

запросным командам запись, обработку, хранение и передачу ТМИ.

Выдача ТМИ по запросу, в свою очередь, также может привносить избыточность, но другого типа. В общем виде очередность передачи ТМИ от источников в информационном блоке может быть любой и зависит от типа запроса. Существует множество способов избежать появления упомянутой избыточности. Как вариант, длину идентификатора можно значительно сократить, если характеристики принимаемого сообщения и количество опрашиваемых источников известны заранее. Но при любых обстоятельствах такая избыточность оказывает меньшее

влияние на информативность и достоверность телеметрии, чем избыточность, возникающая при форматном механизме непрерывной выдачи ТМИ [1].

Адаптивный разностный алгоритм

Это накопительный алгоритм с пакетным способом передачи ТМИ. Размер пакета данных должен быть фиксированным. Адаптивность состоит в том, что количество измерений в пакете зависит от разницы между соседними измерениями. Чем меньше эта разница, тем больше измерений может вместить пакет. Подробно алгоритм рассмотрен в [5].

Коэффициент сжатия и время задержки выдачи первого пакета обратно пропорциональны частоте сигнала, а уменьшение размера пакета ведет к уменьшению как коэффициента сжатия, так и времени задержки информации.

У рассматриваемого алгоритма есть два недостатка, ограничивающих возможность его использования:

- 1) низкая помехоустойчивость алгоритма. Если в результате помехи произойдет искажение нескольких бит в пакете, то начиная с места повреждения и далее корректность всех данных в пакете будет сомнительна (недостоверна). При этом возможность контроля достоверности и восстановления информации отсутствует;
- 2) поскольку алгоритм является накопительным, существует задержка передачи информации.

Первый недостаток можно устранить путем использования дополнительного помехоустойчивого кодирования информации внутри пакета с помощью образов-остатков, которое будет более подробно рассмотрено далее, однако задержка получения данных при этом сохранится [5].

Алгоритм преобразования данных на основе представления их образами-остатками

Существует несколько вариантов такого кодирования. Например, каждый байт определяется как два остатка от деления на 15 и 16. Размер каждого из остатков не превышает 4 бит, при этом возможно однозначное восстановление данных из двух остатков по алгоритму на основе конструктивной теоремы об остатках, представленному в [6]. Также есть возможность применения алгоритма помехоустойчивого кодирования с декодированием двух типов на принимающей стороне, так называемое «мягкое» и «жесткое» декодирование [5]. Суть алгоритма заключается в следующем.

Исходный байт кодируется по формуле

$$C_i \equiv (X_i m_2) \pmod{m_3}, \quad (1)$$

где X_i – исходный байт, $m_2 = 17$, $m_3 = 256$.

Преобразованием данных на основе представления их образами-остатками можно добиться как сокращения избыточности, так и повышения помехоустойчивости. Подробно способ описан в [6, 7]. Суть способа состоит в двукратном сокращении динамического диапазона передаваемых данных. Передается не исходное 2^n -разрядное слово-измерение, а его остаток от деления на 2^n , занимаемый объем которого меньше в два раза.

Поскольку необходимости в накоплении данных для дальнейшей обработки нет, недостаток в виде задержки поступающей информации у рассмотренного алгоритма отсутствует. Однако применим он не во всех случаях. Применение этого алгоритма для уменьшения избыточности возможно при условии предварительного наличия информации о том, что у контролируемого параметра не может возникнуть скачков между соседними измерениями, больших, чем 2^n при шкале 2^{2n} . Кроме того, неизвестно, откуда брать первое значение измерения в случае продолжительного отсутствия связи между бортовой радиотехнической системой (БРТС) и НКУ.

Применять адаптивный разностный алгоритм и алгоритм преобразования данных на основе представления их образами-остатками для устранения избыточности следует с учетом требований технического задания на БРТС. При осуществлении управления или возникновении нештатных ситуаций внесение дополнительных задержек в процесс поступления информации недопустимо. При аварийных ситуациях могут возникнуть резкие скачки между ближайшими измерениями контролируемых параметров, которые при использовании рассматриваемого алгоритма могут быть восстановлены с ошибкой.

Применение кодов Голомба–Райса

Коды Райса – частный случай кодов Голомба. Коды Голомба эффективно применяются для распределений частот символов открытого текста, подчиняющихся геометрическому распределению $P(r_\theta = i) = (1 - \theta)\theta^i, \theta(0, 1)$. Двустороннее геометрическое распределение является статистической моделью сигнала ошибки линейного предсказания. Подробно коды Голомба–Райса описаны в [8].

Некоторые модификации кодов Голомба применяются в алгоритмах сжатия ввиду простоты реализации.

Величина N , подлежащая кодированию, раскладывается на два слагаемых: $N = N_i + N_f$, где $N_i = \left\lceil \frac{N}{2^k} \right\rceil$ и $N_f = N \bmod 2^k$.

Кодовое слово составляется из представленного унарным кодом $N_i + 1$ и N_f , представленного k битами двоичного кода. Унарное кодирование Райса оптимально для значений кодируемой величины N ,

близких к 2^k , и рекомендуется для источников, имеющих геометрическое распределение вероятности символов [8].

Метод обратимого сжатия

Свойства кодируемой информации во многом влияют на эффективность метода обратимого сжатия. Хорошо сжимающие текст алгоритмы могут не удовлетворять требуемым параметрам сжатия информации от датчиков. Малоэффективные при обработке входных стационарных данных алгоритмы могут значительно повысить качество сжатия при условии быстрого изменения статистических характеристик входных данных. Процедура обратимого сжатия состоит из:

- сегментирования;
- декорреляции;
- энтропийного кодирования.

Методы декорреляции основываются на способе предсказания значений входного сигнала X . Эффективность алгоритмов декорреляции определяется по:

- отношению дисперсии исходных данных к дисперсии сигнала ошибки предсказания;
- энтропии сигнала ошибки предсказания.

Квантование по уровню считываемого сигнала производится с использованием ранее считанных значений x_{i-1}, x_{i-2}, \dots с вычислением ошибки предсказания следующего значения x_i по формуле

$$e_i = x_i - Q \left\{ \sum_{j=1}^p \hat{a}_j x_{i-j} \right\}, \quad (2)$$

где \hat{a}_j – коэффициент фильтра предсказателя.

Фильтр работает по принципу линейной экстраполяции по времени (предсказания) в предположении линейной рекурсии с передаточной функцией $\hat{A}(z)$. Экстраполяция последовательности x_i с известными ошибками e_i производится при условии

минимальности среднего квадратичного отклонения.

Разность предсказанного и реального значений на входе декоррелятора поступает на вход энтропийного кодера (рис. 3).

В случае периодического потока данных, при порядке фильтра, равном длине периода, коэффициент сжатия существенно возрастает.

Повышение эффективности обратимого сжатия данных становится возможным благодаря использованию априорных сведений о структуре потока ТМИ. В случае фиксированной структуры кадров декорреляции есть возможность использовать линейный фильтр с порядком, равным длине периода при циклическом опросе каналов поступления данных. В случае сложных телеметрических кадров, сформированных, например, на основе двухступенчатой схемы коммутации, разделение каналов значительно повышает коэффициент сжатия. Для реализации последнего требуется дополнительная (параллельная) схема декоммутации каналов поступления данных ТМИ. При этом статистические характеристики информационного потока частично компенсируются во времени [2].

Выводы

Оптимальным вариантом сокращения избыточности является сочетание нескольких методов.

Пакетная телеметрия обладает высокой степенью автоматизации благодаря применению помехоустойчивого кодирования, выявлению и устранению ошибок, появившихся в ходе трансляции сигнала, и обеспечивает оптимальные характеристики передачи данных от источников. Пакетная телеметрия предоставляет механизм для реализации общих структур данных и протоколы, которые могут способствовать развитию и эксплуатации КИС КА [9].

При канальном кодировании исходных данных сообщения отличаются друг от друга без каких-либо сложностей. Благодаря этому восстановление передаваемой с КА в НКУ телеметрии происходит с низкой вероятностью ошибок, повышая, таким

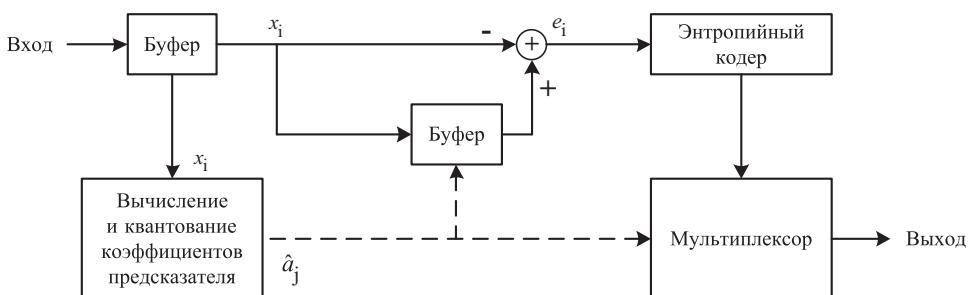


Рисунок 3. Структура системы сжатия на основе линейного предсказания
Figure 3. Linear prediction compression system structure

образом, производительность канала передачи ТМИ. А также за счет канального кодирования обеспечивается защита канала от вероятного несанкционированного доступа [10].

Простой переход на пакетный механизм передачи ТМИ в соответствии с рекомендациями CCSDS не решает проблему избыточности [11]. Для реализации принципа сокращения избыточности ТМИ предлагается дополнить пакетную телеметрию

запросным механизмом ее формирования и передачи, что позволит снизить затраты и скорость приема-передачи ТМИ. Также рекомендуется использовать многоуровневую систему сжатия ТМИ. На каждом уровне сжатия информации для бортового комплекса управления эффективно комбинировать те целевые алгоритмы сжатия данных, которые дают наибольший коэффициент сжатия в зависимости от типа информации [12].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Механизм управляемой телеметрии космического аппарата / Ф.А. Лукин, А.В. Шахматов, К.В. Мушовец, П.В. Зеленков // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2012. № 5. С. 140–144.
2. Исследование методов обратимого сжатия телеметрической информации / М.А. Эльшафеи, И.М. Сидякин, С.В. Харитонов, Д.С. Вороничев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2014. № 3. С. 92–104.
3. Salomon D. Data compression methods. 4th ed. New York, Springer Publ., 2007, 1092 p.
4. Dasgupta S., Papadimitriou C.H., Vazirani U.V. Algorithms. New York, McGraw Publ., 2008, 320 p.
5. Орешко В.В. Алгоритмы устранения избыточности информации, передаваемой от бортовых телеметрических систем на Землю // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2017. Т. 4, № 2. С. 85–94.
6. Кукушкин С.С. Теория конечных полей и информатика: в 2 т. Т. 1. Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках. М.: МО РФ, 2003. 284 с.
7. Патент РФ 2571584. Способ передачи телеметрической информации, адаптированный к различным ситуациям, появляющимся при проведении испытаний ракетно-космической техники, и система для его осуществления / Кукушкин С.С., Кузнецов В.И.; опубл. 2014.
8. Павлов Ю.Н., Сидякин И.М. Применение кодов Голомба–Райса для сокращения избыточности данных телеметрии // Наука в образовании. 2006. № 10 [Электронный ресурс]. URL: <http://engineering-science.ru/doc/60606.html> (дата обращения: 28.02.2019).
9. Скляр Б. Цифровая связь. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
10. Мишуро А.В., Панько С.П. Использование международных стандартов при проектировании новых командно-измерительных систем космических аппаратов // Исследования Нaukograda. 2017. Т. 1, № 1. С. 11–15.
11. Чье Ен Ун, Левенец А.В., Нильга В.В. Представление телемеханических данных однородными n-мерными структурами как предварительная обработка в задачах сжатия // Информационно-управляющие системы. 2011. № 6. С. 7–10.
12. Тулекбаев Е.Т. Эффективные методы сжатия телеметрической информации для наземных комплексов управления // Вестник науки и образования. 2017. № 10. С. 14–20.

REFERENCES

1. Lukin F.A., Shakhmatov A.V., Mushovets K.V., Zelenkov P.V. Mechanism of operated telemetry for a spacecraft. *Vestnik Sibirsogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva*, 2012, no. 5, pp. 140–144. (In Russian).
2. Elshafei M.A., Sidiyakin I.M., Kharitonov S.V., Voronichev D.S. Study of methods for lossless compression of the telemetry information stream. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Priborostroenie»*, 2014, no. 3, pp. 92–104. (In Russian).
3. Salomon D. Data compression methods. 4th ed. New York, Springer Publ., 2007, 1092 p.
4. Dasgupta S., Papadimitriou C.H., Vazirani U.V. Algorithms. New York, McGraw Publ., 2008, 320 p.
5. Oreshko V.V. Algorithms of elimination of redundancy of the information transmitted from onboard telemetric systems to the Earth. UDC621.398. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*. 2017, vol. 4, no. 2, pp. 85–94. (In Russian).
6. Kukushkin S.S. *Teoriya konechnykh polei i informatika: v 2-kh t. T. 1. Metody i algoritmy, klassicheskie i netraditsionnye, osnovанные na ispol'zovanii konstruktivnoi teoremy ob ostatkakh* [The theory of finite fields and informatics. In 2 vols. Vol. 1]. M, MO RF Publ., 2003, 284 p. (In Russian).
7. Patent RF 2571584. *Sposob peredachi telemetricheskoi informatsii, adaptirovannyi k razlichnym situatsiyam, pojavlyayushchimся pri provedenii ispytanii raketno-kosmicheskoi tekhniki, i sistema dlya ego osushchestvleniya* [The method of transmitting telemetry information, adapted to various situations that appear during the tests of rocket and space technology, and a system for its implementation]. Kukushkin S.S., Kuznetsov V.I. Published 2014. (In Russian).
8. Pavlov Yu. N., Sidiyakin I.M. The use of Golomb-Rice codes to reduce the redundancy of measurement data. *Nauka v obrazovanii*, 2006, no. 10. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/60606.html> (accessed 28.02.2019). (In Russian).
9. Sklyar B. *Cifrovaja svjaz* [Digital communication]. Moscow, Viljams Publ., 2003, 1104 p. (In Russian).
10. Mishurov A.V., Panko S.P. The Use of international standards in the design of new command and measurement systems of spacecraft. *Issledovaniya Naukograda*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 11–15. (In Russian).
11. Chie Yen Un, Levenets A.V., Nilga V.V. The view of telemetry data of a homogeneous n-dimensional structures such as pre-processing in the problems of compression. *Informacionno-upravljajushchie sistemy*, 2011, no. 6, pp. 7–10. (In Russian).

12. Tulekbaev E.T. Efficient methods for the compression of telemetry information for the ground control complexes. *Vestnik nauki i obrazovaniya*, 2017, no. 10, pp. 14–20. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Байбекова Фатима Наильевна, младший научный сотрудник, Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С. М. Штеменко, 350063, Краснодар, ул. Красина, д. 4, тел.: +7 (909) 464-50-46, e-mail: kvvu@mil.ru.

Подольцев Виктор Владимирович, начальник научно-исследовательской лаборатории, Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С. М. Штеменко, 350063, Краснодар, ул. Красина, д. 4, тел.: +7 (861) 268-35-09, e-mail: kvvu@mil.ru.

Беспалова Наталья Михайловна, научный сотрудник, Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С. М. Штеменко, 350063, Краснодар, ул. Красина, д. 4, тел.: +7 (918) 621-45-48, e-mail: kvvu@mil.ru.

Сологубова Лариса Анатольевна, младший научный сотрудник, Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С. М. Штеменко, 350063, Краснодар, ул. Красина, д. 4, тел.: +7 (905) 402-39-85, e-mail: kvvu@mil.ru.

AUTHORS

Fatima N. Baibekova, junior research assistant, Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S. M. Shtemenko, 4, ulitsa Krasina, Krasnodar, 350063, Russia, tel.: +7 (909) 464-50-46, e-mail: kvvu@mil.ru.

Viktor V. Podoltsev, head of laboratory of scientific, Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S. M. Shtemenko, 4, ulitsa Krasina, Krasnodar, 350063, Russia, tel.: +7 (861) 268-35-09, e-mail: kvvu@mil.ru.

Nataliya M. Bespalova, scientist, Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S. M. Shtemenko, 4, ulitsa Krasina, Krasnodar, 350063, Russia, tel.: +7 (918) 621-45-48, e-mail: kvvu@mil.ru.

Larisa A. Sologubova, junior research assistant, Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S. M. Shtemenko, 4, ulitsa Krasina, Krasnodar, 350063, Russia, tel.: +7 (905) 402-39-85, e-mail: kvvu@mil.ru.

Поступила 30.10.2018; принята к публикации 20.03.2019; опубликована онлайн 27.05.2019.
Submitted 30.10.2018; revised 20.03.2019; published online 27.05.2019.

DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-17-27

УДК 004.414.23

Разработка потактового симулятора подсистемы памяти процессорного ядра «Эльбрус»

Д. В. Знаменский¹, В. Н. Куцевол¹

¹ АО «МЦСТ», Москва, Россия

Возрастающая сложность микропроцессоров, а также замедление прогресса микроэлектронной технологии делают дальнейшее повышение производительности все более затруднительным. В связи с этим актуальность оценки производительности перспективных микропроцессоров с помощью потактового моделирования перед их реализацией в кремнии увеличивается. В статье изложен подход к реализации потактового симулятора подсистемы памяти процессорного ядра для архитектуры «Эльбрус», управляемого существующим функциональным симулятором этой архитектуры. Рассмотрена методика оценки точности потактового симулятора в сравнении с моделированием RTL-описания перспективного микропроцессора. Приведены данные по быстродействию потактового симулятора и основные техники, позволившие добиться приемлемой производительности. Даны полученные с помощью потактового симулятора предварительные оценки влияния на производительность некоторых изменений в перспективном процессорном ядре, включая задержку доступа в кеш и аппаратную поддержку виртуализации. Эти оценки важны для принятия архитектурных решений при проектировании перспективных процессоров архитектуры «Эльбрус».

Ключевые слова: моделирование, микропроцессор, потактовый симулятор, функциональный симулятор, архитектура «Эльбрус», кэш-память, виртуализация

Для цитирования:

Знаменский Д. В., Куцевол В. Н. Разработка потактового симулятора подсистемы памяти процессорного ядра «Эльбрус» // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 2. С. 17–27. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-17-27

© Знаменский Д. В., Куцевол В. Н., 2019



Development of a cycle-accurate simulator of the Elbrus processor core memory subsystem

D.V. Znamenskiy¹, V.N. Kutsevol¹

¹ MCST JSC, Moscow, Russia

Increasing complexity of modern microprocessors, combined with semiconductor technology progress slowdown, make a further increase in performance more difficult. Under these circumstances, the relevance of the performance estimations of prospective microprocessors by dint of cycle-accurate simulation prior to their production in silicon is of growing importance. The approach to implementation of cycle-accurate simulator of core memory subsystem for Elbrus architecture, controlled by the existing functional simulator of this architecture, is presented herein. The method for validation of a cycle-accurate simulator by comparison with modeling of the RTL description of the prospective microprocessor is considered. The data on the speed of the cycle-accurate simulator and the main optimization methods, which were used to achieve acceptable performance, are presented. The preliminary estimates of the impact on the performance of some changes in the prospective processor core, including the cache access latency and hardware support for virtualization, obtained with the help of the cycle-accurate simulator are given. These assessments are important for making architectural decisions when designing the prospective Elbrus architecture processors.

Keywords: simulation, microprocessor, cycle-accurate simulator, functional simulator, Elbrus architecture, cache memory, virtualization

For citation:

Znamenskiy D.V., Kutsevol V.N. Development of cycle-accurate simulator of the Elbrus processor core memory subsystem. Radiopromyshlennost, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 17–27 (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-17-27

Введение

Повышение производительности микропроцессоров в рамках существующей фон Неймановской парадигмы требует все большего увеличения используемой площади кристалла и усложнения микроархитектуры. В то же время прогресс полупроводниковой технологии замедляется в силу объективных физических и экономических причин, и для поддержания тренда повышения производительности требуются все более тонкие изменения микроархитектуры. Эта задача становится более трудоемкой, так как возрастающая сложность микропроцессорных ядер, в свою очередь, усложняет теоретическую оценку качества этих изменений и снижает ее точность. Существенно возрастающая при этом актуальность моделирования микроархитектуры перед ее реализацией в кремнии обусловила разработку представленного в данной статье потактового симулятора (ПС) подсистемы памяти архитектуры «Эльбрус», обеспечивающего, с одной стороны, необходимую точность оценок, а с другой – обладающего достаточной производительностью. Изложенный подход к построению ПС, управляемого существующим функциональным симулятором (ФС), позволяет упростить проектирование путем повторного использования части логики ФС. В статье рассмотрены методика получения и результаты оценки точности ПС путем сравнения его динамики с динамикой RTL (Register Transfer

Level)-модели реального процессора. Представлен обзор основных техник, позволивших достичь уровня быстродействия ПС, достаточного для моделирования на длительных тестовых нагрузках. Приведены полученные на ПС оценки производительности микроархитектурных изменений в перспективных процессорах семейства «Эльбрус». Кроме того, изложена методика получения оценок и даны предварительные оценки производительности вводимых в архитектуру средств аппаратной поддержки виртуализации.

Постановка задачи

Для таких распространенных процессорных архитектур, как x86, создан целый ряд функциональных и потактовых симуляторов [1]. Создание ФС для архитектуры «Эльбрус», поддерживающего потактовый режим, описано в [2], где основное внимание уделялось моделированию конвейерных задержек и блокировок по зависимостям между операциями. Авторы настоящей статьи сосредоточились на моделировании подсистемы памяти процессорного ядра, руководствуясь следующими соображениями.

«Эльбрус» – архитектура широкого командного слова (VLIW) со статическим планированием вычислений. При этом в существующих машинах выдача команд на исполнение осуществляется в программном порядке (in-order). Как правило, компилятор планирует вычисления достаточно точно: в случае

арифметико-логических операций задержки исполнения известны и для большинства из них (хотя и не для всех) фиксированы, что позволяет компилятору, насколько возможно, скрывать задержки от источника до потребителя результата. Аналогичное утверждение верно и для операций передачи управления с явной командой подготовки. Из этих предпосылок следует вывод, что основным источником задержек исполнения для процессорного ядра архитектуры «Эльбрус», имеющим недетерминированное поведение, является подсистема памяти. Таким образом, было решено создать именно ПС подсистемы памяти для оценки поведения системы в целом. Аналогичные работы по моделированию «нижней» части процессора (кэш последнего уровня, сеть межсоединений) в многоядерной конфигурации проводились и описаны в [3, 4].

Перед авторами настоящей статьи стояла задача разработать ПС подсистемы памяти ядра архитектуры «Эльбрус» со следующими свойствами:

- точное микроархитектурное моделирование потерь при обращении к памяти (блокировки по данным, подкачке кода, ресурсные блокировки);
- возможность инкрементально наращивать точность моделирования (модульный принцип);
- возможность оценки точности моделирования в сравнении с RTL-описанием реального процессора;
- производительность, достаточная для моделирования исполнения типовых задач (загрузка ядра Linux, бинарный компилятор, пакет задач SPEC, Coremark и др.).

В качестве основы этого инструмента был выбран ФС, непосредственно исполняющий двоичные

коды архитектуры «Эльбрус». Информация об исполненных им широких командах (ШК) целевой архитектуры передается в ПС для точного моделирования задержек в соответствии с микроархитектурой процессорного ядра. Такая схема, с одной стороны, позволила упростить ПС, который освобождается от функции определения траектории исполнения программы с точки зрения точного архитектурного состояния (содержимое регистров процессора, памяти и т.д.), а с другой – дала возможность напрямую использовать информацию о динамике исполнения программы и архитектурном состоянии машины, сформированную ФС.

Взаимодействие функционального и потактового симуляторов

Архитектура связки ФС и ПС представлена на рис. 1.

Функциональный симулятор в цикле осуществляет выборку, декодирование и выполнение широких команд. Информация об их исполнении, формируемая ФС и передаваемая на вход ПС, содержит две группы полей:

- 1) содержимое ШК в расшифрованном и дополненном виде: указатель адреса команды, операции обращения в память, номера регистров-операндов и регистров назначения, операции передачи управления и пр.;
- 2) данные об архитектурной динамике: содержимое таблиц страниц (ТС), информация о прерываниях и пр.

Вторая группа полей критически важна для выбранной схемы симуляции. Функциональный симулятор при операциях обращения в память производит трансляцию физического адреса как для

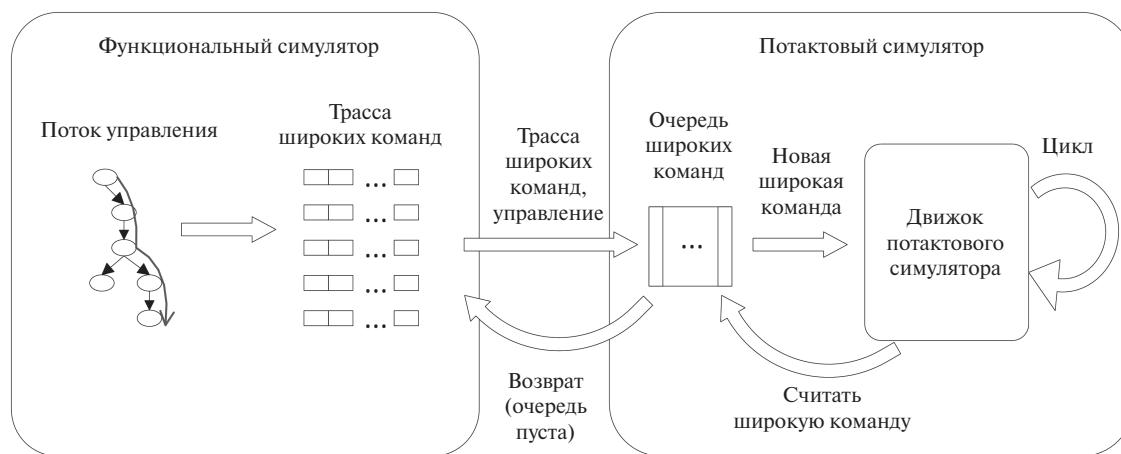


Рисунок 1. Взаимодействие функционального и потактового симуляторов
Figure 1. The interaction between functional and cycle-accurate simulators

адресов инструкций, так и для адресов данных. При первой трансляции ФС проходит все уровни ТС и сохраняет в TLB (Translation Lookaside Buffer) данные о дескрипторах страниц в цепочке трансляций (PTE chain) вместе с дескриптором конечной страницы. При следующих запросах в оттранслированные страницы ФС передает сохраненную цепочку трансляций ФС. Использование этой информации позволяет снять с ПС задачу непосредственно трансляции виртуальных адресов и оставить лишь функцию моделирования задержек трансляции (обращение к TLB и кэшам). Это же касается и прерываний: ПС не формирует прерывания в динамике, а использует информацию о прерываниях от ФС для моделирования задержек.

Существенная особенность данной схемы – то, что с точки зрения памяти ПС не работает с данными – содержимым физической памяти и регистров процессора (за исключением некоторых настроек), но моделирует динамику обработки в зависимости от адреса обращения в память.

Архитектура потактового симулятора

Архитектура ПС представлена на рис. 2.

Движок ПС можно представить в виде синхронного с трассой ШК цикла конвейера, каждая итерация которого соответствует одному машинному такту. На каждой итерации выполняется код модулей подсистемы памяти ядра (кэши, буферы и пр.). Кроме того, вычисляются некоторые глобальные (уровня конвейера) блокировки, например по неготовности операнда ШК. Сами модули могут быть либо напрямую привязанными к конвейеру (модули первого типа), либо асинхронными относительно

конвейера (модули второго типа) (в этом случае их работа привязана к модулям первого типа, а к конвейеру – только косвенным образом).

Работа модулей обоих типов состоит в обработке событий, которые могут относиться к одному из трех классов:

- 1) конвейерные (синхронные) – события, поступающие напрямую из цикла конвейера: операции ШК (чтения и записи) и считывания кода. Глобальные блокировки приостанавливают синхронный поток команд и обработку соответствующих конвейерных событий;
- 2) спланированные (отложенные) – вторичные события, формируемые модулями ПС, которые обрабатываются при наступлении определенного такта (с известными задержками), например выдача результата просмотра кэша;
- 3) неотложные (приоритетные) – вторичные события, требующие обработки начиная с момента их создания. Обработка события происходит сразу же после того, как исчезает блокирующее ее условие, например занятость требуемого канала обращения к памяти.

Модули, входящие в состав ПС, соответствуют структуре моделируемого процессорного ядра: кэш команд (IB) и буфер страничной трансляции кода (ITLB), кэш данных первого уровня (L1\$), кэши страничной трансляции (TLB, кэши устройства поиска по ТС), кэши второго и третьего уровней (L2\$ и L3\$) и «заглушка» оперативной памяти. Основным управляющим блоком является конвейер. Модули IB, ITLB, L1\$ и TLB можно логически объединить

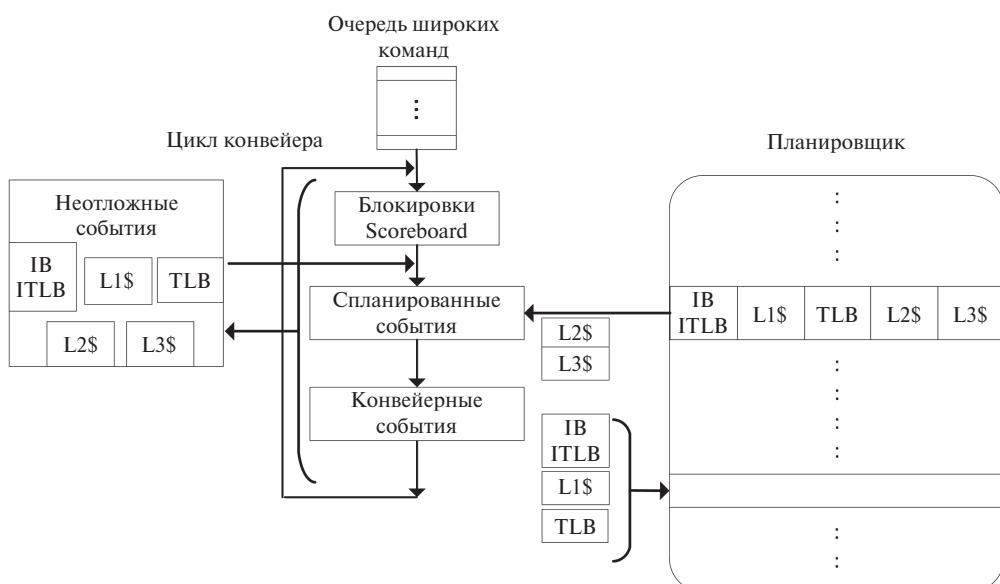


Рисунок 2. Архитектура потактового симулятора
Figure 2. Architecture of the cycle-accurate simulator

в первую группу, так как их работа привязана к основному потоку команд (за исключением механики подкачки массивов) и они управляются непосредственно через основной цикл конвейера. Это соответствует существующей *in-order* реализации архитектуры «Эльбрус» со статическим планированием кода.

События первого класса обрабатываются только описанной выше группой модулей. Модули L2\$ и L3\$ (вторая группа) отвязаны от конвейера и управляются запросами от привязанных к конвейеру блоков (событиями второго и третьего классов), т.е. работают асинхронно относительно основного программного потока. Каждый из модулей с разной степенью точности воспроизводит алгоритмы и внутреннюю структуру соответствующего аппаратного узла, например для кэшей это адресация, ассоциативность, внутренние буферы, блокировки и пр. Блок Scoreboard отслеживает зависимости по данным между ШК, что позволяет воспроизвести в симуляторе блокировки по данным.

Модульный подход позволяет постепенно увеличивать точность ПС, добавляя модели структур реальной системы и углубляя существующие модели. При этом по мере наращивания глубины моделирования неизбежно снижается скорость ПС. Для получения оптимального решения были приняты следующие принципы:

- приоритет по точности имеют механизмы, критичные с точки зрения производительности системы;
- применяется упрощенное моделирование либо отказ от моделирования слабо влияющих на производительность механизмов;
- точность моделирования снижается от нижних уровней иерархии к верхним (IB/ITLB, TLB, L1\$ → L2\$ → L3\$).

Двухуровневая трансляция

Одним из применений ПС является оценка производительности двухуровневой трансляции адреса, добавленной в рамках аппаратной поддержки виртуализации в новой версии архитектуры «Эльбрус» [5]. Такой механизм позволяет на аппаратном уровне транслировать физические адреса гостя (виртуальной машины) в физические адреса системы. При этом гостевая операционная система контролирует трансляцию гостевых виртуальных адресов в гостевые физические адреса с помощью имеющейся ТС, а гипервизор – трансляцию гостевых физических адресов в системные физические адреса с помощью специальной ТС [6, 7].

Оценка скорости данного механизма осложнялась тем, что на момент создания ПС программное обеспечение для виртуализации (прежде всего,

нативный гипервизор) не было готово, а поддержка виртуализации в ФС не была до конца реализована. В связи с этим было предложено моделирование гостевого режима с добавлением слоя адресной трансляции через программно сгенерированную ТС гипервизора (рис. 3).

Особенности предложенной техники заключаются в следующем:

- режим работы ФС считается гостевым – соответственно, и физические, и виртуальные адреса в трассе ШК становятся гостевыми;
- в ПС вводится аппаратная поддержка второго уровня трансляции – ТС гипервизора, модули соответствующих кэшей и алгоритмы поиска. Добавленная логика используется для трансляции гостевых виртуальных и физических адресов в системные физические адреса;
- адреса из трассы ШК, трактуемые как гостевые, пропускаются через второй уровень трансляции согласно сгенерированной ТС гипервизора, описывающей карту физической памяти реальной машины, на которой работает гостевой ФС. Таблица страниц формируется в двух вариантах с точки зрения используемого размера страниц системной памяти – 4 Кбайт либо 2 Мбайт. Через ТС гипервизора гостю выделяется физическая

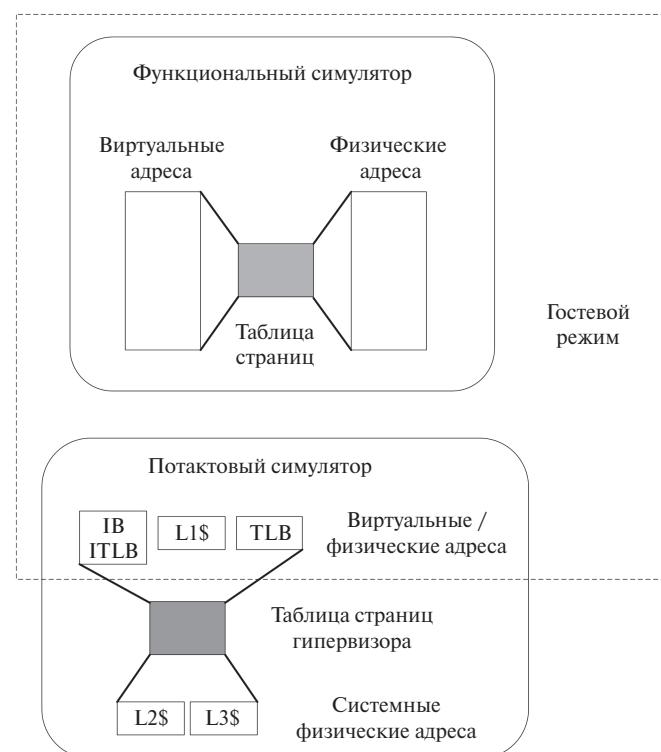


Рисунок 3. Двухуровневая адресная трансляция в потактовом симуляторе

Figure 3. Two-level address translation in the cycle-accurate simulator

- память (области загрузчика, ввода-вывода и 1 Гбайт оперативной памяти), выделенные страницы плотно упаковываются в сформированной системной физической памяти;
- единственная структура, требующая непосредственного размещения данных в созданной сгенерированной таблице физической памяти, – это сама сгенерированная ТС. Потактовый симулятор использует модель системной физической памяти ТС, которая хранит данные только для адресов сгенерированной ТС гипервизора. При промахе в трансляционных кэшах ядра происходит обращение по данным к системной памяти ТС для получения содержимого соответствующей РТЕ.

Точность и валидация

Ввиду наличия доступа к RTL целевого процессорного ядра валидация ПС проводилась путем сравнения его динамики с динамикой RTL на некотором наборе тестов. В качестве базы для валидации использовался законченный RTL процессора предыдущего поколения; для оценок перспективного ядра соответствующие доработки в ПС включались инкрементально. Для сравнения были использованы два класса метрик:

- 1) поведенческие (событийные) метрики – количество внутренних событий определенного типа для каждого блока микроархитектуры и соответствующего ему модуля ПС, например обращения в L1\$, попадания в L2\$, количество запросов поиска по ТС, количество аппаратных операций установки accessed/dirty битов в ТС и др.;
- 2) временные метрики, основная часть которых – количество тактов работы машины на заданном teste. При разборе отклонений по точности использовались и другие временные метрики, например количество тактов блокировки конвейера.

В исходный RTL процессорного ядра была добавлена логика подсчета большого количества типов внутренних событий. Заметим, что конфигурация RTL процессора была, насколько возможно, приведена в соответствие конфигурации ПС. Например, включалось только одно ядро, задержки доступа к оперативной памяти DDR4 сглаживались – аппаратный механизм периодического обновления динамических запоминающих ячеек (REFRESH) был выключен и т.д.

Сбор данных по метрикам проводился при выполнении набора из ~100 специальных тестов различной длительности (от нескольких тысяч до миллионов тактов) на RTL-симуляторе и на ПС, ориентированных в основном на проверку

корректности работы механизмов адресной трансляции. Поведенческие метрики использовались для первичной отладки ПС, а временные – для его окончательной валидации. На основании анализа обнаруженных отклонений по метрикам дорабатывались ПС и ФС, и цикл валидации повторялся заново. За ошибку ПС было принято относительное отклонение количества тактов работы ПС от реального RTL на конкретной задаче из набора тестов (в процентах). Достигнутое среднее геометрическое отклонение по всему набору тестов составило около 2%, что можно считать достаточно хорошим результатом [8–11].

В то же время в существующем ПС не все архитектурные механизмы воспроизведены точно, например асинхронные обращения в память (для чистки стека пользователя или подкачки массивов) реализованы упрощенно, что приводит к увеличению ошибки на некоторых классах задач до 30%. В следующих версиях ПС предполагается более точная реализация этих механизмов.

Производительность потактового и функционального симуляторов

Скорость работы функционального и потактового симуляторов оценивалась на машине Intel Core i7-3770 @ 3.40 GHz с памятью 16 Гбайт DDR3 под управлением ОС Linux. Быстродействие ФС без ПС можно оценить по его логической скорости (тиков/с): от 500 КГц до 5 МГц при средней скорости порядка 2 МГц в зависимости от исполняемого кода. Быстродействие связки ФС и ПС можно измерять как в тиках ФС, так и в тактах ПС в единицу времени. Средняя логическая скорость связки, измеряемая в тиках в секунду, при тех же условиях составила порядка 500 КГц, а в тактах в секунду – в два раза выше и более, при этом в зависимости от исполняемого кода она может достаточно сильно варьироваться.

Проблема снижения скорости ПС относительно ФС известна [12], и чем точнее потактовая модель, тем заметнее это снижение. Один из путей решения этой проблемы – симуляция с выборкой (sampling simulation) [13–15]. Авторы настоящей статьи выбрали простейший вариант этой методики – непрерывную работу ФС с периодическим запуском ПС (рис. 4).

Временной интервал работы ПС делится на две части: интервал «прогрева» микроархитектурного состояния, в течение которого учет показателей производительности не ведется, и непосредственно измеряемый интервал (квант). В настройках ФС при запуске можно задавать в тиках следующие параметры: периодичность выборки ПС, длительность интервалов «прогрева» и измеряемого кванта ПС. В дальнейшем предполагается усовершенствовать

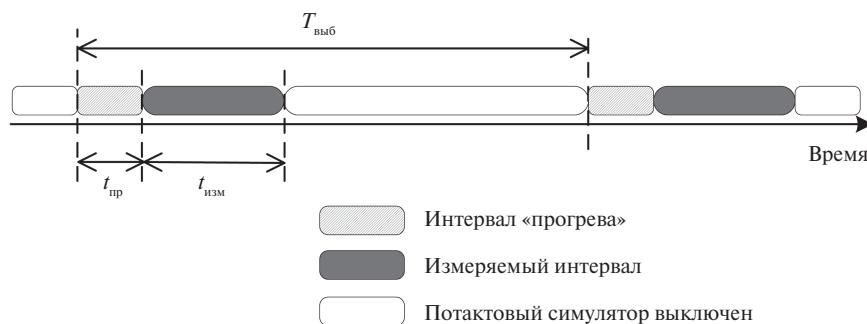


Рисунок 4. Режим симуляции с выборкой: $T_{выб}$ – период выборки; $t_{пр}$ – длительность интервала «прогрева»; $t_{изм}$ – длительность измеряемого интервала

Figure 4. Sampling simulation mode: $T_{выб}$ – sampling period; $t_{пр}$ – warmup period duration; $t_{изм}$ – measured period duration

выборку квантов ПС, например использовать адаптивную методику «прогрева» для задач пакета SPEC [16].

Помимо режима работы ПС с выборкой, в целях ускорения моделирования, для ПС была адаптирована существующая в ФС функциональность сохранения/восстановления состояния симулятора. Эта техника позволяет для запуска конкретной задачи не дожидаться загрузки ОС на связке ФС и ПС, а восстановить ФС и ПС в состоянии уже загруженной ОС, предварительно сохранив его в контрольной точке.

Наряду с описанными мерами применялись различные алгоритмические оптимизации ФС и ПС. Например, для работы в системе с ПС был адаптирован программный кэш широких команд (ICache) ФС – ассоциативный контейнер, предназначенный для хранения интерпретированных команд и доступа к ним по виртуальному адресу команды [12]. Этот механизм существенно сокращает время, необходимое на выборку и декодирование команд: его внедрение в систему увеличило производительность более чем в два раза. Кроме того, в коде ПС вызовы динамического выделения и освобождения памяти были по возможности сведены к минимуму алгоритмическим путем и за счет использования соответствующих структур данных.

Применение потактового симулятора

На разработанном ПС были получены предварительные оценки следующих доработок (архитектурных изменений) процессорного ядра «Эльбрус»:

- увеличения задержки доступа в L1\$ и длительности конвейерной блокировки («вертушки»);
- добавления двухуровневой трансляции.

Для достижения тактовой частоты 2 ГГц в новой, шестой версии ядра «Эльбрус» потребовалось

увеличить задержку доступа в L1\$. Это изменение связано с механизмом конвейерной блокировки («вертушки»): при неготовности результата чтения из памяти конвейер блокируется на фиксированное число тактов, по истечении которого конвейерная «вертушка» «поворачивается», и готовность операнда проверяется повторно. Таким образом, оптимальная длительность блокировки коррелирует с задержкой обращения в кэш. Кроме того, длительность «вертушки» может быть увеличена в целях дальнейшего повышения тактовой частоты.

Для ядра шестой версии был выбран вариант увеличения задержки L1\$ на один такт без сдвига «вертушки». Этот вариант, а также исходная конфигурация ядра предыдущей, пятой версии и несколько других конфигураций для новой версии ядра были оценены с помощью ПС на загрузке нативного ядра Linux длительностью 500 млн широких команд.

В табл. 1. приведены результаты, полученные на одной из ранних версий ПС для шести различных конфигураций. Модуль L3\$ был выключен, задержка доступа к памяти составляла 120 тактов.

В табл. 2. приведены аналогичные результаты на актуальной версии ПС с включенным модулем L3\$ и задержкой доступа в память 120 тактов. Несмотря на добавление модуля L3\$, длительность моделирования в тактах симулятора имеет возросшую величину в силу уточнения самого ПС.

Из данных табл. 1 и 2 следует, что по параметру замедления конфигурации внутри пар C, D и E, F различаются мало, в то же время разница между самими парами составляет 5–6%. Таким образом, сдвиг «вертушки» сам по себе сильнее влияет на производительность, чем увеличение времени доступа в L1\$. Выбранная для ядра шестой версии конфигурация В (увеличенная задержка доступа в L1\$ на один такт) на старой версии ПС

Таблица 1. Загрузка ядра Linux. Задержки L1\$ и глубина «вертушки» (начальная версия потактового симулятора, L3\$ выключен)

Table 1. Linux kernel boot. L1\$ latency and the depth of the pipeline replay loop (the initial version of the cycle-accurate simulator, L3\$ is off)

Конфигурация / Configuration	Описание конфигурации / Configuration description	Такты, млн / Cycles, mln	Замедление, % / Slowdown, %	Такты блокировки, млн / Stall cycles, mln	Рост тактов блокировки, % / Stall cycles increase, %	Попадания в кэш, % / Cache hits, %	
						L1\$	L2\$
A (ядро версии 5)	L1\$_lat=3, pipe_replay=4	1070	–	477	–	83,8	76,4
B (ядро версии 6)	L1\$_lat=4, pipe_replay=4	1145	7,0	533	11,7	83,7	76,4
C	L1\$_lat=4, pipe_replay=5	1206	12,7	603	26,4	82,7	77,1
D	L1\$_lat=5, pipe_replay=5	1220	14,0	614	28,7	82,7	77,1
E	L1\$_lat=5, pipe_replay=6	1279	19,5	679	42,4	83,7	76,4
F	L1\$_lat=6, pipe_replay=6	1280	19,6	680	42,6	83,7	76,4

Таблица 2. Загрузка ядра Linux. Задержки L1\$ и глубина «вертушки» (последняя версия потактового симулятора, L3\$ включен)

Table 2. Linux kernel boot. L1\$ latency and the depth of the pipeline replay loop (the last version of the cycle-accurate simulator, L3\$ is on)

Конфигурация / Configuration	Описание конфигурации / Configuration description	Такты, млн / Cycles, mln	Замедление, % / Slowdown, %	Такты блокировки, млн / Stall cycles, mln	Рост тактов блокировки, % / Stall cycles increase, %	Попадания в кэш, % / Cache hits, %		
						L1\$	L2\$	L3\$
A (ядро версии 5)	L1\$_lat=3, pipe_replay=4	1192	–	427	–	83,9	76,6	64,9
B (ядро версии 6)	L1\$_lat=4, pipe_replay=4	1205	1,1	437	2,3	83,9	76,6	64,9
C	L1\$_lat=4, pipe_replay=5	1265	6,1	504	18,0	83,9	76,6	64,9
D	L1\$_lat=5, pipe_replay=5	1266	6,2	506	18,5	83,9	76,6	64,9
E	L1\$_lat=5, pipe_replay=6	1326	11,3	571	33,7	83,9	76,6	64,9
F	L1\$_lat=6, pipe_replay=6	1328	11,4	572	34,0	83,9	76,6	64,9

с выключенным L3\$ отличается от базовой конфигурации A на 7%, а при включенном L3\$ – всего на 1%.

Моделирование двухуровневой трансляции проводилось по описанной методологии на основе сгенерированной ТС гипервизора с использованием одной из ранних версий ПС без модуля L3\$ с задержкой доступа в память величиной 120 тактов. В качестве нагрузки также была выбрана загрузка нативного ядра Linux. Проводилась оценка трех конфигураций: нативная загрузка Linux, а также загрузка Linux в гостевом режиме через сгенерированную ТС со страницами размерами 4 Кбайт и 2 Мбайт. Результаты представлены в табл. 3.

Из приведенных в табл. 3 данных следует, что быстродействие виртуализованной системы на загрузке Linux заметно выше при выделении системной памяти большими страницами (2 Мбайт), чем страницами меньшего размера (4 Кбайт): в первом

случае деградация всего 13%, а во втором – 140%. Такое значительное различие объясняется большой долей гостевых обращений по физической памяти на данной задаче (загрузке Linux). В моделируемой схеме аппаратуры при выключенном у гостя трансляции виртуальных адресов основной TLB используется для кэширования трансляций гостевых физических адресов в системные, при этом для страниц размером 2 Мбайт это кэширование существенно эффективнее, чем для страниц размером 4 Кбайт. Кроме того, для страниц размером 2 Мбайт требуется меньше запросов поиска. Ожидается, что включение L3\$ ускорит двухуровневую трансляцию в целом и уменьшит разницу между двумя вариантами ТС.

Выводы

Разработан ПС подсистемы памяти ядра «Эльбрус», управляемый существующим ФС этой

Таблица 3. Загрузка ядра Linux. Нативный режим и двухуровневая трансляция (L3\$ выключен)
Table 3. Linux kernel boot. Native mode and two-level translation (L3\$ is off)

Метрика / Metrics	Конфигурация / Configuration		
	нативная / native	гостевой режим, страницы 4 Кбайт / guest mode, 4 KB pages	гостевой режим, страницы 2 Мбайт / guest mode, 2 MB pages
Такты, млн / Cycles, mln	1059	2547	1192
Замедление, % / Slowdown, %	–	140	13
Попадания в IB, % / IB hits, %	99,5	99,5	99,5
Попадания в L1\$, % / L1\$ hits, %	84,4	83,4	84,2
Попадания в L2\$, % / L2\$ hits, %	75,1	86,2	76,2
Попадания в ITLB, % / ITLB hits, %	100	99,9	100
Попадания в TLB, % / TLB hits, %	99,9	99,7	100
Запросы трансляции гостевых физических адресов, млн / Guest physical address translation queries, mln	–	69	0,1
Гостевые обращения по физическому адресу, тыс. / Physically addressed guest memory accesses, ths	–	119	
Попадания в буфер гостевых физических адресов, % / Guest physical address buffer hits, %	–	94,8	99,9
Чтения ТС гипервизора из памяти, тыс. / Hypervisor PT load accesses, ths	–	1009	8

архитектуры. Описанный подход позволил упростить систему в целом и ускорить ПС на основании информации о динамике работы программы, выработанной ФС.

Примененный при разработке подход к валидации ПС на основе сравнения с RTL и модульный принцип его построения с постепенным углублением моделирования позволили достичь относительно высоких показателей по точности (ошибка 2%) на выбранных задачах. В то же время на задачах с использованием некоторых асинхронных механизмов работы с памятью точность ПС снижается, поэтому в рамках дальнейших работ запланирована более точная их реализация.

Производительность связки ФС и ПС оказалась достаточной для запуска задач большой длительности. Были успешно внедрены механизмы моделирования с выборкой и восстановления на контрольной точке.

При первом использовании разработанного ПС были оценены два архитектурных изменения процессорного ядра «Эльбрус» шестой версии – увеличение задержки доступа в L1\$ и добавление второго уровня трансляции адреса в рамках поддержки виртуализации.

В дальнейшем авторы планируют перейти к получению оценок производительности архитектуры на ПС с использованием стандартных тестовых пакетов (в частности, пакета SPEC).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Akram A., Sawalha L.A. Comparison of x86 Computer Architecture Simulators. Computer Architecture and Systems Research Laboratory (CASRL), 1, 2016 [Электронный ресурс]. URL: https://scholarworks.wmich.edu/casrl_reports/1/ (дата обращения: 02.04.2019).
2. Порошин П.А., Мешков А.Н., Черных С.В. Разработка симулятора, поддерживающего потактовый режим работы, на основе текущей версии функционального симулятора архитектуры «Эльбрус» // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 2. С. 69–75.
3. Недбайло Ю.А. Разработка сети на кристалле для перспективных многоядерных микропроцессоров // Труды МФТИ. 2017. Т. 9, № 2. С. 151–163.
4. Недбайло Ю.А. Проблемы масштабирования производительности подсистемы памяти многоядерного микропроцессора и методы их решения // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 2. С. 23–31.

5. Знаменский Д.В. Выбор вариантов реализации средств аппаратной поддержки виртуализации архитектуры «Эльбрус» // Вопросы радиоэлектроники. 2014. Т. 4, № 3. С. 64–73.
6. AMD64 Architecture Programmer’s Manual Volume 2: System Programming, pp. 545–552. Advanced Micro Devices, Inc., 2018 [Электронный ресурс]. URL: <https://support.amd.com/techdocs/24593.pdf> (дата обращения: 24.01.2019).
7. Intel® 64 IA-32 Architectures Software Developer’s Manual, vol. 3C, pp. 111–125. Intel Corp., 2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/manuals/64-ia-32-architectures-software-developer-vol-3c-part-3-manual.pdf> (дата обращения: 24.01.2019).
8. Ryckbosch F., Polfliet S., Eeckhout L. Fast, accurate and validated full-system software simulation of x86 hardware. IEEE Micro, 2010, vol. 30, iss. 6, pp. 46–56. DOI: 10.1109/MM.2010.95.
9. Alves M.A.Z., Villavieja C., Diener M., Moreira F.B., Navaux P.O.A. SiNUCA: A Validated Micro-Architecture Simulator. 17th International Conference on High Performance Computing and Communications, IEEE Publ., 2015. DOI: 10.1109/HPCC-CSS-ICESS.2015.166.
10. Ahn H. A., Li S., Jouppi N.P. McSimA+: A manycore simulator with application-level+ simulation and detailed microarchitecture modeling. IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS), Austin, TX, 2013, pp. 74–85. DOI: 10.1109/ISPASS.2013.6557148.
11. Butko A., Garibotti R., Ost L., Sassatelli G. Accuracy evaluation of GEM5 simulator system. 7th International Workshop on Reconfigurable and Communication-Centric Systems-on-Chip (ReCoSoC), York, 2012, pp. 1–7. DOI: 10.1109/ReCoSoC.2012.6322869.
12. Кутсевол В.Н., Мешков А.Н., Черных С.В. Методы оптимизации производительности программного моделирования многоядерных микропроцессоров с архитектурой «Эльбрус» // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 3. С. 57–61.
13. Lafage T., Seznec A. Choosing representative slices of program execution for microarchitecture simulations: A preliminary application to the data stream. Workload Characterization of Emerging Computer Applications, 2001, pp. 145–163.
14. Wunderlich R.E., Wenisch T.F., Falsafi B., Hoe J.C. SMARTS: Accelerating microarchitecture simulation via rigorous statistical sampling. Proceedings of the 30th Annual International Symposium on Computer Architecture, IEEE Publ., 2003, pp. 84–97. DOI: 10.1109/ISCA.2003.1206991.
15. Falcon A., Faraboschi P., Ortega D. Combining Simulation and Virtualization through Dynamic Sampling. Proceedings of IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software, IEEE Publ., 2007, pp. 72–83. DOI: 10.1109/ISPASS.2007.363738.
16. Borgstrom G., Sembrant A., Black-Schaffer D. Adaptive Cache Warming for Faster Simulations. Proceedings of the 9th Workshop on Rapid Simulation and Performance Evaluation: Methods and Tools, 2017, pp. 1–7.

REFERENCES

1. Akram A., Sawalha L. A. Comparison of x86 Computer Architecture Simulators. Computer Architecture and Systems Research Laboratory (CASRL), 1, 2016. Available at: https://scholarworks.wmich.edu/casrl_reports/1/ (accessed 02.04.2019).
2. Poroshin P.A., Meshkov A.N., Chernyh S.V. Development of simulator with support of cycle-accurate simulation mode on base of the existing instruction set simulator of the Elbrus architecture. Voprosy radioelektroniki, 2018, no. 2, pp. 69–75 (In Russian).
3. Nedbalio Yu. A. On-chip network design for prospective chip multiprocessors. Trudy MFTI, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 151–163 (In Russian).
4. Nedbalio Yu. A. Memory subsystem performance scaling problems in chip multiprocessors and their solution. Voprosy radioelektroniki, 2018, no. 2, pp. 23–31 (In Russian).
5. Znamenskiy D. V. Alternatives of hardware virtualization support implementation for Elbrus processor architecture. Voprosy radioelektroniki, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 64–73 (In Russian).
6. AMD64 Architecture Programmer’s Manual Volume 2: System Programming, pp. 545–552. Advanced Micro Devices, Inc., 2018. Available at: <https://support.amd.com/techdocs/24593.pdf> (accessed 24.01.2019).
7. Intel® 64 IA-32 Architectures Software Developer’s Manual, vol. 3C, pp. 111–125. Intel Corp., 2016. Available at: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/manuals/64-ia-32-architectures-software-developer-vol-3c-part-3-manual.pdf> (accessed 24.01.2019).
8. Ryckbosch F., Polfliet S., Eeckhout L. Fast, accurate and validated full-system software simulation of x86 hardware. IEEE Micro, 2010, vol. 30, iss. 6, pp. 46–56. DOI: 10.1109/MM.2010.95.
9. Alves M.A.Z., Villavieja C., Diener M., Moreira F.B., Navaux P.O.A. SiNUCA: A Validated Micro-Architecture Simulator. 17th International Conference on High Performance Computing and Communications, IEEE Publ., 2015. DOI: 10.1109/HPCC-CSS-ICESS.2015.166.
10. Ahn H. A., Li S., Jouppi N.P. McSimA+: A manycore simulator with application-level+ simulation and detailed microarchitecture modeling. IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS), Austin, TX, 2013, pp. 74–85. DOI: 10.1109/ISPASS.2013.6557148.
11. Butko A., Garibotti R., Ost L., Sassatelli G. Accuracy evaluation of GEM5 simulator system. 7th International Workshop on Reconfigurable and Communication-Centric Systems-on-Chip (ReCoSoC), York, 2012, pp. 1–7. DOI: 10.1109/ReCoSoC.2012.6322869.
12. Kutsevol V. N., Meshkov A. N., Chernykh S. V. The approaches to the performance optimization of multi-core «Elbrus» processors program models. Voprosy radioelektroniki, 2017, no. 3, pp. 57–61 (In Russian).
13. Lafage T., Seznec A. Choosing representative slices of program execution for microarchitecture simulations: A preliminary application to the data stream. Workload Characterization of Emerging Computer Applications, 2001, pp. 145–163.

14. Wunderlich R.E., Wenisch T.F., Falsafi B., Hoe J.C. SMARTS: Accelerating microarchitecture simulation via rigorous statistical sampling. *Proceedings of the 30th Annual International Symposium on Computer Architecture*, IEEE Publ., 2003, pp. 84–97. DOI: 10.1109/ISCA.2003.1206991.
15. Falcon A., Faraboschi P., Ortega D. Combining Simulation and Virtualization through Dynamic Sampling. *Proceedings of IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software*, IEEE Publ., 2007, pp. 72–83. DOI: 10.1109/ISPASS.2007.363738.
16. Borgstrom G., Sembrant A., Black-Schaffer D. Adaptive Cache Warming for Faster Simulations, *Proceedings of the 9th Workshop on Rapid Simulation and Performance Evaluation: Methods and Tools*, 2017, pp. 1–7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Знаменский Дмитрий Валерьевич, старший инженер, АО «МЦСТ», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: +7 (499) 135-70-79, e-mail: znamen_d@mcst.ru.

Кутевол Виталий Николаевич, старший инженер-программист, АО «МЦСТ», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: +7 (499) 135-70-79, e-mail: kutsevol_v@mcst.ru.

AUTHORS

Dmitriy V. Znamenskiy, senior engineer, MCST JSC, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russia, tel.: +7 (499) 135-70-79, e-mail: znamen_d@mcst.ru.

Vitaliy N. Kutsevol, senior software engineer, MCST JSC, 24, ulitsa Vavilova, Moscow, 119334, Russia, tel.: +7 (499) 135-70-79, e-mail: kutsevol_v@mcst.ru.

Поступила 30.01.2019; принята к публикации 21.02.2019; опубликована онлайн 27.05.2019.
Submitted 30.01.2019; revised 21.02.2019; published online 27.05.2019.

DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-28-34

УДК 621.391.8, 044.722.22

Особенности проектирования систем Интернета вещей

А. Ю. Ануфриенко^{1, 2}

¹ НИУ «Высшая школа экономики», Москва, Россия

² ООО «Национальный центр информатизации», Москва, Россия

Разработка систем Интернета вещей, особенно в области промышленного Интернета с большим количеством конечных устройств, – сложная научно-техническая задача. Неумение учесть максимальное количество факторов на начальном этапе приводит к отрицательному результату. Данная работа описывает научный подход к созданию таких систем. В статье описаны протоколы Интернета вещей, архитектура системы Интернета вещей и ее компоненты. Освещены проблемы, возникающие при проектировании систем Интернета вещей. Были систематизированы базовые характеристики наиболее распространенных протоколов. Предложен метод решения актуальной научно-прикладной задачи, позволяющий проектировать системы Интернета вещей с учетом различных фундаментальных параметров, включая частотный диапазон, полосу пропускания, скорость передачи данных, излучаемую мощность, дальность, интенсивность работы, а также фундаментальных ограничений. В результате применения описываемого подхода можно выбрать достоверно оптимальный для построения системы протокол Интернета вещей либо определить и оптимизировать параметры проприетарного протокола, что в итоге позволяет построить надежную масштабируемую систему Интернета вещей для решения требуемых прикладных задач.

Ключевые слова: Интернет вещей, целевая функция, платформа Интернета вещей, система аналитики, протокол, cloud computing, fog/edge computing

Для цитирования:

Ануфриенко А. Ю. Особенности проектирования систем Интернета вещей // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 2. С. 28–34. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-28-34

© Ануфриенко А.Ю., 2019



Features of designing IoT systems

A. Yu. Anufrienko¹

¹ National Research University Higher School of Economics / R&D National IT Center, Moscow, Russia

The development of IoT systems, especially in the field of Industrial Internet of things with a large number of end devices is a complex scientific and technical problem. Inability to take into account the number of factors at the early stage leads to a negative result. This document demonstrates the scientific approach to the creation of the above systems. The IoT protocols, the IoT system architecture and its components are described in this article. The problems arising in the design of IoT systems are described. The basic characteristics of the most common protocols are systematized. The method for solution of the actual scientific and applied problem, allowing to design the IoT system, taking into account various fundamental parameters including the frequency range, bandwidth, data transfer rate, radiated power, range, work intensity, as well as the fundamental constraints, is proposed. As a result of the application of the described method, the optimal IoT protocol can be chosen to build a system, or to determine and optimize the parameters of the proprietary protocol. That makes it possible to build a reliable and scalable IoT system for the solution of the relevant experimental problems.

Keywords: IoT, Internet-of-Things, objective function, IoT platform, business intelligence system, protocol, cloud computing, fog/edge computing

For citation:

Anufrienko A. Yu. Features of designing IoT systems. Radiopromyshlennost, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 28–34 (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-28-34

Введение

В основе понятия Интернет вещей лежит совокупность устройств, преимущественно беспроводных, которые обмениваются информацией напрямую или через посредников. Передаваемые данные поступают в облачное хранилище, где хранятся, обрабатываются, а после визуализируются. Конечным потребителем информации является человек. Для построения систем используются различные архитектуры, радио- (проводные) технологии, типы протоколов, которые в совокупности определяют характеристики системы и ее производительность.

В свою очередь, технические характеристики компонентов системы напрямую влияют на качество сервиса, стоимость системы, ее безопасность и управляемость в целом. Недостаточный учет максимального количества факторов в итоге приводит к различным проблемам вплоть до невозможности эксплуатации или масштабирования системы и необходимости ее полной замены.

Основные проблемы систем Интернета вещей

Первая проблема связана с избыточным количеством генерируемых данных. Например, датчики авиадвигателя для гражданских судов P&W в течение 2 ч работы генерируют более 6 Тбайт данных [1]. Существуют очевидные сложности с передачей такого объема данных в облако. Хранить и накапливать их также не представляется целесообразным. Как известно из теории информации, ценность информации, которую нельзя использовать,

равняется нулю. Поэтому одной из проблем является исследование возможностей снижения массивов передаваемых и хранимых данных.

Вторая проблема заключается в отсутствии единогообразия в протоколах, которые используются в устройствах и системах Интернета вещей. Строго говоря, понятие «протокол Интернета вещей» сегодня включает в себя стэк сетевых протоколов и радиотехнологию. Известно более 700 протоколов Интернета вещей [2], среди которых самыми известными являются ZigBee (IEEE802.15.4), Z-Wave, LoRa, Bluetooth (BLE), Wi-Fi (IEEE802.11), а также новый – Narrow band IoT (NB-IoT), относящийся к технологиям мобильной связи и работающий на соответствующей инфраструктуре. Дополнительно сотни проприетарных протоколов разрабатываются и используются в связи необходимостью решать конкретные задачи наилучшим образом, в зависимости от условий применения и экономической целесообразности.

На рисунке представлена классическая архитектура системы Интернета вещей, предназначенная для централизованной обработки генерируемых данных.

Ключевые компоненты системы:

- 1) модуль – устройство, как правило, состоящее из датчика, коммуникационного модуля и актуатора. Датчик служит для получения данных, коммуникационный модуль – для обмена данными с другими устройствами по проводному или

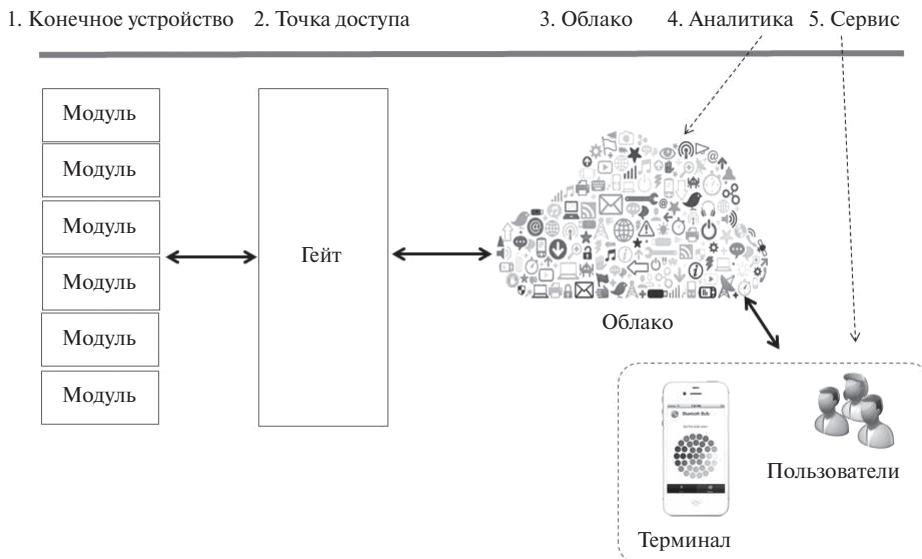


Рисунок. Архитектура и ключевые компоненты системы Интернета вещей
Figure. Architecture and key components of the IoT system

беспроводному каналу. Актуатор – необязательное устройство, служащее для осуществления активных действий, например перекрытия вентиля. Модуль является конечным устройством. С коммерческой точки зрения к нему предъявляются требования по минимизации стоимости, которая, соответственно, влечет за собой повышение требований к техническим характеристикам устройства – антенне, трансиверу, модулю управления и интерфейсам с датчиком;

2) гейт (концентратор) – устройство, работающее по аналогии с базовой станцией в системах сотовой связи (актуально для топологии «звезда»). Гейт осуществляет коммуникацию с конечными устройствами с одной стороны и с платформой – с другой стороны. Причем протоколы связи, как правило, различны;

3) облако (платформа) – агрегатор информации, содержащий устройства приема данных и систему хранения данных (СХД). Требования к платформе, с учетом большого количества устройств, определяют конечные устройства и протоколы;

4) система аналитики (аналитика) – часть платформы, которая по своей сути является отдельным элементом, причем может быть как линейным, так и с функционалом машинного обучения. Система аналитики взаимодействует напрямую с пользователем (управляющий персонал, технический персонал), визуализирует ключевые характеристики и показатели системы на специальном рабочем столе. Ключевыми показателями аналитической системы являются скорость и качество предоставления отчетов при

рассмотрении показателей в различных разрезах и за различные периоды;

- 5) сервис – набор функций и услуг, предоставляемый конечному потребителю на основе технических характеристик компонентов 1–4. Качество сервиса (QoS, SLA) напрямую зависит от технических характеристик системы, включая особенности архитектуры. Очевидно, что если изначально при планировании системы не учитывались эффекты масштаба, то при увеличении количества устройств в системе будут возникать сбои, связанные как с интерференцией, так и с отказами в обслуживании.

Для построения системы Интернета вещей обязательно необходимо опираться как на прикладные требования (задачу) – условия применения, так и на особенности, связанные с протоколами Интернета вещей. Целесообразно описать целевую функцию. Для этого можно построить модель системы Интернета вещей, где будут учтены следующие параметры: частотный диапазон, полоса пропускания, скорость передачи данных, излучаемая мощность (максимальная и минимальная), автономность (устройства подключены к энергосети или используются аккумуляторы), дальность, интенсивность работы, надежность, задержка, помехозащищенность, требования к наличию (отсутствию) шифрования.

Ключевые протоколы Интернета вещей

Рассмотрим существующие протоколы.

1. Wi-Fi – набор стандартов связи для коммуникации в беспроводной локальной сетевой зоне

- частотных диапазонов 0,9; 2,4; 3,6; 5 и 60 ГГц [2]. На сегодняшний день наиболее распространеными версиями являются 802.11g/n/a. Энергопотребление составляет 0,25–1 Вт и более [3].
2. ZigBee – спецификация сетевых протоколов верхнего уровня – уровня приложений APS (англ. application support sublayer) и сетевого уровня – использующих сервисы нижних уровней – уровня управления доступом к среде MAC и физического уровня PHY, регламентированных стандартом IEEE802.15.4. ZigBee и IEEE802.15.4 описывают беспроводные персональные вычислительные сети (WPAN) [4]. В диапазоне 2,4 ГГц размещается 16 каналов с полосой 5МГц.
 3. Z-Wave – технология, разработанная специально для дистанционного управления. В отличие от Wi-Fi и других IEEE802.11 стандартов передачи данных, предназначенных в основном для больших потоков информации, Z-Wave работает в субгигагерцовом диапазоне частот и оптимизирована для передачи простых управляющих команд с малыми задержками (например, включить/выключить, изменить громкость, яркость и т.д.). Выбор субгигагерцового частотного диапазона обусловлен малым количеством потенциальных источников помех (в отличие от загруженного ISM диапазона 2,4 ГГц) [5].
 4. Беспроводная технология Bluetooth с низким энергопотреблением (англ. Bluetooth low energy, Bluetooth LE, представленная также как Bluetooth Smart) – выпущенная в декабре 2009 г. версия спецификации ядра беспроводной технологии Bluetooth, наиболее существенными достоинствами которой являются сверхмалое пиковое энергопотребление, среднее энергопотребление и энергопотребление в режиме простого [6].
 5. LoRaWAN. В январе 2015 г. создана некоммерческая организация LoRa Alliance с целью принятия и продвижения протокола LoRaWAN в качестве единого стандарта для глобальных сетей с низким энергопотреблением (LPWAN – от англ. Low Power Wide Area Network) [7]. Стоит отметить, что LoRa работает в нелицензируемых диапазонах и в целом обладает всеми недостатками операторских решений, использующихся в области сотовой связи.
 6. Sigfox – еще одна известная технология, работающая с узкополосными сигналами. Sigfox использует 200 кГц канал в нелицензируемых диапазонах (868–869 и 902–928 МГц в зависимости от региона). Sigfox применяет ультра узкополосную технологию Ultra Narrow Band (UNB), комбинирующую с DBPSK и GFSK модуляцией. Каждое сообщение передается со скоростью 100 или 600 бит/с в зависимости от региона [8].
 7. NB-IoT (NarrowBand IoT) – стандарт сотовой связи для устройств телеметрии с низкими объемами обмена данными. Разработан консорциумом 3GPP в рамках работ над стандартами сотовых сетей нового поколения. Первая рабочая версия спецификации представлена в июне 2016 г. [9]. Предназначен для подключения к цифровым сетям связи широкого спектра автономных устройств. NB-IoT разворачивается на оборудовании LTE. NB-IoT сеть может быть развернута как на оборудовании сотовых сетей LTE, так и отдельно, в том числе поверх GSM.
- Базовые характеристики наиболее распространенных протоколов систематизированы и представлены в табл. 1.
- ### Решение
- Выбор протокола Интернета вещей при построении системы является фундаментальной проблемой при создании решений для Интернета вещей, позволяющей предотвратить частные сложности. Стоит подчеркнуть, что в данном случае ошибка, сделанная на этапе выбора протокола, в худшем случае приводит к невозможности достижения требуемых показателей и обеспечения масштабирования сети. Тем не менее в литературе акцент делается на особенностях построения архитектур, а протокол Интернета вещей выбирается на основе одного-двух параметров и после прочтения маркетинговых материалов, а не на основе обоснованных количественных методов. Характеристики, систематизированные в табл. 1, подчеркивают многообразие параметров протоколов и очевидную сложность выбора. Поэтому в качестве метода решения проблемы может использоваться построение целевой функции с учетом набора критичных параметров и граничных условий. Параметры представлены в табл. 2.
- Рассмотрим каждый из параметров отдельно.
- Частотный диапазон. Исходя из свойств распространения радиоволн очевидно, что с точки зрения большей дальности распространения и меньшего затухания стоит отдавать предпочтение субгигагерцевым диапазонам, например 167 и 433 МГц. Однако данные диапазоны не всегда могут быть доступны, габариты антенно-фидерных устройств и скорости передач могут быть недопустимыми. Следовательно, целесообразно учитывать все диапазоны, включая 868 и 920 МГц; 2,4; 3,5 и 5 ГГц и иные допустимые. Выбирая оптимальный для условий диапазон, особенно для проприетарных протоколов, можно значительно упростить решение других научных и инженерных проблем в дальнейшем.

Таблица 1. Систематизация ключевых характеристик протоколов Интернета вещей
Table 1. Systematization of key features of IoT protocols

Параметр / Parameter	Wi-Fi	ZigBee	Z-Wave	BT	LoRaWAN	SigFox	NB-IoT
Частотный диапазон / Frequency range	2,4/5 ГГц	0,8/0,9/ 2,4 ГГц	0,8/0,9 ГГц	2,4 ГГц	0,43/0,8/ 0,9 ГГц	0,8/0,9 ГГц	0,8/0,9/ 1,8 ГГц
Ширина полосы / Bandwidth	20/40 МГц	2 МГц	300– 400 кГц	1–2 МГц в 80 МГц	125 кГц	200 кГц	200 кГц
Скорость передачи данных / Data transfer rate	1/10/54/300/ 600 Мбайт/с	20/40/ 250 Кбайт/с	9,6–40– 100 Кбайт/с	1–3 Мбайт/с	300 байт/с– 50 Кбайт/с	100/ 600 байт/с	250– 20 Кбайт/с
Мощность TX (max) / TX power (max)	20 дБм	< 20дБм	0 дБм	20 дБм	14–27 дБм	14–22 дБм	20–23 дБм
Энергопотребление в режиме TX / TX Power Consumption	1–3 Вт	<0,1 Вт	<0,1 Вт	0,1–0,4 Вт	<0,25 Вт	<0,3 Вт	<0,7 Вт
Дальность / Distance	100 м	100 м +	< 100 м	10 м	1–20 км (50)	1–20 км (50)	~3 км (18)
Шифрование / Encryption	Да, WPA2	Да, AES	Да, AES, S2	Да, AES	Да, AES	Да, AES	Да, XTEA
Количество устройств в сети / The number of devices in the network	30	65000	232	7	100000+	100000+	100000
Топология сети / Network topology	tree	star / mesh / p2p / tree	star / mesh	tree	star	star	star

Таблица 2. Ключевые параметры системы Интернета вещей
Table 2. Key parameters of IoT system

Параметр / Parameter	Нумерация параметра / Parameter number	Весовой коэффициент / Weight coefficient
Частотный диапазон / Frequency range	X1	A1
Дальность / Range	X2	A2
Излучаемая мощность / Radiated power	X3	A3
Полоса / Band	X4	A4
Скорость / Speed	X5	A5
Энергопотребление / Power consumption	X6	A6
Интенсивность приема/передачи данных / The intensity of data receipt/transmission	X7	A7

- **Дальность.** С одной стороны, в ряде приложений для открытой местности следует стремиться к максимальной дальности. С другой стороны, в решениях из области «Умный дом» нецелесообразно завышать дальность действия систем. Наоборот, для уменьшения взаимного влияния

- радиоустройств следует ограничивать дальность, особенно при работе в рамках отдельных помещений и этажей.
- **Излучаемая мощность.** Данный параметр влияет на дальность действия систем и на энергопотребление, особенно устройств с автономным

- питанием. Также будет возрастать интенсивность помех.
- Полоса частот. Очевидно, что скорость работы, количество каналов и помехоустойчивость будут зависеть от полосы. Кроме того, при выборе известного протокола Интернета вещей мы вынуждены работать с заданной шириной полосы и допустимым количеством каналов. Однако при выборе проприетарного решения разработчик волен сам определять требуемую полосу.
 - Скорость (передачи данных), разумеется, пропорциональна полосе частот, тем не менее всегда стоит вопрос о введении избыточности информации для обеспечения помехоустойчивости, безопасности либо иных параметров.
 - Энергопотребление является важным параметром вследствие того, что устройства Интернета вещей часто обладают автономным источником питания, и восполнение энергобаланса в виде подзарядки или замены источника питания может представлять проблему (инфраструктурную, инженерную, экономическую).
 - Интенсивность приема/передачи данных. В зависимости от целей системы Интернета вещей интенсивность может быть высокой (постоянная передача снимаемых параметров) либо низкой (передача параметра раз в сутки или в месяц) (краевые случаи).

Таким образом, в работе представлены базовые параметры, являющиеся основополагающими при выборе протокола и проектировании систем Интернета вещей. Стоит отметить, что необходимо учитывать фундаментальные ограничения. В радиотехнике описаны теоретические пределы, которые являются граничными условиями и должны быть учтены при построении целевой функции. Так, для канала с аддитивным белым гауссовским шумом пропускная способность согласно формуле Шеннона

$$C = F \log\left(1 + \frac{P_s}{P_n}\right), \quad (1)$$

где F – полоса частот, Гц; P_s – мощность сигнала, Вт; P_n – мощность шума, Вт.

Мощность принятого сигнала равна разности мощности передатчика и показателя потерь [10] (в зависимости от условий распространения описываются различные модели – открытое пространство, внутри зданий, в условиях города и т. д.):

$$P_r(d)[dBm] = P_t[dBm] - PL(d)[dB]. \quad (2)$$

На практике мощность принятого сигнала в системах Интернета вещей выражается значением RSSI (received signal strength indicator) – показатель уровня принятого сигнала, что учитывает

абсолютно все факторы, влияющие на затухание сигнала при распространении. Поэтому вместо анализа моделей, использующихся для выражения (2), следует использовать RSSI. Для целевой функции имеют значение нормированные величины параметра, которые можно получить при помощи таблицы перекодировки.

Тогда целевую функцию можно выразить следующим образом:

$$F_1 = X_1 A_1 + X_2 A_2 + X_3 A_3 + X_4 A_4 + X_5 A_5 + X_6 A_6 + X_7 A_7 \quad (3)$$

или, для наглядности, группируя тождественные параметры с весовыми коэффициентами:

$$\begin{cases} B_1 = X_1 A_1 + X_2 A_2 + X_3 A_3 \\ B_2 = X_4 A_4 + X_5 A_5 \\ B_3 = X_6 A_6 + X_7 A_7 \end{cases} \quad (4)$$

на основе табл. 1.

При этом задача оптимизации является многокритериальной, а отдельные требования могут противоречить друг другу.

В результате применения данного метода, основанного на использовании целевой функции, а фактически – модели системы Интернета вещей при задании ряда входных параметров, включая прикладной кейс, можно достоверно определить оптимальный для построения системы протокол. В случае проприетарного протокола можно выделить ряд параметров для вариации и провести оптимизацию.

Перечень приведенных параметров является базовым и может быть расширен, что приведет к большей сложности, но вместе с тем и точности модели. Имеет смысл учитывать габаритные параметры устройств в целом, емкость аккумуляторов для автономных устройств, стоимость материалов (ВОМ), количество устройств, длину информационных и служебных пакетов.

Выходы

1. Представлены базовые характеристики основных и наиболее используемых протоколов Интернета вещей, а также базовая архитектура системы. Причем приведенные характеристики определяют производительность, масштабируемость, надежность, стоимость уже всей системы вне зависимости от архитектуры.

2. Предложена модель системы Интернета вещей для выбора оптимального протокола в условиях ряда граничных условий. При помощи целевой функции и вариации параметров можно показать, что технология LoRaWAN неэффективна для автоматизации «умных домов». Точность и эффективность представленной модели будет возрастать при увеличении количества параметров, включая

количество устройств, габариты, длину информационных пакетов, экономических показателей системы Интернета вещей.

3. Стоит отметить, что применяемый метод позволит сделать выбор не только между какими-либо

известными протоколами Интернета вещей, но и в пользу проприетарного, а также принять решение в пользу централизованной (cloud computing) либо децентрализованной (fog/edge computing) обработки генерируемых данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Internet Of Aircraft Things: An Industry Set To Be Transformed*, Bhoopathi Rapolu | AviationWeek.com, 2016 [Электронный ресурс]. URL: <http://aviationweek.com/connected-aerospace/internet-aircraft-things-industry-set-be-transformed> (дата обращения: 29.03.2019).
2. *The complete list of wireless IoT network protocols*, 02, 2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.link-labs.com/blog/complete-list-iot-network-protocols> (дата обращения: 29.03.2019).
3. *ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.wardriving.ch/hpneu/info/doku/802.11-1999.pdf> (дата обращения: 29.03.2019),
4. *ZigBee Specification – 05–3474 Rev 20, September 7, 2012* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.zigbee.org/wp-content/uploads/2014/11/docs-05-3474-20-0csg-zigbee-specification.pdf> (дата обращения: 29.03.2019).
5. *Z-Wave Software Design Specification*, Silicon Labs, 2019 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.silabs.com/documents/login/miscellaneous/SDS14224-Z-Wave-Plus-v2-Device-Type-Specification.pdf> (дата обращения: 29.03.2019).
6. *IEEE802.15 WPAN Task Group 1 (TG1)*, 2019 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html> (дата обращения: 29.03.2019).
7. *LoRaWAN™ Specification v1.0*, 2015 LoRa Alliance, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rs-online.com/designspark/rel-assets/ds-assets/uploads/knowledge-items/application-notes-for-the-internet-of-things/LoRaWAN%20Specification%201R0.pdf> (дата обращения: 29.03.2019).
8. *Sigfox Technology Overview*, 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sigfox.com/en> (дата обращения: 29.03.2019).
9. *Narrowband Internet of Things Whitepaper*, Rohde & Schwarz, 2017 [Электронный ресурс]. URL: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf (дата обращения: 29.03.2019).
10. *Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice Hall, 2002, 104 p.

REFERENCES

1. *Internet Of Aircraft Things: An Industry Set To Be Transformed*, Bhoopathi Rapolu | AviationWeek.com, 2016. Available at: <http://aviationweek.com/connected-aerospace/internet-aircraft-things-industry-set-be-transformed> (accessed 29.03.2019).
2. *The complete list of wireless IoT network protocols*, 02, 2016. Available at: <https://www.link-labs.com/blog/complete-list-iot-network-protocols> (accessed 29.03.2019).
3. *ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition*. Available at: <https://www.wardriving.ch/hpneu/info/doku/802.11-1999.pdf> (accessed 29/03/2019).
4. *ZigBee Specification – 05–3474 Rev 20, September 7, 2012*. Available at: <http://www.zigbee.org/wp-content/uploads/2014/11/docs-05-3474-20-0csg-zigbee-specification.pdf> (accessed 29.03.2019).
5. *Z-Wave Software Design Specification*, Silicon Labs, 2019. Available at: <https://www.silabs.com/documents/login/miscellaneous/SDS14224-Z-Wave-Plus-v2-Device-Type-Specification.pdf> (accessed 29.03.2019).
6. *IEEE802.15 WPAN Task Group 1 (TG1)*, 2019. Available at: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html> (accessed 29/03/2019).
7. *LoRaWAN™ Specification v1.0*, 2015 LoRa Alliance, Inc. Available at: <https://www.rs-online.com/designspark/rel-assets/ds-assets/uploads/knowledge-items/application-notes-for-the-internet-of-things/LoRaWAN%20Specification%201R0.pdf> (accessed 29.03.2019).
8. *Sigfox Technology Overview*, 2017. Available at: <https://www.sigfox.com/en> (accessed 29.03.2019).
9. *Narrowband Internet of Things Whitepaper*, Rohde & Schwarz, 2017. Available at: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf (accessed 29.03.2019).
10. *Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice Hall, 2002, 104 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Анufриенко Александр Юрьевич, аспирант, НИУ «Высшая школа экономики», МИЭМ, директор по исследованиям и разработкам, ООО «Национальный центр информатизации», 121059, Москва, Бережковская наб., д.38, стр. 1, тел.: 8 (911) 949-61-50, e-mail: alexanuf@mail.ru.

AUTHOR

Alexander Yu. Anufrienko, postgraduate student, National Research University Higher School of Economics, Director, R&D National IT Center, 38, str. 1, Berezhkovskaya naberezhnaya, Moscow, 121059, Russia, tel.: +7 (911) 949-61-50, e-mail: alexanuf@mail.ru.

Поступила 18.01.2019; принята к публикации 20.03.2019; опубликована онлайн 27.05.2019.
Submitted 18.01.2019; revised 20.03.2019; published online 27.05.2019.

DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-35-44

УДК 621.382

Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и неразрушающий контроль потенциальных дефектов полупроводниковой электронной компонентной базы

В. П. Крылов¹, А. М. Богачев¹, Т. Ю. Пронин¹

¹ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Россия

В статье обсуждаются возможности методов релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) в полупроводниках и причины, сдерживающие их применение для промышленного контроля потенциальных дефектов полупроводниковой электронной компонентной базы (ЭКБ). Среди причин отмечаются неоднозначная интерпретация результатов косвенных измерений, отсутствие отечественной нормативной базы и программно-аппаратных средств, разнообразие алгоритмов и методик проведения измерений и обработки результатов. Предложены модели аппаратных преобразований слабых релаксационных откликов микрозелектронных барьерных структур. Изложена методика проведения и результаты экспериментальных исследований характеристик потенциальных дефектов на серийных полупроводниковых диодах методом частотно-температурного сканирования с помощью разработанных моделей. Полученные результаты свидетельствуют о возможности существенного повышения точности измерений параметров потенциальных дефектов. Сделан вывод о необходимости организации и проведения межлабораторной поверки на единых образцах для продвижения методов РСГУ в практику промышленного контроля.

Ключевые слова: полупроводниковые изделия, потенциальный дефект, релаксационная спектроскопия глубоких уровней, частотное сканирование

Для цитирования:

Крылов В.П., Богачев А.М., Пронин Т.Ю. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и неразрушающий контроль потенциальных дефектов полупроводниковой электронной компонентной базы // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 2. С. 35–44. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-35-44

© Крылов В.П., Богачев А.М., Пронин Т.Ю., 2019



Deep level relaxation spectroscopy and non-destructive testing of potential defects in the semiconductor electronic component base

V.P. Krylov¹, A.M. Bogachev¹, T.Yu. Pronin¹

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

This article deals with the possibilities of methods of the deep-level transient spectroscopy in semiconductors and the reasons constraining their application for industrial control of potential defects of the semiconductor electronic component base. Among the reasons there are an ambiguous interpretation of the results of indirect measurements, the lack of the domestic regulatory base and software and hardware tools, a variety of algorithms and techniques of measurements and processing of results. Models of hardware transformations of weak relaxation responses of microelectronic barrier structures are proposed. The methodology and results of experimental studies of the characteristics of potential defects of serial semiconductor diodes by the method of frequency-temperature scanning using the developed models are described. The obtained results indicate the possibility of a significant increase in accuracy of measurements of parameters of potential defects. The conclusion is made about the need to organize and perform interlaboratory checking on uniform samples to promote the methods of the deep-level transient spectroscopy in the practice of industrial monitoring.

Keywords: semiconductor components, potential defect, deep level transient spectroscopy, frequency scanning

For citation:

Krylov V.P., Bogachev A.M., Pronin T.Yu. Deep level relaxation spectroscopy and non-destructive testing of potential defects in the semiconductor electronic component base. Radiopromyshlennost, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 35–44 (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-35-44

Введение

Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковой электронной компонентной базы (ЭКБ – приборов и интегральных микросхем) [1], дополняющие арсенал технических условий (ТУ), обоснованно рассматриваются в качестве эффективной альтернативы отбраковочным испытаниям, например электротермотренировке, и направлены на обнаружение так называемых потенциальных дефектов [2, с. 17], не предусмотренных проектом инженерного дефектообразования [3, с. 3]. Указанная альтернатива развивается в рамках причинного (физико-технологического) подхода к обеспечению надежности, который дополняет статистический подход, основанный, как известно, на получении групповой количественной оценки интенсивности отказов при испытаниях большого количества однородных изделий в течение длительного времени. Причинный подход можно пояснить, используя междисциплинарные аналогии [4]. Отказу полупроводникового прибора способствуют два обстоятельства: плохая наследственность или генетическая предрасположенность (открытые и скрытые технологические дефекты), а также условия при испытаниях приборов на жизненную стойкость, т.е. стрессы – словом, все как в живых организмах. В отличие от статистического, причинный подход не позволяет получить

количественную индивидуальную оценку «продолжительности жизни» конкретного полупроводникового изделия, но способен при обнаружении в изделии потенциальных дефектов не допустить использования этого изделия в аппаратуре ответственного применения. Именно так стараются поступать на предприятиях Ростехнадзора при отборе ЭКБ для космических аппаратов с длительными сроками активного существования на орбите.

Нормальное функционирование элементов полупроводниковых микросхем основано на нерегулярности структуры полупроводникового материала, что уже является дефектом с точки зрения физики твердого тела, поскольку в этом смысле бездефектные полупроводниковые приборы просто неинтересны для практики. Необходимо скорректировать понятие дефекта относительно уже принятого определения, означающего недостаток, изъян, недочет, повреждение и т.д., в сторону учета неравновесного характера системы, которой является полупроводниковая интегральная микросхема (ИМС).

В работе [2] по диагностике качества ИМС для этих целей предложено использовать термин «потенциальный дефект», по отношению к которому рекомендуется определять информативный с точки зрения потенциальной надежности параметр ИМС. Если между потенциальными дефектами

и диагностическими параметрами может существовать детерминированная связь, то между дефектами и последующими отказами связь вероятностная.

Достаточно подробная и современная классификация применяемых в промышленности дополнительных методов контроля диагностических параметров, связанных с потенциальными дефектами, приведена в монографии М.И. Горлова и В.А. Сергеева [1, с. 16]. Обращаем внимание читателей на отсутствие в этой классификации методов прикладной релаксационной спектроскопии глубоких уровней (PCGU, DLTS – Deep Level Transient Spectroscopy) [5], успешно применяемых в физике полупроводников для исследования и не-разрушающего контроля дефектов полупроводниковых структур микро- и наноэлектроники [6] через определение параметров глубоких уровней (ГУ) в запрещенной зоне полупроводника. Указанные методы, судя по многочисленным публикациям, обладают высокой чувствительностью, позволяют идентифицировать дефекты по ряду параметров на фоне внешних воздействий и формировать специализированные базы данных [7, 8], в то время как представители классификации [1] ориентированы в основном на использование корреляции диагностических параметров с результатами разрушающих испытаний на надежность (до отказа) вне связи с конкретными потенциальными дефектами.

Анализ причин, сдерживающих появление прикладной РСГУ в арсенале современных диагностических методов контроля качества и надежности полупроводниковой ЭКБ, и инициирование обсуждения перспектив использования РСГУ в радиопромышленности – цель настоящей работы.

Моделирование физических процессов и аппаратных преобразований сигналов

Наиболее полно методика одного из методов РСГУ – прикладной емкостной РСГУ, включая рекомендации и алгоритмы по оценке точности измерений параметров ГУ, изложена в стандарте ASTM-SEMI F978-02 [9]. Используемая в [9] методика основана на физической интерпретации (модели) процесса релаксации емкости полупроводниковых барьерных структур, предложенной Д. Лэнгом [5], но с некоторыми оговорками. И в этой связи уместно напомнить об имевших место в конце прошлого века научных дискуссиях, инициированных сторонниками альтернативного подхода к модельной интерпретации процесса релаксации емкости полупроводниковой барьерной структуры [10].

При анализе переходных процессов, связанных с заполнением и опустошением одного дискретного ГУ, обусловленного существованием объемного дефекта, все авторы считают доступные регистрации

процессы опустошения одиночных ГУ относительно малой концентрации экспоненциальными с постоянной времени τ , зависящей от температуры следующим образом [5, 9]:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{\Delta E}{kT}, \quad (1)$$

где τ_0 – коэффициент, зависящий от типа и параметров полупроводника; ΔE – оценка положения ГУ относительно границ запрещенной зоны; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура образца.

Для скорости эмиссии, являющейся обратной величиной по отношению к τ , в стандарте [9] приводится также более строгое с теоретической точки зрения уравнение (для электронов):

$$e_n = \sigma_n \vartheta_t N_c \exp \left(\frac{-\Delta G}{kT} \right), \quad (2)$$

где σ_n – эффективное сечение захвата для электрона; ϑ_t – тепловая скорость электрона; N_c – плотность состояний в зоне проводимости; ΔG – свободная энергия Гиббса, являющаяся функцией от температуры образца

$$\Delta G = \Delta E - T \Delta S, \quad (3)$$

где энергия активации ΔE , если быть точнее, есть энタルпия, которая и определяется при РСГУ, так как энтропию ΔS обычно полагают равной нулю, считая энергию ионизации не зависящей от температуры.

Далее авторы расходятся во мнениях относительно интерпретации τ_0 . Большинство отечественных авторов и практически все зарубежные, включая авторов стандарта F978-02, интерпретируют τ_0 следующим образом [5, 9]:

$$\tau_0 = (\sigma b T^2)^{-1}, \quad (4)$$

где σ – сечение захвата носителей заряда; b – параметр полупроводника, зависящий от типа полупроводника и ГУ (донорный или акцепторный).

При этом они опираются на формулу (2) и исходят из того, что ϑ_t прямо пропорциональна $T^{1/2}$, а N_c , соответственно, – $T^{3/2}$. Таким образом, уравнение (1) принимает вид

$$\tau = (\sigma b T^2)^{-1} \exp \frac{\Delta E}{kT}. \quad (5)$$

Известны также варианты представления формулы (4) в более подробном виде, облегчающем нахождение коэффициентов b [11, с. 4]:

$$\tau_0 = (\gamma \sigma m^* T^2)^{-1}, \quad (6)$$

где γ – константа, определяемая выражением

$$\gamma = 16\pi m_e k^2 / h^3 \approx 3 \cdot 10^{21} \text{ град}^{-2} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1},$$

где m^* – эффективная масса носителя заряда; m_e – масса электрона; k – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка.

Научные споры возникли вокруг интерпретации предэкспоненциального множителя τ_0 после опубликования П.Т. Орешкиным на основе разработанной им активационно-пролетной теории альтернативной формулы для определения τ_0 основных носителей тока [10, с. 136]:

$$\tau_0 = 2\tau_M = 2\varepsilon\rho_v, \quad (7)$$

где τ_M – максвелловское время релаксации в базе диода; ε и ρ_v – соответственно абсолютная диэлектрическая проницаемость и удельное объемное сопротивление материала базы диода.

Из приведенной формулы следует отрицание сечения захвата как параметра ГУ.

Попытка поставить точку в развернувшейся на страницах научных журналов дискуссии была предпринята сторонниками модели Д. Лэнга [12] в ходе специальных опровергающих экспериментов, на категоричные выводы которых оппоненты (сторонники модели П. Т. Орешкина) в более поздних публикациях [13, 14] по существу не ответили. Таким образом, сосуществование двух моделей продолжается.

Ради справедливости следует заметить в свете упомянутых дискуссий, что в стандарте F978–02 предлагается вместо сечения захвата σ определять некий предэкспоненциальный множитель $B = \sigma b$, не зависящий от температуры и не имеющий определенного физического смысла, в отличие от энергии активации ГУ. На наш взгляд, это шаг в сторону прикладного характера методики РСГУ, более понятный и доступный на практике. По этой причине стандарт F978–02 не предусматривает определение сечения захвата σ как параметра ГУ.

Пренебрегая температурными зависимостями параметра B и энергии уровня ΔE , в модели Д. Лэнга обе части уравнения (5) логарифмируют после умножения на T^2 и получают уравнение прямой линии

$$\lg(\tau T^2) = -\lg(\sigma b) + \frac{\Delta E}{k \ln(10)} \quad (8)$$

в так называемых координатах Аррениуса $\lg(\tau T^2) - 1000/T$. Наклон этой прямой относительно оси координат $1000/T$ определяет энергию уровня, точнее, ΔE , а смещение указанной прямой по вертикали – сечение захвата с точностью до параметра b .

В модели П. Т. Орешкина координаты Аррениуса принимают вид $\lg(\tau) - 1000/T$. В условиях низкой точности экспериментов, обусловленной малым количеством точек на графиках Аррениуса и не-большим диапазоном температур, обе модели дают примерно один и тот же результат при определении ΔE . По нашему мнению, именно этим объясняется

относительно мирное сосуществование двух вариантов физической интерпретации релаксации емкости за счет опустошения ГУ.

Далее будет показано, что по мере повышения точности косвенных измерений шестисигмальные ($\pm 3\sigma_{\Delta E}$) доверительные интервалы ΔE , определяемые по стандарту F978–02, перестают пересекаться, т.е. конкурирующие модели дают различающиеся на фоне погрешностей определения значения ΔE .

В формулировке стандарта F978–02 параметр b не зависит от режимов измерений, в частности от разности напряжений опустошения и заполнения ГУ. Однако эксперименты на промышленных полупроводниковых барьерах структурах свидетельствуют о вертикальном смещении прямых в координатах Аррениуса при изменении указанной разности [14]. Поэтому, на наш взгляд, стандарт F978–02 предлагает параметр B вместо σb в качестве компромиссного решения для прикладных измерений.

Необходимость в аппаратных преобразованиях релаксационного сигнала возникает при исследованиях барьерах структур относительно малых размеров, когда уровень шумов значительно выше уровня сигнала релаксации емкости. Основой аппаратных преобразований, выполняемых измерительным трактом релаксационного спектрометра, является известная из теории радиоприемных устройств корреляционная процедура оптимальной обработки, использующая априорные знания о принимаемых сигналах. Устройство для обработки смеси сигнала и шума называется коррелиатором и состоит из последовательно соединенных аналогового перемножителя и схемы суммирования (интегратора) результатов перемножения за время наблюдения T . Перемножитель имеет два входа, на которые подают соответственно входной и опорный сигналы. Такая система обработки называется корреляционной, потому что выходное напряжение образуется по закону, представляющему с точностью до амплитудного множителя взаимокорреляционную функцию входного сигнала и опорного.

Модель аппаратных преобразований релаксационного сигнала должна учитывать отключение канала обработки на время, соответствующее сумме длительностей импульса заполнения ГУ и времени релаксации мелких уровней (основных примесей, определяющих тип проводимости). В итоге, например, для спектрометра DLS-82E фирмы SEMILAB, который был использован при проведении экспериментов, эквивалентная опорная функция селектора имеет вид, отличный от меандра, в РСГУ именуемого «lock-in». Зоны молчания в спектрометре DS-82E формируются по правилу $t_1 + T_0/20$, где

t_1 – длительность импульса заполнения; T_0 – период следования импульсов заполнения (ширина временного окна). Вторая зона молчания в середине временного окна предназначена для режима дифференциальной РСГУ (с двумя импульсами заполнения ГУ) и из-за конструктивных особенностей спектрометра DLS-82E не может быть отключена.

В первом приближении [5, 12] релаксационный сигнал ГУ с объемного дефекта (глубокого центра) считают экспоненциальным:

$$e(t, \tau) = C \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right), \quad (9)$$

где C – амплитуда емкостного релаксационного сигнала. Отрицательное значение амплитуды не противоречит физическому смыслу, а всего лишь означает увеличение емкости образца в процессе релаксации ГУ, тогда как положительное значение C указывает на уменьшение емкости во времени при релаксации ГУ. В работах [5, 12] показано, что увеличение емкости обратно смещенному несимметричному резкого p^+ – n перехода с базой n типа связано с уходом электронов (основных носителей) с ГУ в область электронейтральности в процессе релаксации, что приводит к возрастанию величины объемного заряда в базе запертого диода. Такой ГУ принято называть акцептором [15], поскольку в свободном состоянии он нейтрален и отрицателен, когда занят электроном.

Если релаксационный экспоненциальный сигнал может быть описан соотношением (9), то выходной сигнал коррелятора измерителя DLS-82E имеет вид

$$S(\tau, C, F_0) = CK_{BS}K_{LS}\phi(\tau, F_0, t_1), \quad (10)$$

где C – амплитуда релаксационного сигнала, пФ; $K_{BS} = 10/BS$ – масштабный коэффициент, зависящий от выбранного значения суммарной чувствительности BS емкостного моста с выходным усилителем и фазового детектора, которая может дискретно выбираться от 1 до 1000 пФ; $K_{LS} = 10^4 K_m/LS$ – масштабный коэффициент селектора, зависящий от его чувствительности LS , изменяющейся от 1 до 1000 мВ;

$$\begin{aligned} \phi(\tau, F_0, t_1) &= M\tau F_0 \exp\left(-\frac{0,05}{\tau F_0}\right) \times \\ &\times \left[1 - \exp\left(\frac{t_1 F_0 - 0,45}{\tau F_0}\right) - \exp\left(-\frac{0,5}{\tau F_0}\right) + \exp\left(\frac{t_1 F_0 - 0,95}{\tau F_0}\right)\right]; \end{aligned} \quad (11)$$

τ – постоянная релаксации глубокого уровня; $F_0 = 1/T_0$ – частота опорного сигнала; t_1 – длительность импульса заполнения. Функция $\phi(\tau, C, F_0)$ имеет один максимум и стремится к нулю при стремлении F_0 к нулю и бесконечности.

Для того чтобы выходной сигнал коррелятора не зависел от множителя M , пронормируем его следующим образом:

$$S(\tau, C, F_0) = CK_{BS}K_{LS} \frac{\phi(\tau, F_0, t_1)}{K_m}, \quad (12)$$

где $K_m = \max[\phi(\tau, F_0, t_1)]$ – нормирующий коэффициент. Этот коэффициент должен также войти в состав масштабного коэффициента K_{LS} , характеризующего чувствительность селектора, чтобы исходное выражение (10) не изменилось. Предлагаемое нормирование, по мнению авторов, позволяет, во-первых, упростить определение масштабного множителя M путем включения его таким образом в состав K_{LS} , а во-вторых, отношение $\phi(\tau, F_0, t_1)/K_m$, как будет показано далее, позволяет учесть неэкспоненциальность релаксационного сигнала или нелинейность измерительного тракта спектрометра, включая аппаратный селектор и фазовый детектор на выходе емкостного моста.

Для интегрального (смешанного) учета нелинейности тракта аппаратных преобразований и неэкспоненциальности релаксационного сигнала предлагается трехпараметрическая математическая модель частотной характеристики селектора при наличии в спектре одного дискретного глубокого уровня в виде

$$S(\tau, A, p, F_0) = A \left[\frac{\phi(\tau, F_0, t_1)}{K_m} \right]^p, \quad (13)$$

где $A = CK_{BS}K_{LS}$, $p > 0$ – коэффициент, несущий информацию о нелинейности перемножителя и фазового детектора одновременно, а также о неэкспоненциальности входного релаксационного сигнала и других причинах, например связанных с различной степенью заполнения ГУ в зависимости от длительности временного окна T_0 . В случае $p = 1$ последовательно соединенные фазовый детектор и аналоговый перемножитель в первом приближении можно считать линейным устройством относительно экспоненциального выходного сигнала емкостного измерительного моста при независимости степени заполнения ГУ при изменении T_0 .

В окончательном варианте четырехпараметрическая модель аппаратных преобразований релаксационного спектрометра DLS-82E, описывающая преобразованный сигнал релаксации одного ГУ с учетом постоянной заполнения τ_{fil} (filling – заполнение), принимает вид

$$\begin{aligned} S(\tau, C, p, \tau_{fil}, F_0) &= \\ &= \frac{K_{BS}K_{LS}C \left(1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{fil}}\right)\right)}{1 - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_{fil}}\right) \exp\left(-\frac{T_0 - t_1}{\tau}\right)} \left[\frac{\phi(\tau, F_0, t_1)}{K_m} \right]^p. \end{aligned} \quad (14)$$

При этом следует обратить внимание на то, что для устойчивого определения постоянной τ_{fil} , как правило, недостаточно частотного скана,

полученного при одном лишь значении длительности заполняющего импульса. Постоянная τ_{fil} , в отличие от τ , характеризующей процесс опустошения ГУ, как известно, позволяет приблизить определение сечения захвата ГУ, не искаженного полевым эффектом $|UR - U1|$. Увеличение количества частотных сканов, полученных при различных значениях длительности заполняющего импульса при постоянной температуре образца, очевидно, будет способствовать повышению точности (сходимости) определения τ_{fil} и других параметров модели (14).

Эксперимент

Широко распространенное в экспериментальных установках РСГУ температурно-частотное сканирование образца (медленное непрерывное повышение температуры от нижней границы к верхней на фоне относительно небольшого набора меняющихся дискретных значений частоты F_0 следования импульсов заполнения глубоких уровней) не способствует повышению точности определения параметров ГУ по причине зависимости большинства идентифицируемых параметров модели от температуры. Дополнительные трудности обусловлены точностью измерения меняющейся температуры и ограниченным набором указанных частот (так называемых временных окон).

Иная ситуация возникает при переходе на частотно-температурное сканирование, при котором практически неограниченное количество временных окон можно наблюдать при постоянной температуре образца. Процесс параметрической идентификации моделей в этом случае не осложняется неизвестными зависимостями параметров от температуры, и таким образом формируются

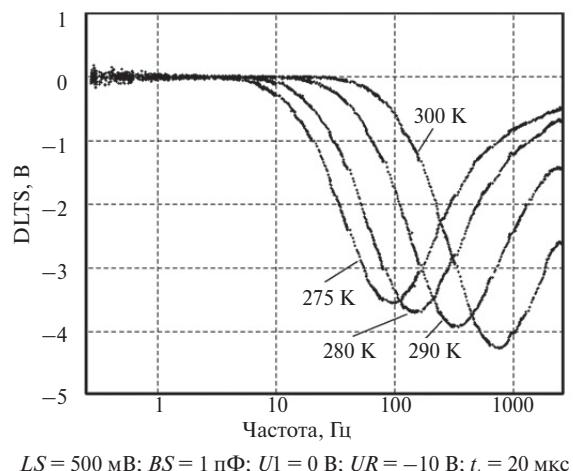


Рисунок 1. Зависимость частотных сканов диода КД-521А (образец 1) от температуры
Figure 1. Dependence of frequency scans of diode KD-521A (sample 1) on temperature

объективные предпосылки повышения точности измерений параметров ГУ. Экспериментальная установка, реализующая частотно-температурное сканирование, представляет собой измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) на базе модернизированного спектрометра DLS-82E фирмы SemiLab и климатической испытательной камеры S-1.2B-3200 фирмы Thermotron Industries с рабочим объемом 30 л. Модернизация спектрометра свелась к замене внутреннего задающего генератора блока формирования временных диаграмм внешним генератором с управлением от компьютера. В составе ИВК персональный компьютер с прикладным программным обеспечением собственной разработки, а также управляемые компьютером генератор прямоугольных импульсов АКИП-3305 фирмы ПРИСТ, мультиметр 34450A фирмы Keysight Technologies и 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь собственной разработки для регистрации DLTS-сигнала.

Точность поддержания температуры внутри рабочего объема климатической камеры обеспечивается на уровне ± 1 К встроенной автоматикой. Дополнительно стабилизируется температура в помещении лаборатории с помощью кондиционера. Образцы (до пяти штук) размещаются на печатной плате с разъемом внутри достаточно массивного полугерметичного контейнера из алюминиевого сплава для обеспечения тепловой инерционности и изотермичности внутреннего объема. Предусмотрена возможность поочередного подключения каждого образца ко входу спектрометра без разгерметизации контейнера и климатической камеры. В непосредственной близости от платы с образцами расположен платиновый термистор ТСП-21 с четырехпроводной схемой подключения к мультиметру. В результате за время одного частотного сканирования температура внутри контейнера изменяется в пределах $\pm 0,05$ К. Принципиально возможна, в отличие от температурно-частотного сканирования, организация мониторинга температуры образца с более высокой точностью для реализации адаптивно-итеративных алгоритмов косвенных измерений. Применение внешнего программно управляемого задающего генератора обеспечивает поддержку частот F_0 в диапазоне от 2500 до 0,25 Гц с шагом до 0,01 Гц на любом выбранном участке внутри указанного диапазона.

На рис. 1 представлены частотные сканы диода КД-521А (образец 1) при разных значениях температуры образца и постоянных значениях напряжений заполнения $U1$ и опустошения UR . На рис. 2 показано семейство частотных сканов диода КД-521А (образец 2) при изменении напряжения заполнения $U1$ и постоянных значениях температуры и напряжения опустошения UR .

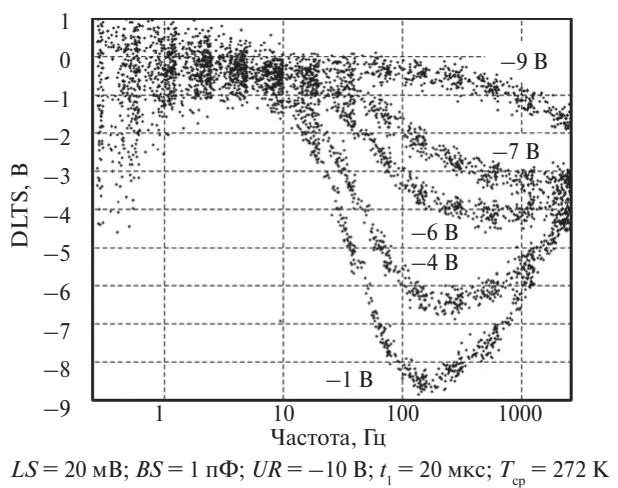


Рисунок 2. Зависимость частотных сканов диода КД-521А (образец 2) от напряжения заполнения при постоянной температуре
Figure 2. Dependence of frequency scans of diode KD-521A (sample 2) on voltage

На рис. 3 штриховыми линиями показаны три варианта математической модели частотного скана (при разных значениях параметра p) на фоне экспериментального частотного скана образца 1, а на рис. 4 – аналогичные модели на фоне экспериментального частотного скана образца 2.

Для параметрической идентификации модели (14) использован мультискан – несколько частотных сканов, полученных при разных значениях длительности заполняющего импульса t_1 (рис. 5).

В среднем идентификация на одном скане отличается неустойчивостью решения – отношение τ/τ_{fil} меняется от 2 до 0,5. Использование мульти-

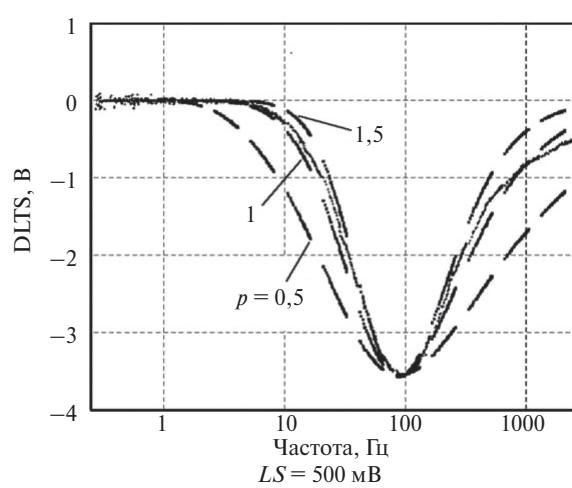


Рисунок 3. Экспериментальный частотный скан образца 1 и варианты математических моделей
Figure 3. Experimental frequency scan of sample 1 and the variants of mathematical models

скановой идентификации стабилизирует указанное отношение в пределах $2 \pm 10\%$ при $UR = -10 \text{ В}$, $U_1 = -1 \text{ В}$.

Обсуждение результатов

Судя по чувствительности LS , указанной на рис. 1, образец 1 отличается более сильным сигналом релаксации емкости, а образец 2 (см. рис. 2), наоборот, слабым на фоне шумов. Это свидетельствует об информативности сигнала релаксации для подчеркивания отличий серийных приборов КД-521А друг от друга. Обращают на себя внимание существенный разброс характеристик ГУ

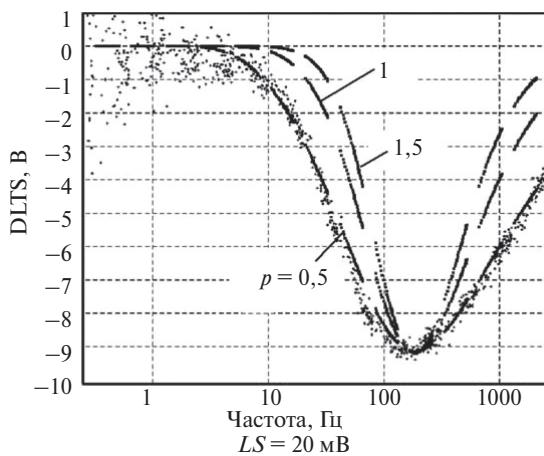


Рисунок 4. Экспериментальный частотный скан образца 2 и варианты математических моделей
Figure 4. Experimental frequency scan of sample 2 and the variants of mathematical models

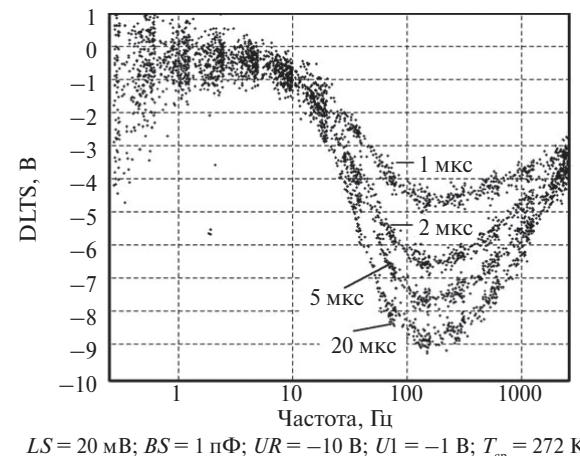


Рисунок 5. Частотные сканы образца 2 при разных значениях длительности импульса заполнения ГУ
Figure 5. Frequency scans of sample 2 for different values of deep level pulse filling duration

в пределах одной партии поставки ЭКБ, наглядно свидетельствующий об известных проблемах контроля режимов диффузии золота, вводимого для повышения быстродействия диодов, а также зависимость амплитуды пика от температуры (см. рис. 1) при постоянных значениях напряжений заполнения и опустошения ГУ. Соответствующие модели изменения амплитуды пика от температуры в литературе не обнаружены, хотя можно попытаться объяснить это явление с помощью зависимости степени ионизации ГУ от температуры и тем самым дополнительно уточнить энергию активации ГУ. При изменении напряжения заполнения изменяются амплитуда пика и его положение на оси частот (см. рис. 2), что противоречит распространенной гипотезе о мгновенном выносе носителей с ГУ. Чем больше эквивалентная длина области релаксации, тем больше постоянная релаксации. Это может быть связано с повторным захватом носителей на ГУ в процессе выноса в область электронейтральности, а также с диэлектрической релаксацией [15, с. 32, 52] (максвелловским торможением при выносе).

Рисунки 3 и 4 иллюстрируют повышение точности моделирования частотного скана за счет введения параметра p . Более сильный сигнал (образец 1, см. рис. 3) соответствует параметру $1 \leq p \leq 1,5$, в то время как образец 2 (см. рис. 4) ближе к параметру $p = 0,5$. Введение параметра p в модель частотного скана повышает точность определения постоянной релаксации τ , что вместе с увеличением числа экспериментальных частотных сканов способно существенно повысить точность определения ΔE – энергии активации ГУ. В эксперименте с 50 частотными сканами в интервале температур 262–297 К достигнута относительная точность определения энергии ГУ (трехсигмальная оценка) порядка 2%. Для сравнения по данным стандарта [9] аналогичная оценка точности определения энергии ГУ по результатам межлабораторной поверки примерно в 4–5 раз выше, т.е. точность существенно ниже. В результате повышения точности за счет частотно-температурного сканирования удалось зафиксировать отсутствие пересечения шестисигмальных ($\pm 3\sigma$) доверительных интервалов значений энергии ГУ, рассчитанных по моделям Д. Лэнга и П.Т. Орешкина, соответственно 512 ± 12 мЭв и 559 ± 12 мЭв.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Горлов М.И., Сергеев В.А. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий. 2-е изд. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 406 с.
- Кейджян Г.А. Основы обеспечения качества микроэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1991. 232 с.
- Булярский С.В., Светухин В.В. Физические основы управления дефектообразованием в полупроводниках. Ульяновск: УлГУ, 2002. 386 с.

Параметрическая идентификация модели (14) на мультискане (см. рис. 5) в целом обеспечивает устойчивость решения. Если, например, на одном скане параметрическая идентификация модели (14) характеризуется изменением отношения τ/τ_{fil} от 2 до 0,5, то использование мультискановой идентификации стабилизирует указанное отношение в пределах $2 \pm 10\%$ при $UR = -10$ В, $U1 = -1$ В.

Выводы

Изложены причины, сдерживающие применение методов прикладной РСГУ для контроля объемных потенциальных дефектов полупроводниковых изделий. Прежде всего это неоднозначная интерпретация экспериментальных результатов и отсутствие общепринятой методики обработки первичных результатов, включая оценку точности параметров глубоких уровней.

Экспериментально показано, что частотное сканирование при постоянной температуре образца способно обеспечить повышение точности определения параметров ГУ, в частности ΔE , в 4–5 раз по сравнению со стандартом F978–02 [9], что позволяет, например, уверенно различать результаты, полученные по упомянутым конкурирующим моделям.

Внедрение методов РСГУ в практику диагностического контроля предполагает координацию профильных лабораторий с целью разработки соответствующего нормативного документа для промышленности, который будет регламентировать параметры не только объемных дефектов, но и поверхностных. Промежуточным этапом данной разработки должна стать межлабораторная поверка с использованием единых образцов барьера структур. Трудности организации межлабораторной поверки обусловлены разными подходами к регистрации релаксационных сигналов и, как следствие, отсутствием образцов, удовлетворяющих всех участников поверки. В частности, промышленные диоды КД-521А для целей межлабораторной поверки не годятся из-за относительно малой емкости перехода и существенных разбросов параметров внутри партии.

Результаты работ в области контроля поверхностных потенциальных дефектов с помощью разработанного метода частотно-температурного сканирования мы планируем изложить в отдельной публикации.

4. Крылов В.П. Квалигенетика полупроводниковой ЭКБ: фантастика или необходимость? Некоторые аспекты обеспечения качества полупроводниковой ЭКБ // Электронные компоненты. 2015. № 10. С. 22–25.
5. Lang D.V. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 1974, vol. 45, no. 7, pp. 3023–3032.
6. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней и ее применение для исследования полупроводниковых структур микро- и наноэлектроники / В. Г. Литвинов, В. В. Гудзев, О. А. Милованова, Н. Б. Рыбин // Датчики и системы. 2009. № 9. С. 71–78.
7. Гудзев В.В., Литвинов В.Г., Зубков М.В. Автоматизированный измерительно-аналитический комплекс релаксационной спектроскопии глубоких уровней // Вестник Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина. 2012. Вып. 34. С. 171–181.
8. Свободный доступ к базе данных дефектов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.laplace-lts.eu/defect/> (дата обращения: 07.03.2019).
9. F 978 – 02 Standard Test Method for Characterizing Semiconductor Deep Levels by Transient Capacitance Techniques. Current edition approved Jan 10, 2002.
10. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа, 1977. 444 с.
11. Боброва Е.А., Галкин Г.Н. О разрешающей способности метода релаксационной емкостной спектроскопии. Препринт № 97. М.: ФИАН, 1990. 17 с.
12. Берман Л.С., Лебедев А.А. Об интерпретации результатов нестационарной емкостной спектроскопии глубоких центров в полупроводниковых структурах // Известия вузов. Физика. 1989. Т. 32, № 12. С. 88–90.
13. Холомина Т.А. Определение параметров глубоких уровней в полупроводниках при нестационарной спектроскопии и спектроскопии низкочастотного шума // Измерительная техника. 1998. № 12. С. 44–46.
14. Активационно-дрейфовая модель П.Т. Орешкина – основа изучения параметров глубоких центров в барьерных структурах / Т.А. Холомина, М.В. Зубков, С.А. Коstryukov, В.В. Гудзев // Приложение к журналу «Вестник РГРТУ». 2009. Вып. 30, № 4. С. 34–39.
15. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М.: Мир, 1989. 630 с.

REFERENCES

1. Gorlov M.I., Sergeev V.A. *Sovremennye diagnosticheskie metody kontrolya kachestva i nadezhnosti poluprovodnikovykh izdelii* [Modern diagnostic methods for quality control and reliability of semiconductor products]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2015, 406 p. (in Russian).
2. Keydzhyan G.A. *Osnovy obespecheniya kachestva mikroelektronnoi apparatury* [Fundamentals of quality assurance microelectronic equipment]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1991. 232 p. (in Russian).
3. Bulyarskiy S.V., Svetuhin V.V. *Fizicheskie osnovy upravleniya defektoobrazovaniem v poluprovodnikakh* [The physical basis of defect management in semiconductors]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2002, 386 p. (in Russian).
4. Krylov V.P. Qualigenetics of semiconductor ECB: fantasy or necessity? Some aspects of quality ensuring of semiconductor ECB. *Elektronnye komponenty*, 2015, no. 10, pp. 22–25 (in Russian).
5. Lang D.V. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 1974, vol. 45, no. 7, pp. 3023–3032.
6. Litvinov V.G., Gudzev V.V., Milovanova O.A., Rybin N.B. Deep-level transient spectroscopy and its application for the study of semiconductor structures of micro- and nanoelectronics. *Datchiki i sistemy*, 2009, no 9, pp. 71–78 (in Russian).
7. Gudzev V.V., Litvinov V.G., Zubkov M.V. Automated measuring and analytical complex for deep-level transient spectroscopy. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo universiteta im. S.A. Esenina*, 2012, iss. 34, pp. 171–181 (in Russian).
8. Defect DLTS Signal Standards – Laplace DLTS. Available at: <http://www.laplace-lts.eu/defect/> (accessed 07.03.2019).
9. F 978 – 02 Standard Test Method for Characterizing Semiconductor Deep Levels by Transient Capacitance Techniques. Current edition approved Jan 10, 2002.
10. Oreshkin P.T. *Fizika poluprovodnikov i dielektrikov* [Physics of semiconductors and dielectrics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977, 444 p. (in Russian).
11. Bobrova E.A., Galkin G.N. *O razreshayushchey sposobnosti metoda relaksatsionnoy emkostnoy spektroskopii* [About the resolution of the capacitance transient spectroscopy method]. Preprint no. 97. Moscow, FIAN Publ., 1990, 17 p. (in Russian).
12. Berman L.S., Lebedev A.A. About the interpretation of the results of nonstationary capacitive spectroscopy of deep centers in semiconductor structures. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 1989, vol. 32, no. 12, pp. 88–90 (in Russian).
13. Kholomina T.A. Determining the parameters of deep levels in semiconductors with non-stationary spectroscopy and low-frequency noise spectroscopy. *Izmeritel'naya tekhnika*, 1998, no. 12. pp. 44–46 (in Russian).
14. Kholomina T.A., Zubkov M.V., Kostryukov S.A., Gudzev V.V. Activation-drift model P. T. Oreshkin – the basis for studying the parameters of deep centers in barrier structures. *Prilozhenie k zhurnalu «Vestnik RGRTU»*, 2009, iss. 30, no. 4. pp. 34–39 (in Russian).
15. Muller R.S., Kamins T.I. *Elementy integralnyh skhem* [Elements of integrated circuits]. Moscow, Mir Publ., 1989, 630 p. (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крылов Владимир Павлович, д.т.н., доцент, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 600026, Владимир, ул. Горького, 87, тел.: +7 (915) 756-31-57, e-mail: v_p_krylov@vlsu.ru.

Богачев Алексей Михайлович, магистрант, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 600026, Владимир, ул. Горького, 87, тел.: +7 (910) 095-90-37, e-mail: bogachev-al2012@yandex.ru.

Пронин Тимофей Юрьевич, аспирант, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 600026, Владимир, ул. Горького, 87, тел.: +7 (920) 918-53-79, e-mail: pronin_t_y@list.ru.

AUTHORS

Vladimir P. Krylov, Dr. Sci. (Engineering), associate professor, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, 87, ulitsa Gorkogo, Vladimir, 600026, Russia, tel.: +7 (915) 756-31-57, e-mail: v_p_krylov@vlsu.ru.

Aleksey M. Bogachev, master's degree student, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, 87, ulitsa Gorkogo, Vladimir, 600026, Russia, tel.: +7 (910) 095-90-37, e-mail: bogachev-al2012@yandex.ru.

Timofey Yu. Pronin, postgraduate student, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, 87, ulitsa Gorkogo, Vladimir, 600026, Russia, tel.: +7 (920) 918-53-79, e-mail: pronin_t_y@list.ru.

Поступила 24.01.2019; принята к публикации 21.02.2019; опубликована онлайн 27.05.2019.
Submitted 24.01.2019; revised 21.02.2019; published online 27.05.2019.

DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-45-53

УДК 550.34.016; 537.868; 534–18

Экспериментальное изучение механоэлектрических преобразований при слабом насыщении горных пород

И. Я. Чеботарева¹, А. Н. Камшилин²

¹ Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

² Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

В статье приведены результаты исследования электрического отклика сухих и слабо насыщенных подсоленной водой (NaCl) или керосином кернов песчаника Berea при акустическом воздействии в диапазоне частот 0,5–10 кГц. В опытах создавалась сильная латеральная неоднородность по насыщению. Электрический отклик проявляет чувствительность к введению в образцы породы всех видов жидкостей. При этом реакция на насыщение высококонцентрированным раствором соли слабая, а на добавление слабоконцентрированного водного раствора NaCl и керосина – сильная. Для растворов соли наблюдается высокая корреляция формы спектров электрического отклика сухих и увлажненных кернов – до 0,9. Для керосина же форма спектра сильно изменяется, коэффициент ранговой корреляции формы спектров равен 0,3. Факт значительного увеличения электрического отклика при добавлении в керн неполярной жидкости (керосина) выходит за рамки теоретических представлений и может быть связан именно с созданием сильной латеральной петрофизической неоднородности по насыщению. Сильная чувствительность амплитуды электросейсмического отклика горных пород к очень слабому, но неоднородному насыщению интересна для разработки дистанционных методов определения типа флюидонасыщения горной породы, при поиске полезных ископаемых и для развития методов прогноза геофизических катастроф.

Ключевые слова: физическое моделирование, сеймоэлектрический эффект, нефтенасыщенные горные породы, полярные и неполярные жидкости

Для цитирования:

Чеботарева И. Я., Камшилин А. Н. Экспериментальное изучение механоэлектрических преобразований при слабом насыщении горных пород // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 2. С. 45–53. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-45-53

© Чеботарева И. Я., Камшилин А. Н., 2019



Experimental study of mechanolectric transformations in low saturated rocks

I. Ya. Chebotareva¹, A. N. Kamshilin²

¹ Oil and gas research institute RAS, Moscow, Russia

² Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia

The results of study of the electrical response of dry and slightly saturated with salted water (NaCl) or kerosene cores of Berea sandstone to acoustic effect in the frequency range of 0.5–10 kHz are presented herein. A strong lateral inhomogeneity by saturation was created during the experiments. The electrical response is sensitive to the addition of all types of fluid in the rock samples. At the same time, the reaction to the addition of highly concentrated salt solution in the samples is weak, while the reaction to the addition of weak concentrated salt solution and kerosene is strong. A high correlation is observed between the shape of the electrical response spectra of dry and damped cores, up to 0.9. For kerosene, the shape of the spectrum varies greatly, the rank correlation coefficient of the shape of the spectra is 0.3. The fact of a significant increase in electrical response on addition of non-polar fluid (kerosene) to the core is beyond the theoretical framework and may be associated with the creation of strong lateral petrophysical heterogeneity by saturation. The strong sensitivity of the amplitude of the electroseismic response of rocks to very weak but non-homogeneous saturation is interesting for the development of remote methods for determination of the type of fluid saturation of rocks, when searching for minerals and for the development of the methods for prediction of geophysical catastrophes.

Keywords: physical modeling, seismoelectric effect, oil saturated rocks, polar and non-polar fluids

For citation:

Chebotareva I. Ya., Kamshilin A.N. Experimental study of mechanolectric transformations in low saturated rocks. Radiopromyshlennost, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 45–53 (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-45-53

Введение

В данной статье описано продолжение исследований, результаты которых были опубликованы в работе [1]. Приведены результаты анализа синхронных записей акустического и электрического полей в слабонасыщенных образцах горной породы при вибровоздействии линейно модулированным сигналом в диапазоне частот 0,5–10 кГц.

Факт возникновения электромагнитных сигналов, связанных с распространением акустических волн в флюидонасыщенных горных породах, был обнаружен А. Г. Ивановым [2]. Это явление получило название «сейсмоэлектрический эффект второго рода». Теория сейсмоэлектрического эффекта основана на работах Я. И. Френкеля [3], М. Био [4] и С. Прайда [5, 6]. Возникновение наведенного электрического потенциала объясняется механоэлектрическими преобразованиями энергии, возникающими при смещении проводящего флюида относительно твердого скелета пористых флюидонасыщенных пород. Теоретически напряженность индуцированного электрического поля прямо пропорциональна амплитуде акустического воздействия. Передаточная функция $W = E/u$ зависит от пористости породы, вязкости жидкости, ее проводимости и диэлектрической проницаемости, величины дзета-потенциала. Здесь E – напряженность электрического поля, u – величина смещения.

Через дзета-потенциал W зависит от концентрации порового электролита C , так что $W \sim 1/\sqrt{C}$ т.е. с ростом концентрации раствора электрический отклик на вибровоздействие достаточно быстро падает. Для зависимости W от частоты существуют разные оценки, от $W(f) \sim f^3$ до $W(f) \sim f^{-1/2}$ [3–10]. Экспериментальные результаты по физическому моделированию, например [11, 12], свидетельствуют о том, что электрический отклик на акустическое воздействие растет с увеличением частоты, влагонасыщенности и зависит от концентрации электролита. Существует концентрация электролита, при которой величина эффекта максимальна, а при больших и меньших концентрациях амплитуда косейсмического сигнала уменьшается [13]. Например, согласно экспериментальным графикам работы [11], для раствора поваренной соли при изменении концентрации от 2,9 до 29 г/л (от 0,05 до 0,5 моль/л) отношение E/u уменьшается в 20 раз. Насыщение порового пространства смесью полярной и неполярной жидкостей приводит к уменьшению передаточной функции с ростом доли неполярной жидкости [12]. На сухих породах, согласно теоретическим и экспериментальным данным, сейсмоэлектрический эффект отсутствует [12, 14, 15].

Необходимо отметить, что теоретический подход Френкеля–Прайда разработан для предельно насыщенных высокопроницаемых пористых сред,

малонасыщенные и слабопористые среды в ней не рассматриваются. Кроме того, существуют другие теоретические представления о возможных механизмах генерации электрического отклика при акустическом воздействии на горные породы. Это делает актуальным проведение исследований с целью получения эмпирической информации об особенностях механоэлектрических преобразований, в частности для малоувлажненных горных пород с сильной латеральной неоднородностью насыщения.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Ранее авторами была опубликована статья, которая является первой частью данных исследований [1]. В ней подробно описана установка для физического моделирования механоэлектрических эффектов, возникающих при вибровоздействии на керны горной породы. Установка с помощью переключения может попеременно работать в режимах вынужденных колебаний и автоколебаний. Также в статье [1] подробно описаны схема эксперимента и методика обработки экспериментального материала.

В опытах были использованы цилиндрические образцы керна высокопористого песчаника Berea Grey (США). Диаметр образцов составлял 30 мм, длина – 60 мм, пористость – 20%. Образцы были предварительно просушенены в течение 4 ч при температуре 110 °С и заключены в термоусадочную трубку для герметизации боковой поверхности. Во время каждого опыта у одного торца образца проводилось акустическое воздействие пьезовибратором, а у другого регистрировался акустический сигнал, прошедший через образец керна. Пьезовибратор излучал линейно-частотно модулированный сигнал (свип) в диапазоне частот 0,5–10 кГц. Синхронно с акустическим сигналом регистрировался электрический сигнал – электроды были прикреплены к торцам цилиндрического образца горной породы.

Серия экспериментов проводилась для жидкостей трех типов – слабоминерализованной и сильноминерализованной воды (полярные жидкости) и керосина (неполярная жидкость). В качестве минерализованной воды использованы водные растворы NaCl концентрации 0,05 и 0,5 моль/л. В ходе эксперимента для каждого изначально сухого керна проводился опыт с вибровоздействием свип-сигналом в режиме вынужденных колебаний. Во всех опытах на вход излучателя продольных акустических колебаний подавался постоянный по амплитуде сигнал от генератора ультразвуковых колебаний, частота которого ступенчато увеличивалась на заданную величину в заданном временном окне. После этого установка запускалась в режиме автоколебаний [1]

и некоторое время работала с контролем частоты колебаний. Затем пленка на боковой поверхности керна прокалывалась, и с помощью пипетки под пленку вводилось небольшое количество жидкости. Когда частота автоколебаний изменялась, это расценивалось как индикатор момента достаточно глубокого проникновения жидкости вглубь керна, что должно было отразиться на особенностях проявления сейсмоэлектрического эффекта. Количество увлажняющей жидкости не превышало 0,5 мл, что составляет 1,2% объема образца и 6% объема порового пространства керна.

Как показал предварительный анализ данных, записи волновых полей, сделанные при проведении экспериментов, кроме помех с постоянной или медленно меняющейся частотой, содержали гармоники, которые сравнимы по амплитуде с основной частотой. Чтобы очистить записи и получить зависимости амплитуды основной частоты отклика и ее гармоник от частоты акустического воздействия, экспериментальные записи подвергали дополнительной обработке. Методика обработки экспериментальных записей волновых полей подробно изложена в работе [1]. Она заключалась в следующем. По измеренным записям электрических и акустических сигналов рассчитывались их частотно-временные представления с помощью преобразования Фурье в скользящем временном окне. Затем выделялись ветви экстремумов основной частоты и ее наиболее интенсивные гармоники при помощи оригинального алгоритма [1] с ранжированием, который учитывал также случайные аппаратурные флуктуации шагов свип-сигнала по времени и частоте. В результате вместо временных зависимостей получались амплитудные зависимости от частоты воздействия для наборов гармоник акустических и электрических сигналов. Анализ экспериментальных записей показал, что в диапазон значений 40 дБ попадают основная гармоника акустического сигнала и основная и первая гармоники электрических сигналов. Они и подвергались дальнейшему анализу.

Согласно известным теоретическим и экспериментальным результатам для равномерно увлажненных кернов, частично изложенным во введении, можно было ожидать, что для сухого керна и керосина сейсмоэлектрический эффект обнаружен не будет; для сильноминерализованной воды эффект если и проявится, то очень слабо; а для слабоминерализованной воды электрический отклик будет наиболее интенсивным. Однако наши исследования показали, что при слабом и очень неоднородном насыщении кернов электрический отклик на вибровоздействие сильно отличается от такового в случае равномерного насыщения кернов.

На рис. 1 приведены графики зависимости амплитуды основной гармоники акустического сигнала от частоты воздействия для сухих кернов и с разным типом флюида. Помеховая обстановка позволяла надежно выделять на частотно-временных спектрах ветви экстремумов до амплитуд -40 дБ. Для акустического сигнала в этот диапазон попадает только первая гармоника. Для электрических сигналов амплитуды вторых гармоник значимы – они на части диапазона частот превышают -40 дБ, а на некоторых частотах даже сравнимы с амплитудой основной гармоники (рис. 2).

На основании сравнения спектров акустических сигналов для сухих кернов, показанных на рис. 1, можно заключить, что детали формы возбуждаемого в образце спектра весьма индивидуальны. Несмотря на то, что на вход генератора ультразвуковых колебаний подавался одинаковый по амплитуде сигнал, спектр колебательной скорости, зарегистрированный на другой стороне образца, проявляет тенденцию к увеличению амплитуды с ростом частоты. Он также осложнен набором локальных максимумов, которые различны для разных кернов. Такой характер спектров, как можно полагать, связан с особенностями строения порового пространства и наличием трещин в природном материале. Однако значения максимальных амплитуд для всех кернов примерно одинаковы, без ярких пиков, что позволяет проводить совместный анализ электрических откликов при таких спектрах вибровоздействий. При сравнении графиков, приведенных на рис. 1, видно, что после увлажнения кернов форма спектра акустического сигнала существенно не изменяется.

На рис. 2 и 3 представлены графики амплитуды первой и второй гармоник электрического сигнала для сухих и насыщенных флюидами разных типов кернов. Электрический отклик на вибровоздействие наблюдается для всех сухих кернов, однако теоретически он должен отсутствовать. По-видимому, его существование объясняется наличием остаточной воды в кернах. Хотя керны, как упоминалось ранее, просушивались в течение 4 ч при высокой температуре и боковая поверхность покрывалась пленкой, вода могла остаться внутри изолированных пор и в виде влажных пленок на поверхности пор и трещин. Также с теоретическими представлениями контрастирует факт наличия интенсивных вторых гармоник, что свидетельствует о нелинейном характере электромеханической связи, в то время как теория предсказывает линейную связь. Появление вторых гармоник наблюдалось и ранее другими авторами [8, 16] в экспериментах с наложением дополнительного электрического поля перпендикулярно направлению вибровоздействия. Однако в нашем случае электрическое поле дополнительно не накладывалось и наблюдаются одновременно как вторая, так и первая гармоники. Первая гармоника преобладает по амплитуде на всех частотах, но вторая сравнима с ней в низкочастотном диапазоне.

Рисунок 3 позволяет сравнить изменение амплитуд и форм спектров электрического отклика на вибровоздействие для сухих и увлажненных кернов. Статистические оценки, численно характеризующие эти различия, приведены в таблице. Спектры электрического отклика носят резонансный, осциллирующий характер. Однако распределение

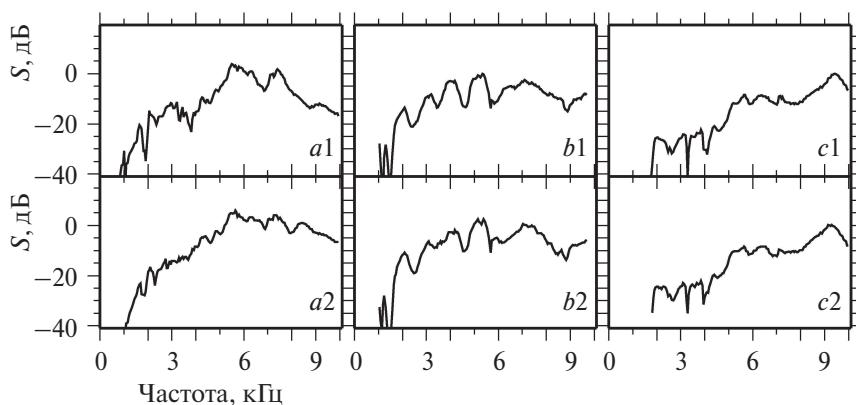


Рисунок 1. Зависимость амплитуд акустического сигнала (скорости смещения) от частоты вибровоздействия: a1, b1, c1 – графики для сухого керна; a2, b2, c2 – графики для тех же кернов после добавления керосина, слабоминерализованной и сильноминерализованной воды соответственно. Нормировка по максимальному сигналу для сухого керна
Figure 1. The dependence of the amplitudes of the acoustic signal (displacement velocity) on the frequency of vibration effect: a1, b1, c1 – graphs for dry core; a2, b2, c2 – graphs for the same cores after adding kerosene, low-mineralized and highly mineralized water, respectively. Normalization is performed by the maximum signal for dry core

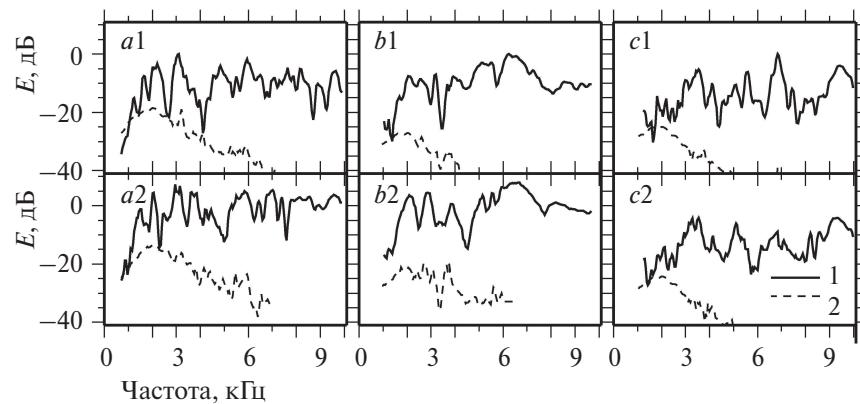


Рисунок 2. Зависимость амплитуд электрического сигнала от частоты вибровоздействия: a_1, b_1, c_1 – графики для сухого керна; a_2, b_2, c_2 – графики для тех же кернов после добавления керосина, слабоминерализованной и сильноминерализованной воды соответственно. Нормировка по максимальному сигналу для сухого керна, 1 – первая и 2 – вторая гармоники электрического сигнала

Figure 2. The dependence of the amplitudes of the electrical signal on the frequency of vibration effect: a_1, b_1, c_1 – graphs for dry core; a_2, b_2, c_2 – graphs for the same cores after adding kerosene, low-mineralized and highly mineralized water, respectively. Normalization is performed by the maximum signal for dry core, 1 – the first and 2 – the second harmonics of the electric signal

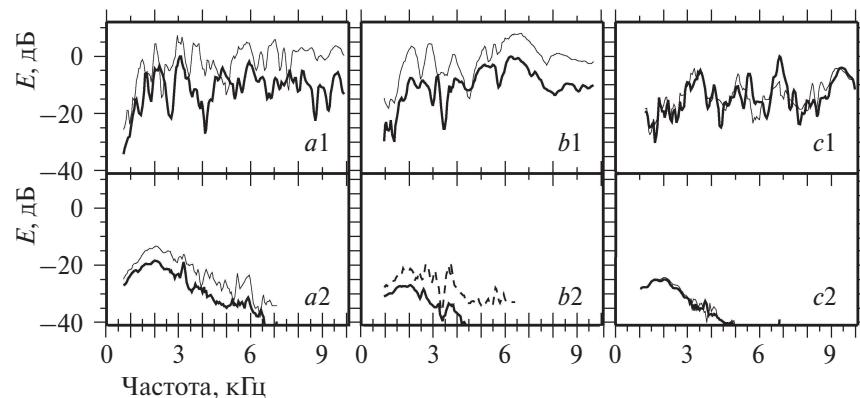


Рисунок 3. Сравнение амплитуд электрического сигнала для сухого и насыщенного керна в зависимости от частоты вибровоздействия: a_1, b_1, c_1 – графики первой гармоники; a_2, b_2, c_2 – второй гармоники при насыщении кернов керосином, слабоминерализованной и сильноминерализованной водой соответственно. Толстая линия – графики для сухого керна, тонкая линия – графики для насыщенного керна. Нормировка по максимальному сигналу первой гармоники для сухого керна

Figure 3. Comparison of the amplitudes of the electrical signal for dry and saturated core depending on the frequency of vibration: a_1, b_1, c_1 – graphs of the first harmonic; a_2, b_2, c_2 – of the second harmonic with saturation of the cores with kerosene, low-mineralized and highly mineralized water, respectively. Thick line – the graph for the dry core, thin line – the graph for the saturated core. Normalization is performed by the maximum signal of the first harmonic for dry core

спектральных значений не является нормальным (распределением Гаусса). Поэтому в качестве статистических оценок следует использовать не выборочные моменты нормального распределения (среднее, дисперсия), а более робастные оценки. В данной статье в качестве оценки приращения среднего уровня электрического отклика используется медианное среднее по всему частотному

диапазону. В качестве оценки схожести формы спектров используется коэффициент ранговой корреляции Спирмена

$$r_s = \frac{\sum_i (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_i (R_i - \bar{R})^2(S_i - \bar{S})^2}},$$

где R_i и S_i – сравниваемые последовательности X_i и Y_i соответственно, ранжированные

по уменьшению значений. Коэффициент ранговой корреляции является робастной оценкой схожести числовых рядов, который не зависит от их статистического распределения. Для сравнения в таблице приведены также значения и наиболее популярного линейного коэффициента корреляции, использование которого корректно только для последовательностей с нормальной статистикой:

$$r = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i (X_i - \bar{X})^2(Y_i - \bar{Y})^2}}.$$

Значения линейных коэффициентов корреляции в нашем случае оказываются несколько завышенными. Использование коэффициента ранговой корреляции Спирмена является математически более корректным и дает более правильную количественную оценку степени схожести кривых.

Из графиков *c1* и *c2* (см. рис. 3) видно, что после внедрения в керн сильноминерализованной воды электрический отклик на вибровоздействие для первой и второй гармоник почти не изменяется, что вполне согласуется с теоретическими представлениями. Для электролита с большой концентрацией NaCl влияние на изменение электрического отклика незначительно, так как при внедрении в породу он создает экранирующий эффект поверхностных зарядов твердой фазы и уменьшает значение потенциала двойного слоя. Однако на частотах около 6–7 кГц небольшие изменения в форме спектра все же наблюдаются. Коэффициент ранговой корреляции для спектров электрического отклика равен 0,7 при оценке по всему частотному диапазону и 0,9 – при исключении диапазона вблизи 6–7 кГц, уровень значимости 99%.

Для слабоминерализованной воды (*b1* и *b2*, см. рис. 3), в соответствии с теоретическими ожиданиями, происходит значительное увеличение амплитуды электрического отклика. В среднем по всему спектру амплитуда основной гармоники

увеличивается на 9 дБ. Амплитуда второй гармоники увеличивается более чем на 5 дБ. Форма спектра основной гармоники электрического сигнала после увлажнения керна хорошо сохраняется схожесть с формой соответствующего спектра сухого керна, небольшой провал значений наблюдается только в центральной части частотного диапазона. Увеличение амплитуды отклика при сохранении формы его спектра подтверждает предположение о том, что существование электрического отклика сухих кернов связано с наличием в них остаточной воды. Коэффициент ранговой корреляции для спектров электрического отклика равен 0,7 при оценке по всему частотному диапазону и 0,8 – при исключении диапазона провала амплитуд в центральной части диапазона исследований, уровень значимости 99%.

Сильное увеличение электрического отклика при введении в керн керосина совершенно расходится с теоретическими ожиданиями (*a1* и *a2*, см. рис. 3). Среднее по всему частотному диапазону увеличение отклика для основной гармоники даже больше, чем для слабоминерализованной воды, и составляет около 10 дБ. Форма спектра электрического отклика после введения керосина полностью изменяется. Коэффициент ранговой корреляции спектров для сухого и насыщенного керна равен 0,3. Уровень значимости 99%. Для керосина размах вариаций разности амплитуд спектров сухого и увлажненного составляет 30 дБ, что существенно превышает размах значений амплитуд для обеих концентраций электролита. Можно предполагать, что обнаруженный эффект связан именно с сильной неоднородностью распределения жидкости по объему керна и, возможно, с образованием водных пленок на контакте двух жидкостей [17]. Известно, что если по нормали к торцу равномерно увлажненного цилиндрического керна действует периодическое давление, то оно

Таблица. Результаты экспериментов

Table. Experimental results

Расчетная статистика / Calculated Statistics	Керосин / Kerosene	NaCl, 0,05 моль/л / NaCl, 0,05 mol/l	NaCl, 0,5 моль/л / NaCl, 0,5 mol/l
Медианное среднее приращения спектра по всему частотному диапазону, дБ, $M = \text{median}(\Delta E_f)$	10	9	1,2
Линейный коэффициент корреляции сухих и насыщенных спектров по всему частотному диапазону, r	0,5	0,8	0,8
Коэффициент ранговой корреляции Спирмена по всему частотному диапазону, rs	0,3	0,7	0,7
Коэффициент ранговой корреляции Спирмена в основном диапазоне частот (вне аномального диапазона), rs	0,3	0,8	0,9

возбуждает продольную акустическую гармоническую волну, распространяющуюся в направлении оси, и периодическое электрическое поле с поляризацией в том же направлении. Магнитное поле при этом не возбуждается. Однако если имеются латеральные неоднородности, например границы разного типа насыщения (керосин–вода–воздух), то возникают магнитное поле и ортогональные компоненты электрического поля [18]. Объем жидкости, который использован в эксперименте, создает сильную латеральную неоднородность. При радиальном проникновении из точки прокола пленки радиус заполненной керосином зоны составит лишь около трети радиуса керна. Эта латеральная неоднородность ответственна за возникновение при вибровоздействии магнитного и ортогональных составляющих электрического поля. Подобные условия, как экспериментально установлено [8, 16], усиливают сейсмоэлектрический отклик и способствуют образованию высших гармоник. Хотя, надо заметить, с теоретической точки зрения механизм этих эффектов пока недостаточно ясен.

Выводы

1. Наши исследования выявили, что электрический отклик горных пород на вибровоздействие при слабом насыщении флюидом может существенно отличаться от теоретических ожиданий. Теория сейсмоэлектрического эффекта разработана для предельно насыщенных пород с однородным по поровому пространству насыщением. Неоднородность по насыщению не только полярной, но и неполярной жидкости приводит к сильному возрастанию электрического отклика, среднее превышение

которого относительно условно сухого керна может достигать 10 дБ.

2. При неоднородном слабом насыщении горных пород водными растворами разной концентрации форма спектра электрического отклика сохраняет подобие со спектром условно сухих кернов с коэффициентом ранговой корреляции 0,8–0,9. Это подтверждает предположение о том, что наличие электрического отклика сухих кернов на вибровоздействие связано с наличием остаточной воды. При добавлении такого же количества керосина форма спектра резко изменяется, коэффициент корреляции равен 0,3. Такие резкие различия перспективны для развития новых геофизических технологий.

3. Акустический и электрический отклики на вибровоздействие одной и той же мощности существенно различаются для различных кернов горных пород и зависят от индивидуальных особенностей их внутренней структуры. С одной стороны, этот факт позволяет надеяться на возможность совершенствования методов дистанционной оценки петрофизических параметров пород с использованием сейсмоэлектрического эффекта второго рода, но с другой стороны, он свидетельствует о необходимости изучения особенностей механоэлектрических преобразований на образцах из композитных материалов со стабильной заданной внутренней структурой.

4. Сильная чувствительность амплитуды электросейсмического отклика горных пород к слабому увлажнению интересна с точки зрения разработки дистанционных методов определения типа флюидонасыщения горной породы при поиске полезных ископаемых и развития методов прогноза геофизических катастроф.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Статья написана в рамках выполнения государственного задания на 2019 г.

ACKNOWLEDGMENT

This work was implemented within the framework of State Contract for 2019.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Чеботарева И. Я., Камшилин А. Н. Исследование механоэлектрических преобразований в горных породах с малой степенью флюидонасыщения // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 18–26. DOI 10.21778/2413-9599-2018-1-18-26.
- Иванов А. Г. Эффект электризации пластов земли при прохождении через них упругих волн // Доклады АН СССР. 1939. Т. 24, № 1. С. 41–43.
- Френкель Я. И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // Известия АН СССР. Сер. географическая и геофизическая. 1944. Т. 8, № 4. С. 134–149.
- Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, vol. 28, pp. 168–186.
- Pride S. R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. Physical Review, 1994, vol. 50, pp. 15678–15696.
- Pride S. R., Haartsen M. W. Electroseismic wave properties. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, vol. 100, pp. 1301–1315.
- Joumania L., Zyserman F. A review on electrokinetically induced seismo-electrics, electro-seismics, and seismo-magnetics for Earth sciences. Solid Earth, 2016, no. 7, pp. 249–284.

8. Черняк Г.Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М: Недра, 1987. 214 с.
9. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 656 с.
10. Светов Б.С., Губатенко В.П. Электромагнитное поле механо-электрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах. I. Постановка задачи // Физика Земли. 1999. № 10. С. 67–73.
11. Сейсмоэлектрический эффект второго рода в горных породах / Агеева О.А., Светов Б.С., Шерман Г.Х., Шипулин С.В. // Геология и геофизика. 1999. Т. 4, № 8. С. 1251–1257.
12. Агеева О.А. Использование сейсмоэлектрических преобразований в породах для прогнозирования характера насыщения порового пространства // Геофизика. 2008. № 1. С. 16–21.
13. Chen B., Mu Y. Experimental studies of seismoelectric effects in fluid-saturated porous media. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2005, vol. 2, no. 3, pp. 222–230.
14. Анциферов М.С. Лабораторное воспроизведение сейсмоэлектрического эффекта второго рода // Доклады АН СССР. 1958. Т. 121, № 5. С. 827–829.
15. Пархоменко Э.И., Гаскаров И.В. Скважинные и лабораторные исследования сейсмоэлектрического эффекта второго рода в горных породах // Физика Земли. 1971. № 9. С. 88–92.
16. Зейгарник В.А., Ключкин В.Н. Физическое моделирование электросейсмического эффекта в горных породах. Триггерные эффекты в геосистемах // Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания, Москва, 16–19 июня 2015 г. М.: GEOS, 2015. С. 252–258.
17. Доровский С.В., Доровский В.Н., Блохин А.М. О возможностях электроразведки при исследовании устойчивости водонефтяных слоистых систем // Геология и геофизика. 2006. № 11. С. 1185–1191.
18. Математическое моделирование сейсмоэлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах / И.Г. Московский, О.М. Балабан, О.С. Федорова, А.В. Кочетков // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7, № 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN115.pdf> (дата обращения: 27.03.2019).

REFERENCES

1. Chebotareva I. Ya., Kamshilin A. N. Research of mechanoelectric transformations in rock with a small degree of fluid saturation. *Radiopromyshlennost*, 2018, no. 1, pp. 18–26 (In Russian). DOI 10.21778/2413-9599-2018-1-18-26
2. Ivanov A. G. Effect of earth strata elecritisation by electric waves passing through them. *Doklady AN SSSR*, 1939, no. 1, pp. 41–43. (In Russian).
3. Frenkel Ya. I. To the theory of seismic and seismoelectric phenomena in moist soil. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya*, 1944, vol. 8, no. 4, pp. 134–149. (In Russian).
4. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, vol. 28, pp. 168–186.
5. Pride S. R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. *Physical Review*, 1994, vol. 50, pp. 15678–15696.
6. Pride S. R., Haartsen M. W. Electroseismic wave properties. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, vol. 100, pp. 1301–1315.
7. Jouniaux L., Zyserman F. A review on electrokinetically induced seismo-electrics, electro-seismics, and seismo-magnetics for Earth sciences. *Solid Earth*, 2016, no. 7, pp. 249–284.
8. Chernyak G. Ya. *Jelektromagnitnye metody v gidrogeologii i inzhenernoj geologii* [Electromagnetic methods in hydrogeology and engineering geology]. Moscow, Nedra Publ., 1987, 214 p. (In Russian).
9. Svetov B. S. *Osnovy geojelektriki* [Fundamentals of geoelectrics]. Moscow, Izdatelstvo LKI Publ., 2008, 656 p. (In Russian).
10. Svetov B. S., Gubatenko V. P. Electromagnetic field of mechanoelectric origin in porous moisture-saturated rocks. Objective setting. *Fizika Zemli*, 1999, no. 1, pp. 67–73. (In Russian).
11. Ageevo O. A., Svetov B. S., Sherman G. Kh., Shipulin S. V. Seismoelectric effect of the second kind in rocks. *Geology and geophysics*, 1999, vol. 4, no. 8, pp. 1251–1257. (In Russian).
12. Ageevo O. A. Use of seismoelectric transformations in rocks to predict the nature of saturation of pore space. *Geofizika*, 2008, no. 1, pp. 16–21 (In Russian).
13. Chen B., Mu Y. Experimental studies of seismoelectric effects in fluid-saturated porous media. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2005, vol. 2, no. 3, pp. 222–230.
14. Antsiferov M. S. Laboratory reproduction of a second-kind seismo-electric effect. *Doklady AN SSSR*, 1958, vol. 121, no. 5, pp. 827–829. (In Russian).
15. Parkhomenko E. I., Gaskarov I. V. Well and laboratory studies of the second-kind seismoelectric effect in rocks. *Fizika Zemli*, 1971, no. 9, pp. 88–92. (In Russian).
16. Zeygarnik V. A., Klyuchkin V. N. Fizicheskoe modelirovanie elektroseismicheskogo effekta v gornykh porodakh. Triggernye effekty v geosistemakh. *Materialy tretego Vserossiyskogo seminara-soveshhaniya*, Москва, 16–19 июня 2015 [Physical modeling of the electroseismic effect in rocks. Trigger Effects in Geosystems // Proceedings of the Third All-Russian Seminar-Meeting, Moscow, June 16–19, 2015]. Moscow, GEOS Publ., 2015, pp. 252–258 (In Russian).
17. Dorovsky S. V., Dorovsky V. N., Blokhin A. M. On the possibilities of electrical exploration in the study of the stability of water-oil layered systems. *Geology and Geophysics*, 2006, no. 11, pp. 1185–1191. (In Russian).
18. Moskovsky I. G., Balaban O. M., Fedorova O. S., Kochetkov A. V. Mathematical modeling of the second kind of seismoelectric effect generated by plane elastic waves in porous moisture saturated media. *Internet-journal «Naukovedenie»*, 2015, vol. 7, no. 1. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN115.pdf> (accessed 27.03.2019).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чеботарева Ирина Яковлевна, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3, тел.: +7 (917) 585-81-13, e-mail: irinache@inbox.ru.

Камшилин Анатолий Николаевич, канд.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли РАН, 123242, Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, стр. 1, тел.: +7 (963) 615-28-81, e-mail: kamshilin@ifz.ru.

AUTHORS

Irina Ya. Chebotareva, Dr. Sci. (Physical and Mathematical), chief scientific researcher, Oil and Gas Research Institute RAS, 3, ulitsa Gubkina, Moscow, 119333, Russia, tel.: +7 (917) 585-81-13, e-mail: irinache@inbox.ru.

Anatoly N. Kamshilin, Ph. D. (Physical and Mathematical), leading scientific employee, Institute of Physics of the Earth RAS, 10–1, ulitsa Bolshaya Gruzinskaya, Moscow, 123242, Russia, tel.: +7 (963) 615-28-81, e-mail: kamshilin@ifz.ru.

Поступила 19.02.2019; принята к публикации 20.03.2019; опубликована онлайн 27.05.2019.
Submitted 19.02.2019; revised 20.03.2019; published online 27.05.2019.

DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-54-61

УДК 681.5

Оценка точности разомкнутого линейного привода, достижимой методом калибровки и компенсации линейного теплового расширения

Н. С. Слободзян¹

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

Исследования являются частью актуальных работ по проектированию и созданию прецизионного механизма с параллельной кинематикой типа гексапода космического назначения. Точность и повторяемость позиционирования подвижной платформы механизма относительно его неподвижного основания в рассматриваемой конструкции зависят от точности исполнительных элементов гексапода – линейных приводов (ЛП). Целью работы является оценка достижимой точности работы ЛП с учетом основных факторов, влияющих на точность перемещения его штока. В статье описаны исследования точности работы разомкнутого ЛП, не имеющего общей обратной связи по выходной координате. Выделяются основные факторы, влияющие на точность перемещения. Приводятся экспериментально полученные оценки ошибок перемещения штока ЛП. Предложена методика повышения точности работы ЛП путем программной калибровки его шарико-винтовой передачи и компенсации линейного теплового расширения (ЛТР) при работе привода в широком диапазоне температур. Получена оценка точности перемещения штока калиброванного ЛП с компенсацией ЛТР.

Ключевые слова: платформа Гью–Стюарта, гексапод, линейный привод, калибровка, компенсация, тепловое расширение

Для цитирования:

Слободзян Н. С. Оценка точности разомкнутого линейного привода, достижимой методом калибровки и компенсации линейного теплового расширения // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 2. С. 54–61. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-54-61

© Слободзян Н. С., 2019



Evaluation of open-loop linear drive accuracy achieved by calibration and linear thermal expansion compensation

N. S. Slobodzyan¹

¹ Baltic State Technical University «VOENMEH»

The study is a part of the current work on the design and creation of a precision mechanism with parallel kinematics such as a space hexapod. The positioning accuracy and repeatability of the movable platform of the machine relative to its fixed base in the structure under consideration depends on the accuracy of the actuating elements of the hexapod – linear drives. The aim of the work is to assess the achievable accuracy of the linear drive, taking into account the main factors affecting the accuracy of its rod movement. The article describes the studies of the accuracy of the open-loop linear drive, which has no common feedback on the output coordinate. The main factors affecting the accuracy of movement are highlighted. The experimentally obtained estimates of the linear drive rod displacement errors are given. A technique is proposed for improving the linear drive accuracy by programmatically calibrating its ball screw drive and compensating for linear thermal expansion (LTE) when the drive is operating in a wide temperature range. An estimate of the calibrated linear drive rod movement accuracy with LTE compensation has been obtained.

Keywords: Gough–Stewart platform, hexapod, linear actuator, calibration, compensation, thermal expansion

For citation:

Slobodzyan N. S. Evaluation of open-loop linear drive accuracy achieved by calibration and linear thermal expansion compensation. Radiopromyshlennost, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 54–61 (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-54-61

Введение

В настоящее время для решения задач наведения и ориентации объектов различного назначения широко используются механизмы с параллельной структурой (МПС). Особо актуальна задача применения механизмов с параллельной структурой в космической технике. Так, в [1, 2] рассматривается возможность создания манипулятора на базе МПС для обеспечения навигационных задач орбитальной астрофизической обсерватории «Миллиметрон».

Перспективным представляется применение МПС в задачах наведения и ориентации прецизионных бортовых приборов космических аппаратов (КА), а также их стабилизации и виброзоляции [3]. В настоящей работе рассматривается механизм высокоточного наведения антенны типа платформы Гью–Стюарта [4], называемый также гексаподом.

Гексапод позволяет обеспечить перемещение объекта, расположенного на его подвижной платформе, по шести степеням свободы (три поступательных и три вращательных), что достигается благодаря наличию шести независимых по управлению линейных приводов, соединяющих с помощью шарниров неподвижное основание и подвижную платформу [5]. Линейный привод (ЛП) состоит из двух полуштанг, одна из которых может перемещаться линейно относительно другой. Подвижную часть ЛП называют штоком.

Один из вариантов управления положением и ориентацией объекта – решение обратной задачи кинематики (ОЗК) гексапода, когда по шести заданным пространственным координатам подвижной платформы вычисляются шесть линейных координат приводов, которые каждый из ЛП отрабатывает независимо [5].

Точность перемещения объекта при независимом управлении ЛП зависит как от погрешностей изготовления МПС, так и от правильного учета всех кинематических параметров, вводимых в систему управления механизмом для решения ОЗК. В первую очередь на точность перемещения выходного звена – подвижной платформы с объектом – влияет точность работы линейных приводов. Совокупность требований к точности поступательного и вращательного движения платформы в десятки микрометров и десятки угловых секунд соответственно приводит к необходимости перемещения штоков линейных приводов с точностью до единиц микрометров при диапазоне перемещения до 200 мм [6].

Для достижения наибольшей точности системы управления приводов необходимо замыкать контур управления ЛП обратной связью по выходной координате – линейному положению его штока. Применение существующих датчиков линейного положения позволяет достигать высоких точностей перемещения нагрузки. Однако экстремальные условия внешней среды, в которых функционирует

аппаратура космического аппарата, накладывают ряд ограничений на используемую компонентную базу. Прежде всего, к датчикам предъявляются жесткие эксплуатационные требования стойкости к ионизирующему излучению, вакууму, широкому диапазону температур, а также надежности. Кроме того, космический аппарат и его полезная нагрузка должны иметь минимальную массу в целях снижения затрат на выведение полезной нагрузки ракетой-носителем. Так, в качестве линейных датчиков положения могут использоваться датчики различного принципа действия. Потенциометрические датчики обеспечивают простой съем информации системой управления ЛП (обычно используется аналого-цифровое преобразование), но имеют и существенный недостаток – низкие точность и надежность. Индуктивные и емкостные датчики наряду с высокой надежностью, а также стойкостью к внешним факторам имеют низкую точность. Интерферометрические датчики позволяют измерить положение с точностью в доли микрометров, но имеют сложную структуру с дорогостоящими комплектующими и специализированной оптико-электронной системой обработки информации.

Указанные особенности накладывают ряд ограничений на построение линейного привода. Задача настоящей работы – оценка точности перемещения штока линейного привода без обратной связи по выходной координате и определение основных положений методики повышения его точности.

Структура линейного привода

Исполнительную часть ЛП составляют электродвигатель (ЭД) линейного или углового перемещения, редуктор, а также механическая передача. Электродвигатель углового перемещения в настоящее время наиболее распространен, имеется широкая номенклатура двигателей космического исполнения. В ЛП с ЭД углового перемещения ротора используют линейную передачу: передачу винт-гайка, ролико-винтовую передачу, шарико-винтовую передачу (ШВП), упругую систему перемещения и др. [7–9]. При этом достаточно отработанным

и надежным техническим решением для позиционных ЛП является применение связки шаговый ЭД–редуктор–ШВП.

В рассматриваемом ЛП используются косвенный датчик измерения положения (датчик углового положения вала ЭД типа вращающегося трансформатора), позволяющий построить недорогую и надежную систему, способную работать в условиях космического пространства. На рис. 1 приведена структура линейного привода.

Механическая часть ЛП включает в себя исполнительный двигатель, редуктор, шарико-винтовую передачу, а также шток, закрепляемый на подвижном элементе ШВП. К системе управления ЛП относятся микропроцессорный модуль управления, усилитель мощности, датчики температуры ЛП, датчик углового положения (ДУП) вала двигателя, а также концевые датчики положения штока.

Система управления ЛП работает по командам системы управления верхнего уровня, решающей ОЗК и задающей для всех шести ЛП необходимые линейные положения. Модуль управления ЛП в соответствии с сигналами датчиков и заданным положением формирует широтно-импульсно-модулированные сигналы управления и через усилитель мощности подает их на обмотки двигателя.

Применяемый ДУП обеспечивает местную обратную связь, формируя информацию об угловом положении вала в пределах одного оборота. Теоретическая функция связи входного и выходного сигналов, т.е. углового положения вала двигателя γ (рад) и линейного положения штока ЛП l (мм) выглядит следующим образом:

$$l(\gamma) = \frac{s(2\pi n + \gamma)}{k}, \quad (1)$$

где s – шаг ШВП, мм/рад; n – количество оборотов вала двигателя, k – передаточный коэффициент редуктора. Количество оборотов вала n , а также абсолютное линейное положение l определяются модулем управления после включения ЛП и позиционирования в нулевом положении по сигналам концевых датчиков. Следует отметить, что применение

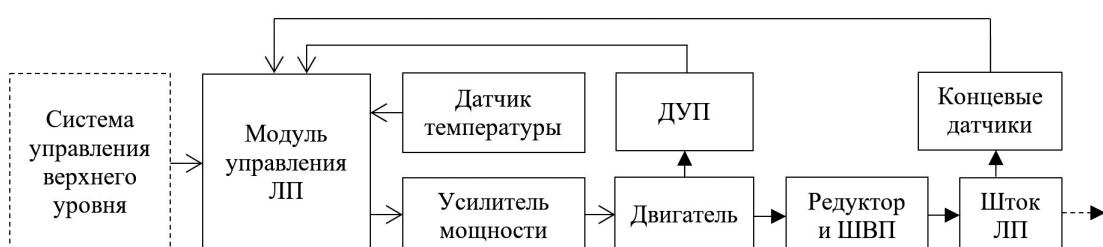


Рисунок 1. Структурная схема линейного привода
Figure 1. Block diagram of linear drive

шагового двигателя (ШД) в качестве приводного позволяет обеспечить угловое перемещение вала γ не только с дискретностью шага ШД, но и с меньшей дискретностью путем построения вентильного привода на его основе [10].

Основные факторы, влияющие на точность линейного привода

Для оценки точности линейного привода (перемещения его штока) были проведены исследования экспериментального образца линейного привода гексапода, разработанного и изготовленного в рамках НИОКРП.

Рассматриваемый линейный привод построен на базе шарико-винтовой передачи с шагом $s = 4$ мм пятого класса точности (максимальная погрешность типовой длины хода 20 мкм). Шарико-винтовая передача имеет предварительный натяг и обеспечивает отсутствие люфта. Осевая жесткость ЛП составляет 200 Н/мкм.

Были проведены измерения линейного положения штока ЛП, закрепленного на ходовой гайке ШВП, в зависимости от заданного углового положения винта передачи. В качестве нагрузки к штоку ЛП через блок и нерастяжимый шнур подвешен груз массой 1 кг.

Для контроля ошибок линейного положения штока в исследованиях использовался абсолютный фотоэлектрический датчик линейного положения типа ЛИР-ДА7 с дискретностью измерения 0,1 мкм и величиной абсолютной погрешности до $\pm 0,6$ мкм. Фиксация результатов измерений проводилась в статическом режиме после завершения переходных процессов в электромеханической системе ЛП (0,5 с).

Согласно [7, 11–13], наибольшее влияние на точность перемещения штока линейного привода при постоянной статической нагрузке оказывают собственные характеристики механической

передачи (ШВП), связанные с погрешностями ее изготовления.

На рис. 2 приведены графики ошибок линейного положения штока в зависимости от его перемещения при двукратном проходе штока в одном направлении в диапазоне от 0 до 200 мм (сплошная и пунктируя линии соответственно) при одной и той же температуре ЛП $t = 20$ °C.

Ошибку в точности перемещения вносят также изменение температуры ШВП и других элементов механической передачи и связанное с ним линейное тепловое расширение [14–17]. Для оценки влияния температуры на точность работы ЛП были проведены исследования при разных условиях.

На рис. 3 приведены графики ошибок линейного положения штока в зависимости от температуры ЛП. При изменении температуры на 2 °C ошибка перемещения штока увеличивается на 5 мкм, а ее абсолютное значение доходит до 14 мкм при $t = 22$ °C.

Таким образом, для обеспечения высокой точности перемещения штока необходим учет двух составляющих: собственной характеристики ШВП и линейного температурного расширения механической передачи ЛП. Рассмотрим на примере численных расчетов возможность повышения точности разомкнутого линейного привода.

Повышение точности линейного привода

Приведенная на рис. 2 форма кривой ошибок является типовой для ШВП [18], и из графика видно, что повторяемость точности перемещения штока обеспечивается с максимальной ошибкой 0,4 мкм. При этом возможно выполнение калибровки ЛП по следующей методике: выполняется измерение фактического линейного положения штока для всего рабочего диапазона при фиксированном значении температуры ЛП с требуемой дискретностью, вычисляются ошибки перемещения штока и формируется дискретный массив значений – поправок.

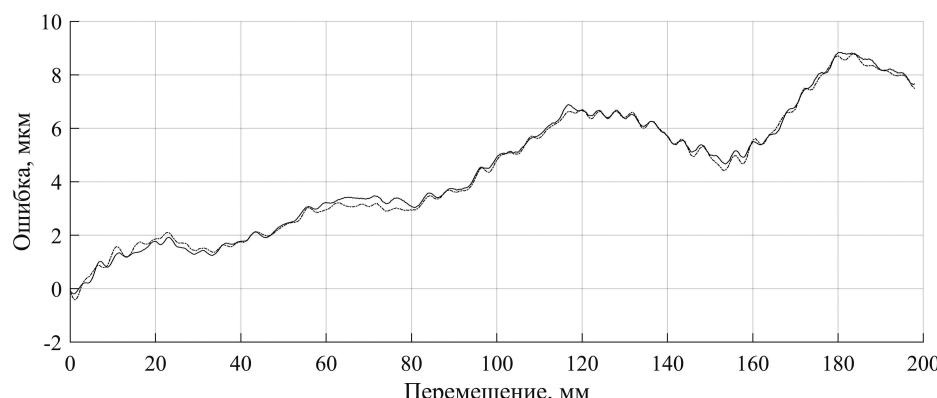


Рисунок 2. Графики ошибок линейного положения штока в зависимости от его перемещения
Figure 2. Graphs of rod linear position errors depending on its movement

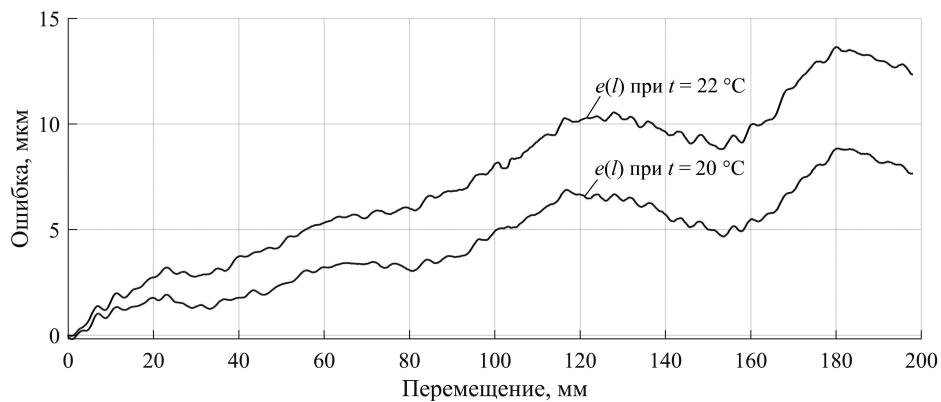


Рисунок 3. Графики ошибок линейного положения штока при различных температурах линейного привода

Figure 3. Graphs of rod linear position errors at different linear drive temperatures

Поправки записываются в память микропроцессорного модуля управления ЛП либо системы управления верхнего уровня [19, 20] и в дальнейшем учиты-ваются при линейном перемещении.

На рис. 4 приведен теоретический график ошибки линейного положения штока для собствен-ной характеристики ШВП (см. рис. 2, пунктирная линия) с учетом поправочных значений, получен-ных по характеристике (см. рис. 2, сплошная линия). Ошибки обусловлены повторяемостью соб-ственной характеристики ШВП.

Для компенсации линейного теплового расшире-ния ЛП (см. рис. 3) после получения поправок по опи-санной выше методике калибровки необходимы до-полнительные поправки с учетом температуры ЛП, измеряемой с помощью соответствующего датчика (см. рис. 1). Известно, что коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) α для тела длиной L описывается формулой

$$\alpha(T) = \frac{\Delta L}{L \Delta T}, \quad (2)$$

где ΔL – удлинение тела; ΔT – изменение темпе-ратуры. Тогда для расчета дополнительной поправки к положению (ΔL со знаком «минус») требуется лишь учить КЛТР материала пары винт–гайка. Для стали можно усредненно принять $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

На рис. 5 приведен теоретический график ошибки линейного положения штока при $t = 22 ^\circ C$ (см. рис. 3) с учетом поправочных значений, полу-ченных по собственной характеристике ШВП (см. рис. 2, сплошная линия), а также компенсации линейного температурного расширения ($\Delta T = 2 ^\circ C$). Как видно из графика, максимальное значение ошибки не превышает 1,1 мкм.

Выводы

В ходе работы выполнена предварительная оценка точности линейного перемещения штока ЛП без обратной связи по выходной координате. Результаты исследований позволяют рекомендо-вать к применению методику предварительной калибровки ЛП и учета его температуры в целях

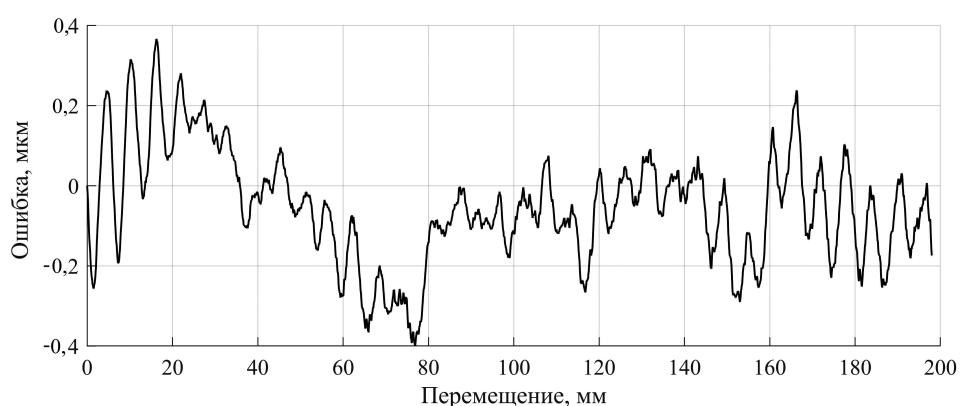


Рисунок 4. График теоретической ошибки линейного положения штока после калибровки
Figure 4. Graph of the rod linear position theoretical error after calibration

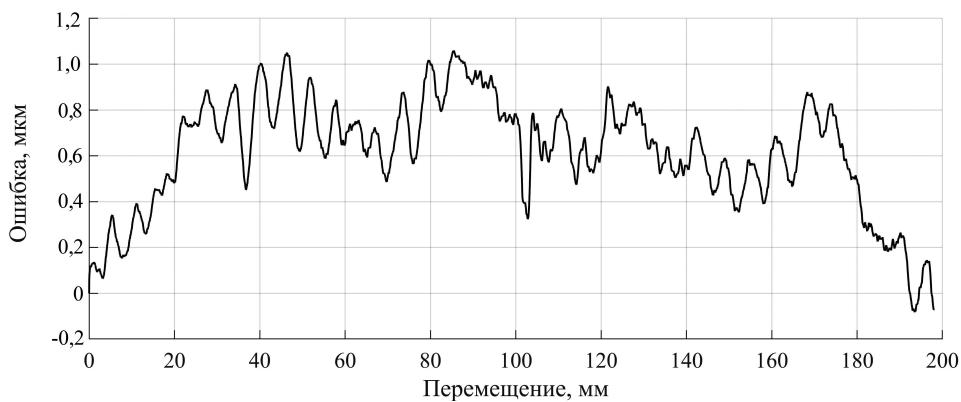


Рисунок 5. График теоретической ошибки линейного положения штока после калибровки компенсации линейного температурного расширения

Figure 5. Graph of the rod linear position theoretical error after linear temperature expansion compensation calibration

повышения точности ЛП и гексапода на его основе.

Необходимо отметить, что в рамках дальнейшего развития работы необходимы определение оптимальных поправочных значений для калибровки ЛП, проведение исследований при более

широком диапазоне температур в целях уточнения КЛТР механической передачи ЛП, диапазона линейности ее теплового расширения и влияния неоднородности тепловой картины, а также учет влияния осевой жесткости ШВП на точность линейного перемещения штока ЛП в зависимости от нагрузки.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Настоящая работа проведена в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218. НИОКТР выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор от 01.12.2015 № 02.G25.31.0160). Работа выполнена в организации Головного исполнителя НИОКТР ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

ACKNOWLEDGMENT

This work was carried out in accordance with the decree of the Government of the Russian Federation dated 09.04.2010 No. 218. Research, development and technological work is carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (contract dated 01.12.2015 No. 02.G25.31.0160). The work was carried out in the organization of the Chief Executive Officer of the Research and Design Institute of FSBI of HE BSTU «VOENMEH» named after D.F. Ustinov.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Артеменко Ю.Н. Многофункциональное использование манипулятора наведения космического телескопа «Миллиметрон» // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4–2. С. 44–46.
2. Компоненты высокоточного электромеханического привода для сверхнизких температур (4,2 К) системы адаптации трансформируемой космической конструкции / А. В. Юсов, С. А. Козлов, М. Ю. Архипов, Е. А. Костров // Сибирский журнал науки и технологий. 2016. № 1. С. 170–175.
3. Применение пространственных механизмов с параллельной структурой для наведения, стабилизации и виброизоляции бортовых приборов / А. В. Горбунов, Е. Б. Коротков, А. В. Леканов, С. А. Рудыка, Н. С. Слободзян // Решетневские чтения. 2017. Т. 1, № 21. С. 117–118.
4. Stewart D. A platform with six degrees of freedom. Proceedings of the Institution of mechanical engineers, 1965, vol. 180, pt. 1, no. 15, pp. 371–385.
5. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Мороз А.В. Кинематическое управление гексаподом космического назначения // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2018: материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2018. С. 67–71.
6. Опыт разработки системы управления механизмами с параллельной структурой типа «гексапод» для позиционирования и наведения крупногабаритных объектов информационных космических платформ / А. В. Горбунов, Е. Б. Коротков, А. В. Леканов, С. А. Матвеев, Н. С. Слободзян, Н. Г. Яковенко // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 111–123.

7. Проектирование высокоточных линейных приводов для шестиступенчатого механизма типа «Гексапод» космического применения / С. О. Бойко, С. А. Комаров, С. Г. Харитонов, Е. А. Ульбушев, А. В. Леканов // Сибирский журнал науки и технологий. 2013. № 6 (52). С. 142–149.
8. Высокоточный линейный привод, построенный по гибридной схеме / С. А. Комаров, С. О. Бойко, Е. А. Ульбушев, С. Г. Харитонов // Решетневские чтения. 2011. № 15. С. 67–68.
9. Янгулов В. С., Эдличко А. А. Прецизионные винтовые механизмы и передачи для использования в редукторах приводов систем космического назначения // Известия ТПУ. 2010. № 2. С. 40–45.
10. Жуков Ю. А., Коротков Е. Б., Мороз А. В. Имитационная модель цифровой системы управления гексаподом с линейными приводами на базе шаговых двигателей // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 35–41.
11. Mishev G., Rupetsov V., Paskaleva K., Dishliev S. Factors affecting the accuracy of positioning of rectilinear motion systems. XV International Scientific Conference «RE & IT – 2016». Conf. paper, 2016, pp. 67–70.
12. Zhang Y., Pan S., Deng J. Methods for measuring and compensating ball screw error on multi-mode industrial CT scanning platform. Proceedings of the 2016 5th International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation, 2016.
13. Zhang J., Li B., Zhou Ch., Zhao W. Positioning error prediction and compensation of ball screw feed drive system with different mounting conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016, vol. 230, iss. 12, pp. 2307–2311.
14. Kang C. M., Zhao Ch. Yu, Liu K., Li T. J., Yang B. Comprehensive compensation method for thermal error of vertical drilling center. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2019, vol. 43 (1), pp. 92–101.
15. Pajor M., Zaplata J. Compensation of thermal deformations of the feed screw in a CNC machine tool. Advances in manufacturing science and technology, 2011, vol. 35, no. 4.
16. Chang C.-F., Wang C.-C., Lin C.-S., Chen Ch., Chen T.-R., Chen C.-Y. A theory of ball-screw thermal compensation. Proceedings of the International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists, 2009, vol. II IMC.
17. Kowal M., Staniek R. Compensation system for thermal deformation of ball screws. Proceedings of the 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA, 2014, Copenhagen, Denmark.
18. Точность шарико-винтовой передачи [Электронный ресурс]. URL: https://tech.thk.com/ru/products/pdf/ru_a15_011.pdf (дата обращения: 12.04.2019).
19. Жуков Ю. А., Коротков Е. Б., Слободзян Н. С. Система управления механизмом с параллельной кинематикой для перемещения бортовых приборов КЛА на базе современного отечественного радиационно-стойкого микроконтроллера с процессорным ядром Cortex-M4F // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 48–53.
20. Система управления механизмом с параллельной кинематикой космического применения / Е. Б. Коротков, С. А. Матвеев, Н. С. Слободзян, А. Е. Слободзян // Системный анализ, управление и навигация. 2018. С. 89–91.

REFERENCES

1. Artemenko Yu. N. Multifunctional use of the pointing pointing device of the Millimetron space telescope. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4–2, pp. 44–46. (In Russian).
2. Yusov A. V., Kozlov S. A., Arkhipov M. Yu., Kostrov E. A. Components of a high-precision electromechanical drive for ultralow temperatures (4.2 K) of the adaptation system of a transformable space structure. *Sibirskii zhurnal nauki i tekhnologii*, 2016, no. 1, pp. 170–175. (In Russian).
3. Gorbunov A. V., Korotkov E. B., Lekanov A. V., Rudyka S. A., Slobodzyan N. S. The use of spatial mechanisms with a parallel structure for the guidance, stabilization and vibration isolation of onboard devices. *Reshetnevskie chteniya*, 2017, vol. 1, no. 21, pp. 117–118. (In Russian).
4. Stewart D. A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of the Institution of mechanical engineers*, 1965, vol. 180, pt. 1, no. 15, pp. 371–385.
5. Zhukov Yu. A., Korotkov E. B., Moroz A. V. Kinematic administration of space destination hexapod // *Intellektualnye sistemy, upravlenie i mekhantronika – 2018. Materialy Vserossiiskoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii*, 2018, pp. 67–71. (In Russian).
6. Gorbunov A. V., Korotkov E. B., Lekanov A. V., Matveev S. A., Slobodzyan N. S., Yakovenko N. G. // Experience in developing a control system for mechanisms with a parallel structure of the «hexapod» type for positioning and targeting large-sized objects of information space platforms. *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 7, pp. 111–123. (In Russian).
7. Boiko S. O., Komarov S. A., Kharitonov S. G., Ulybushev E. A., Lekanov A. V. Designing high-precision linear actuators for the six-step Gexapod mechanism for space applications. *Sibirskii zhurnal nauki i tekhnologii*, 2013, no. 6 (52), pp. 142–149. (In Russian).
8. Komarov S. A., Boiko S. O., Ulybushev E. A., Kharitonov S. G. High-precision linear actuator, built on a hybrid scheme. *Reshetnevskie chteniya*, 2011, no. 15, pp. 67–68. (In Russian).
9. Yangulov V. S., Edlichko A. A. Precision helical gears and gears for use in gearboxes for drives for space applications // *Izvestiya TPU*, 2010, no. 2, pp. 40–45. (In Russian).
10. Zhukov Yu. A., Korotkov E. B., Moroz A. V. Simulation model hexapod control systems with linear stepper drives. *Voprosy radioelektroniki*, 2017, no. 7, pp. 35–41. (In Russian).
11. Mishev G., Rupetsov V., Paskaleva K., Dishliev S. Factors affecting the accuracy of positioning of rectilinear motion systems. XV International Scientific Conference «RE & IT – 2016». Conf. paper, 2016, pp. 67–70.
12. Zhang Y., Pan S., Deng J. Methods for measuring and compensating ball screw error on multi-mode industrial CT scanning platform/ Proceedings of the 2016 5th International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation, 2016.
13. Zhang J., Li B., Zhou Ch., Zhao W. Positioning error prediction and compensation of ball screw feed drive system with different mounting conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016, vol. 230, iss. 12, pp. 2307–2311.

14. Kang C.M., Zhao Ch. Yu, Liu K., Li T.J., Yang B. Comprehensive compensation method for thermal error of vertical drilling center. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2019, vol. 43 (1), pp. 92–101.
15. Pajor M., Zaplata J. Compensation of thermal deformations of the feed screw in a CNC machine tool. *Advances in manufacturing science and technology*, 2011, vol. 35, no. 4.
16. Chang C.-F., Wang C.-C., Lin C.-S., Chen Ch., Chen T.-R., Chen C.-Y. A theory of ball-screw thermal compensation. *Proceedings of the International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists*, 2009, vol. II IMC.
17. Kowal M., Staniek R., Compensation system for thermal deformation of ball screws. Proceedings of the 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA, 2014, Copenhagen, Denmark.
18. *Tochnost shariko-vintovoi peredachi* [Ball screw accuracy]. (In Russian). Available at: https://tech.thk.com/ru/products/pdf/ru_a15_011.pdf (accessed 12.04.2019).
19. Zhukov Yu. A., Korotkov E.B., Slobodzyan N.S. Radiation resistant microcontroller with Cortex-M4F core based control system of parallel kinematics mechanism designed for spacecraft's onboard devices movements. *Voprosy radioelektroniki*, 2017, no. 7, pp. 48–54. (In Russian).
20. Korotkov E.B., Matveev S.A., Slobodzyan N.S., Slobodzyan A.E. The control system of the mechanism with parallel kinematics of space application. *Sistemnyi analiz, upravlenie i navigatsiya*, 2018, pp. 89–91 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Слободзян Никита Сергеевич, начальник научно-исследовательской лаборатории робототехнических и мехатронных систем, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (953) 345-38-27, e-mail: ja-nikita@mail.ru.

AUTHOR

Nikita S. Slobodzyan, head of research laboratory of robotic and mechatronic systems, Baltic State Technical University «VOENMEH», 1, 1ya Krasnoarmeyskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 190005, Russia, tel.: +7 (953) 345-38-27, e-mail: ja-nikita@mail.ru.

Поступила 12.03.2019; принята к публикации 01.04.2019; опубликована онлайн 27.05.2019.
Submitted 12.03.2019; revised 01.04.2019; published online 27.05.2019.

ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВО / TECHNOLOGIES AND PRODUCTION

DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-62-68

УДК 004.414.23

Проектирование и оценка крупного автостереоскопического лазерного дисплея с широким обзором для наружного применения

К. Н. Каримов¹, Ю. В. Липатов¹, Р. К. Хайбуллин¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ,
Казань, Россия

Современные автостереоскопические дисплеи часто не соответствуют обязательным требованиям для наружного применения из-за ограничений в размерах, яркости, числа зон просмотра 3D и т.д. В статье предложена концепция проектирования модульных автостереоскопических лазерных дисплеев с широким углом обзора с четкой яркостью света, теоретическая зона просмотра 3D-изображения которых достигает нескольких тысяч наблюдателей на расстоянии до 70 м. Каждый элемент изображения содержит три лазерных диода и цилиндрические микролинзы. Для демонстрации предлагаемого решения разработан прототип дисплея на плате 5×3 триксселя и охарактеризованы оптические свойства прототипа. Концепция позволяет создать модульный дисплей без ограничений по общему размеру, который способен отправлять информацию об изображении в левые и правые глаза нескольких зрителей, доказывая эффективность предлагаемого подхода. Такие дисплеи могут использоваться на больших выставках, площадках проведения авиационных выступлений, стенах многоэтажных домов, находящихся вдоль трасс для привлечения потребителей.

Ключевые слова: дисплеи наружного применения, 3D-изображение, автостереоскопические дисплеи, лазерные дисплеи

Для цитирования:

Каримов К. Н., Липатов Ю. В., Хайбуллин Р. К. Проектирование и оценка крупного автостереоскопического лазерного дисплея с широким обзором для наружного применения // Радиопромышленность. 2019. Т. 29. С. 62–68.
DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-62-68

© Каримов К. Н., Липатов Ю. В., Хайбуллин Р. К., 2019



Design and evaluation of a large, wide-scope autostereoscopic laser display for outdoor use

K. N. Karimov¹, Yu. V. Lipatov¹, R. K. Khaybullin¹

¹ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

Modern autostereoscopic displays often do not meet the mandatory requirements for external use due to limitations in size, brightness, the number of 3D viewing zones, etc. The design concept for modular autostereoscopic laser displays with a wide viewing angle and a vivid luminosity, the theoretical viewing area of the 3D image reaches several thousand observers at a distance of up to 70 m is proposed herein. Each element of the image contains three laser diodes and cylindrical microlenses. To demonstrate the proposed solution, a prototype of a display on a 5×3 triplex board was developed and the optical properties of the prototype were characterized. The concept makes it possible to create a modular display without restrictions on the overall size, which is able to send information about the image to the left and right eyes of several viewers, proving the effectiveness of the proposed approach. Such displays can be used at large exhibitions, venues for air shows, walls of high-rise apartment buildings located along the highways, to attract consumers.

Keywords: outdoor displays, 3D image, autostereoscopic displays, laser displays

For citation:

Karimov K. N., Lipatov Yu. V., Khaybullin R. K. Design and evaluation of a large, wide-scope autostereoscopic laser display for outdoor use. Radiopromyshlennost, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 62–68 (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-62-68

Введение

Суть стереоскопического восприятия состоит в том, что глаза зрителя видят два немного различающихся изображения, которые человеческий мозг совмещает как трехмерную модель (3D) при наблюдении со сцены. В широко применяемых стеклованных дисплеях 3D с активной «шторкой» или пассивных поляриземых стеклах используют быстрые мелькающие «шторки» и поляризующие объективы, чтобы представить различные изображения для каждого глаза. Эти дисплеи, однако, неуместны для широкого применения, где число телезрителей могло бы быть очень большим (например, публичный показ).

В современных автостереоскопических изобретениях присутствуют оптические элементы, такие как линзовидные решетки или параллаксные барьеры. Например, жидкокристаллические (ЖК) панельные дисплеи (LCD) имеют четкие, жестко ограниченные направления, так называемые 3D зоны просмотра. Основной недостаток этих дисплеев – то, что собственное разрешение базового ЖК-дисплея, а также яркость уменьшаются в разы, равные количеству зон просмотра, что значительно уменьшает качество изображения и читаемость на солнечном свете. Альтернативная концепция автостереоскопии обходит потерю разрешения и может быть приложена к широкомасштабным дисплеям, но не подходит для наружного применения из-за низкой освещенности [2, 3].

Предлагаемый автостереоскопический дисплей состоит из массива отдельных элементов

изображения – так называемых трикселей. Каждый триксель содержит интегрированный источник света с тремя индивидуально регулируемыми лазерами, общей цилиндрической микролинзой и вращающимся микроэлектромеханическими системами (МЭМС) зеркал, которые отражают свет коллимированных пучков на левые и правые глаза зрителей.

В отличие от обычных видеопроекторов [5], цилиндрические триксели коллимируют лучи микролинзами только в одной пространственной зоне, производя горизонтальный параллакс. Для демонстрации предлагаемого принципа были разработаны прототипы автостереоскопических лазерных дисплеев в блоке 5×3 трикселей с использованием красных лазерных диодов. Прототип дисплея способен отправлять различную информацию об изображении, например узоры или отдельные символы, для левого и правого глаза нескольких зрителей в мультиплексированном режиме. Для достижения лучшего эффекта автостереоскопии предложена методика теплоизолирования.

Основной принцип работы

Автостереоскопический эффект, мультиплексированный по времени

На рис. 1 показан основной принцип работы одного трикселя. Свет излучения красного, зеленого и голубого цветов одновременно контролируется, коллимируется микролинзой и с помощью МЭМС зеркала направляется на глаза зрителей.

Путем синхронизации информации изображения, показанной в определенной зоне просмотра

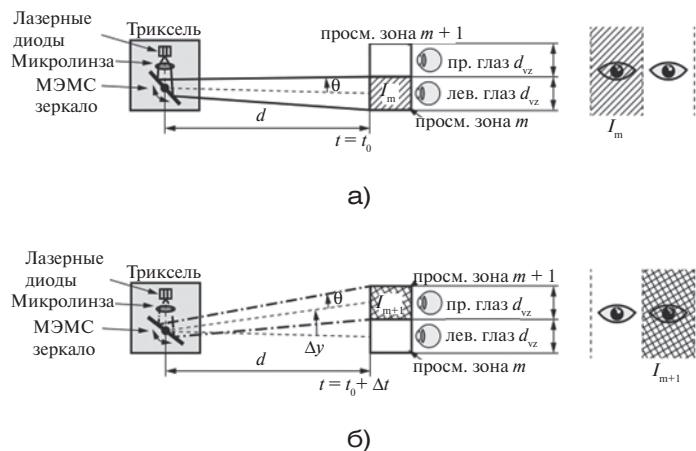


Рисунок 1. Основной принцип мультиплексирования по времени одиночного трикселя: а – данные по изображению I_m показаны во времени $t = t_0$ для левого глаза зрителя; б – другая информация об изображении I_{m+1} отображена в следующем времени $t = t_0 + \Delta t$ для правого глаза зрителя
Figure 1. The basic principle of time multiplexing of a single trixel: a – the data in the image I_m are shown in time $t = t_0$ for the left eye of the viewer; b – other information about the image I_{m+1} is displayed in the next time $t = t_0 + \Delta t$ for the right eye of the viewer

3D с механическим отклонением зеркала, зритель сможет увидеть различную информацию об изображении левым и правым глазами. На примере рис. 1 направление оптического луча изменяется по угловому смещению $\Delta\gamma$ с временным интервалом времени Δt , когда отображаемая информация об изображении изменяется от I_m до I_{m+1} . В отличие от современных автостереоскопических методов, таких как линзовидные массивы или параллаксные барьеры, наш подход с временным мультиплексированием не уменьшает разрешение дисплея, т.е. оба глаза зрителя могут получать информацию об изображении из всего подмножества трикселей. Угол расхождения θ коллимированных сканирующих пучков (см. рис. 1) – самый важный параметр системы, поскольку он влияет на максимальное расстояние просмотра. Расходимость пучка определяется как $1/e^2$ на половину угла коллимированного Гауссова распределения лазерного излучения.

Автостереоскопический эффект может быть воспринят только в зоне просмотра на расстоянии d от дисплея, если ширина 3D зоны просмотра $d_{vz} = 2dtg(\theta)$ меньше, чем расстояние, равное среднему расстоянию до человеческого глаза s_e , т.е. $d_{vz} < ds_e$.

Среднее расстояние между глазами человека $s_e = 6,5$ см у взрослых мужчин и $s_e = 6,3$ см у женщин [6]. Далее будет использоваться значение ниже $s_e = 6,3$ см. Для заданного угла расходимости θ максимальное расстояние просмотра определяется $d_{max} = s_e/(2tg(\theta))$.

Компоненты трикселя

На рис. 2а показана схема интегрированного источника лазерного излучения. Три лазерных диода

и три связанных фотодиода монитора собраны на общем модуле. В дальнейшем 3D RGB лазерный дисплей будет состоять из трех идентичных красных GaAs лазерных диодов с длиной волны $\lambda = 635$ нм из-за ограниченной доступности зеленых и голубых GaN лазерных диодов.

Путем объединения и использования трех индивидуальных чипов мы можем доказать осуществимость направления фокусов цилиндрических микролинз к активным зонам лазерного диода. Фотодиоды монитора непрерывно измеряют оптическую силу, испущенную от задних граней лазерных диодов, для того чтобы оценить оптическую выходную мощность от передних граней. Эта информация используется для компенсации потенциальных цветовых сдвигов в RGB-дисплеях, вызванных изменением температуры, а также эффектами старения, и для обеспечения безопасности для глаз.

Перед тремя лазерными диодами расположена одна коллимирующая микролинза. Микролинзы прикреплены к общему элементу теплоотвода. Прототип нашего интегрированного источника света имеет объем всего $0,07$ см 3 , хотя включает в себя три лазерных диода, три мониторных фотодиода, субмодуль, теплоотвод, а также микролинзу.

Плосковыпуклые цилиндрические микролинзы коллимируют лучи от источника света только в одном поперечном направлении, так называемой быстрой оси [7], которая здесь равна оси z . В ортогональном направлении y , так называемой медленной оси, световые лучи проходят микролинзы без коллимирования. В дальнем поле это позволяет создать пучок Гауссова излучения с большой эллиптичностью. Остаточный угол расхождения быстрой оси ограничен снизу за счет дифракции и составляет

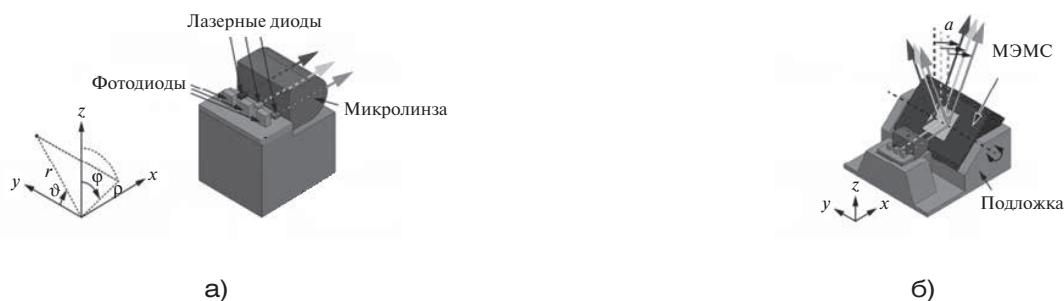


Рисунок 2. Схемы: а – интегрированного лазерного источника света и б – трикселя, включающая зеркало МЭМС

Figure 2. Schemes: a – integrated laser light source and b – trixel, including a MEMS mirror

$\Theta_{DL} = \lambda/(\pi f \Theta_0) = 0,34$ мрад, где $\lambda = 635\text{nm}$, $\Theta_0 = 28^\circ$ ($1/e^2$ на половину угла) – длина волны и угол отклонения лучей, испускаемых лазерными диодами, соответственно. Фокусное расстояние f микролинз ограничено физическими размерами линз, а также показателем преломления материала линзы. Для нашего прототипа дисплея, где используются красные лазерные диоды с длинами волн $\lambda = 635$ нм, фокусное расстояние составляет $f = 1,2$ мм. В целях минимизации сферических aberrаций выпуклая поверхность линзы имеет асферический вид. Строго говоря, этот дифракционный предел справедлив только для параксиальных пучков. Однако эксперименты показывают, что он также достаточно хорошо описывает преобразование пучков, испускаемых типичными лазерными диодами [4].

На рис. 2б представлена схема трикселя, включающая зеркало МЭМС, общую подложку и интегрированный источник света. Прототип дисплея включает в себя квазистатические электромагнитные одномерные 1D МЭМС-зеркала с амплитудой оптического сканирования $\alpha_{max} = \pm 10^\circ$. В неработающем положении микрорезеркало отклоняет лучи на 90° . Подложка изготовлена по технике отлива с последующим прессованием. Основным веществом подложки является термопластик, на поверхности которого нанесены проводники.

Оптические свойства

Максимальное расстояние просмотра 3D

С учетом допусков, возникающих в процессе изготовления элементов, углов расхождения θ максимальное расстояние просмотра различно для каждого индивидуального трикселя. Предполагая идеальные aberrационные компоненты, теоретического дифракционного предела Θ_{DL} , упомянутого ранее, можно достичь только путем идеального выравнивания центра светоизлучающей области на передних гранях лазерных диодов до фокальных точек микролинз.

Если отражающая поверхность зеркала МЭМС совершенно не плоская и не ровная, угол

расхождения отраженного луча увеличивается еще сильнее. Мы смоделировали профиль поверхности микрорезеркала в виде сферы с радиусом кривизны R , где $R = \infty$ соответствует идеально плоской поверхности. На рис. 3 показаны 99% достоверный интервал угла расхождения, а также соответствующий максимум расстояния просмотра 3D-изображения как функция кривизны микрорезеркала. Измерения на основе лучевой оптики показали, что микрорезеркало, закрепленные в первом прототипе, имеют кривизну $1/R \approx 3,6 \text{ m}^{-1}$. Среднее значение угла расхождения трикселя с идеально ровным микрорезеркалом равно $\mu_\Theta = 0,44$ мрад, а для трикселя с кривизной поверхности $1/R \approx 3,6 \text{ m}^{-1} - \mu_\Theta = 6,12$ мрад. Максимальные расстояния просмотра 3D d_{max} составляют 70,5 и 5,1 м соответственно. Между тем зеркала МЭМС с кривизнами поверхности $1/R \approx 0,2 \text{ m}^{-1}$ доступны и позволяют достичь максимального расстояния просмотра 3D $d_{max} = 58,6$ м.

Количество зон просмотра 3D

При условии идеально ровной поверхности микрорезеркал теоретическое максимальное

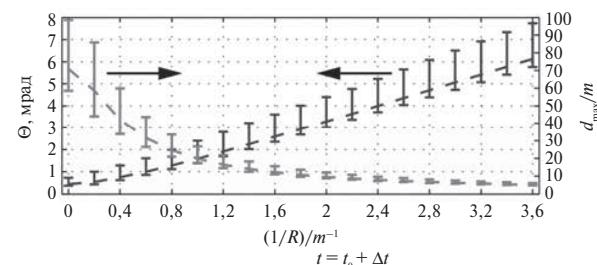


Рисунок 3. Угол расхождения Θ и максимальное расстояние просмотра d_{max} 3D как функция кривизны микрорезеркала (достоверность данных 99%; пунктирные линии представляют среднее значение)

Figure 3. The angle of divergence Θ and the maximum viewing distance d_{max} 3D as a function of the curvature of the micromirror (data accuracy is 99%; dotted lines represent the mean value)

количество 3D зоны просмотра определяется максимальным оптическим углом сканирования α_{\max} и дифракционно ограниченным расхождением угла Θ_{DL} согласно $N_{vz,max} = \alpha_{\max}/\Theta_{DL}$. Наш прототип дисплея имеет теоретическое максимальное количество $N_{vz,max} = 500$ зон просмотра. Современные 3D лазерные дисплеи с оптимизированными зеркалами МЭМС и интегрированными источниками лазерного излучения имеют потенциал до нескольких тысяч зон просмотра за счет увеличения α_{\max} и уменьшения Θ_{DL} . Последнее может быть достигнуто путем увеличения фокусного расстояния f линзы, а также использованием оптимизированных лазерных диодов с увеличенной быстрой осью расходимости угла Θ_0 .

Яркость и безопасность для глаз

Освещенность одного лазерного диода одиночного трикселя в дальнем поле в цилиндрических координатах равна

$$E_e(\rho, \varphi, y) \approx E_0 \operatorname{rect}\left(\frac{\varphi}{2\alpha_{\max}}\right) \frac{w_0^2}{w_{SA}^2(\rho)} \exp\left(-\frac{2y^2}{w_{SA}^2(\rho)}\right), \quad (1)$$

где E_0 – максимальная освещенность. В вертикальном направлении y профиль Гауссова распределения из-за неколлимированной «медленной оси» лазерных диодов с соответствующими углами расхождения $\Theta_{0,SA}$, ширина луча $w_{0,SA}$, радиус пучка $w_{SA}(\rho)$. В угловой координате φ профиль аппроксимирован и ограничен углом сканирования зеркала МЭМС α_{\max} , который здесь моделируется как прямоугольная функция с параметром $\operatorname{rect}(\xi) = 1, |\xi| < 1/2$ и $\operatorname{rect}(\xi) = 0, |\xi| > 1/2$.

Преобразуем (1) к сферическим координатам. Тогда излучающая интенсивность $I_e(r, \vartheta, \varphi) = E_e(r, \vartheta, \varphi)r^2$ равна

$$I_e(r, \vartheta, \varphi) \approx I_0 \operatorname{rect}\left(\frac{\varphi}{2\alpha_{\max}}\right) \left(\frac{\lambda}{\pi \sin(\vartheta) \operatorname{tg}^2(\Theta_{0,SA})} \right)^2 \times \exp\left(-\frac{2}{\operatorname{tg}^2(\vartheta) \operatorname{tg}^2(\Theta_{0,SA})}\right). \quad (2)$$

Формула (2) не зависит от радиального расстояния r , пиковая излучающая интенсивность I_0 определена по нормализации согласно формуле

$$\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\vartheta=0}^{\pi} I_e(\vartheta, \varphi) \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi = K P_0,$$

где P_0 – оптическая мощность лазерного диода. Параметр K учитывает продолжительность обратного хода зеркала МЭМС, которая описана далее, поглощение микролинзой, зеркало МЭМС и окошко системы.

Яркость автостереоскопического лазерного дисплея определяется как $L_v = I_v/d_{pix}^2$, где $I_v = 683V(\lambda)I_e$ – интенсивность света с $V(\lambda)$ в качестве

функции интенсивности глаз, d_{pix} – шаг между соседними трикселями.

Наш первый прототип дисплея с полем трикселя $d_{pix} = 12$ мм и тремя красными лазерными диодами, расположенными в трикселе с углом расхождения $\Theta_{0,SA} \approx 6,4^\circ$, в медленной оси при длине волны 635 нм (при этом $V(\lambda) = 0,22$) может достичь пиковых значений яркости, т.е. $L_v \approx 32000$ кд/м² при малой выходной оптической мощности $P_0 = 1$ мВт лазерного диода и наблюдении дисплея под углом $\vartheta = 90^\circ$. Яркость нашего первого прототипа дисплея значительно больше, чем у современных ярких 2D LED напольных дисплеев, которые имеют значения яркости $L_v = 5000$ кд/м². В [7] показано, что долговременный просмотр 3D RGB лазерного дисплея с максимально допустимым значением яркости $L_{v,max} \approx 100000$ кд/м² не вредит глазам зрителей.

Прототип дисплея

На рис. 4а показан первый прототип дисплея в массиве 5×3 трикселей. Объем одного трикселя составляет 0,96 см³. Это позволяет достичнуть малого расстояния между смежными трикселями (12 мм), который недостижим при использовании современных коммерческих проекторов МЭМС.

Приводная электроника расположена на отдельной печатной плате. Все зеркала МЭМС управляются сигналом треугольной формы с частотой модуляции $f_M \approx 60$ Гц. Информация об изображении отображается только во время одного поворота микрозеркала в течение интервала времени $2/(3f_M)$, пока все лазерные диоды выключены во время обратного хода $1/(3f_M)$. Лазерные диоды управляются широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) с продолжительностью импульса 10 нс. Такая точная степень детализации учитывает восьмиразрядную глубину цвета для каждого из лазерных диодов, т.е. 24-битную глубину цвета RGB лазерного дисплея. Лазерные диоды, как и зеркала МЭМС, управляются программно.

На рис. 4б представлен пример двух результатов $N_{vz} = \alpha_{\max}/\mu_\Theta$ разных тестовых шаблонов в 3D-режиме в зонах m и $m + 1$, которые пространственно разделены расстоянием между глазами $s_e = 6,3$ см. Рисунок достоверно показывает, что прототип нашего дисплея способен отправлять различную информацию об изображении для левого и правого глаз зрителя. По определению это является основным принципом автостереоскопии.

В отличие от современных автостереоскопических дисплеев, где информация об изображении отображается в отдельных зонах просмотра и повторяется после, например, восьми просмотров, наша система способна показывать различную информацию об изображении в каждой зоне просмотра N_{vz} .



Рисунок 4. Прототип дисплея (а) и его изображения при просмотре зоны m и $m + 1$ при максимальной дальности просмотра $d_{\max} = 5,1$ м (б)

Figure 4. The prototype of the display (a) and its image when viewing the zones m and $m + 1$ at the maximum viewing distance $d_{\max} = 5.1$ m (б)

Выводы

Разработан автостереоскопический крупномасштабный многорежимный лазерный дисплей, предназначенный для наружного использования. Отдельные триксели нашего дисплея включают лазерные источники света. Зеркала МЭМС отклоняют излучаемый свет и образуют разные изображения для левого и правого глаз зрителя для достижения автостереоскопического эффекта при временном мультиплексировании без потери разрешения. Предлагаемая концепция позволяет создать модульный дисплей, не налагающий ограничений на общий размер.

В статье объясняется принцип рассматриваемой системы и характеризуются оптические

свойства прототипа с 5×3 трикселями. Вычислены максимальное расстояние, при котором может восприниматься 3D-эффект, максимальное количество 3D-зон просмотра, а также яркость дисплея.

При идеально плоских отражающих поверхностях МЭМС-зеркала максимальное расстояние для просмотра составляет до 70 м. Объем одного трикселя, включая упаковку, составляет всего $0,96 \text{ см}^3$, соответственно, шаг между трикселями будет равен 12 мм. Наш прототип-дисплей способен отправлять информацию об изображении в левые и правые глаза нескольких зрителей, доказывая эффективность предлагаемого подхода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Dodgson N.A. Autostereoscopic 3D Displays. *Computer*, 2005, vol. 38, no. 8, pp. 31–36.
2. Jachimowicz K.E., Gold R.S. Stereoscopic (3D) projection display using polarized color multiplexing. *Optical Engineering*, 1990, vol. 29, no. 32, pp. 838–842.
3. Balogh T., Kovacs P., Barsi A. Holovizio 3D display system. *2007 3DTV Conference*, 7–9 May 2007, Kos Island, Greece, pp. 1–4.
4. Eldes O., Akşit K., Urey H. Multi-view autostereoscopic projection display using rotating screen. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 23, pp. 29043–29054.
5. Lipton L. Foundations of the Stereoscopic Cinema. Van Nostrand Reinhold Publ., 1982, 318 p.
6. Сайт компании STMicroelectronics [Электронный ресурс]. URL: <http://www.st.com/web/en/press/en/t3130> (дата обращения: 01.04.2019).
7. Dodgson N.A. Variation and extrema of human interpupillary distance. *Proceedings SPIE*, 2004, vol. 5291, pp. 36–46.

REFERENCES

1. Dodgson N.A. Autostereoscopic 3D Displays. *Computer*, 2005, vol. 38, no. 8, pp. 31–36.
2. Jachimowicz K.E., Gold R.S. Stereoscopic (3D) projection display using polarized color multiplexing. *Optical Engineering*, 1990, vol. 29, no. 32, pp. 838–842.
3. Balogh T., Kovacs P., Barsi A. Holovizio 3D display system. *Proceedings of 2007 3DTV Conference*, 7–9 May 2007, Kos Island, Greece, pp. 1–4.
4. Eldes O., Akşit K., Urey H. Multi-view autostereoscopic projection display using rotating screen. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 23, pp. 29043–29054.
5. Lipton L. Foundations of the Stereoscopic Cinema. Van Nostrand Reinhold Publ., 1982, 318 p.
6. STMicroelectronics company website. Available at: <http://www.st.com/web/en/press/en/t3130> (accessed 01.04.2019).
7. Dodgson N.A. Variation and extrema of human interpupillary distance. *Proceedings SPIE*, 2004, vol. 5291, pp. 36–46.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каримов Камиль Назимович, студент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10, тел.: +7 (927) 467-71-97, e-mail: kamil-ok@mail.ru.

Липатов Юрий Витальевич, студент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10, тел.: +7 (917) 227-81-98, e-mail: lipatov14@mail.ru.

Хайбуллин Рамазан Камильевич, студент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, 420111, Казань, ул. К. Маркса, 10, тел.: +7 (903) 387-56-17, e-mail: Khaybullin2@gmail.com.

AUTHORS

Kamil N. Karimov, student, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, 10, ulitsa K. Marksya, Kazan, 420111, Russia, tel. +7 (927) 467-71-97, e-mail: kamil-ok@mail.ru.

Yuri V. Lipatov, student, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, 10, ulitsa K. Marksya, Kazan, 420111, Russia, tel. +7 (917) 227-81-98, e-mail: lipatov14@mail.ru.

Ramazan K. Khaybullin, student, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, 10, ulitsa K. Marksya, Kazan, 420111, Russia, tel.: +7 (903) 387-56-17, e-mail: Khaybullin2@gmail.com.

Поступила 06.11.2018; принята к публикации 21.02.2019; опубликована онлайн 27.05.2019.
Submitted 06.11.2018; revised 21.02.2019; published online 27.05.2019.

DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-69-75

УДК 531.373

Идентификация структуры шумов микромеханических инерциальных преобразователей параметров движения

А. М. Лестев¹, М. В. Федоров², С. Д. Евстафьев²

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

² АО «ГИРООПТИКА», Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены результаты анализа структуры шумов микромеханических преобразователей параметров движения – микромеханических гироскопов (ММГ) и микромеханических акселерометров (ММА) экспериментального измерительного блока бесплatformенных инерциальных навигационных систем. Блок изготовлен и разработан в АО «ГИРООПТИКА» (Санкт-Петербург). В его состав входят триада LL–ММГ с диапазонами измерений $\pm 400^\circ/\text{с}$ и триада MMA осевого типа с диапазонами измерений $\pm 50 \text{ г}$. Микромеханические гироскопы и акселерометры, изготавливаемые по технологиям современной микроэлектроники, относятся к перспективным приборам микросистемной техники, широко применяющимся в качестве датчиков первичной информации бесплatformенных инерциальных систем ориентации и навигации (БИСО и БИНС). На точность функционирования БИСО и БИНС существенное влияние оказывает структура шумов выходных сигналов инерциальных датчиков параметров движения. По этой причине актуальна задача идентификации шумов ММГ и MMA. Идентификация структуры шумов преобразователей угловой скорости и линейного ускорения испытуемого блока БИНС производилась методом вариации Аллана. Запись выходных сигналов преобразователей осуществлялась в нормальных климатических условиях, интервал дискретизации – 1,0 мс, длительность записи – 90 мин. Обработка выходных сигналов преобразователей выполнялась на основе специального программного обеспечения с привлечением программы AlaVar 5.2. Установлено, что преобладающими составляющими шумов преобразователей являются случайное буждание выходного сигнала – белый шум и нестабильность нулевого сигнала – фликкер-шум. Шумы квантования в выходных сигналах преобразователей не обнаружены. Значения характеристик шума по вариации Аллана выходных сигналов преобразователей угловой скорости и линейного ускорения испытуемого блока сопоставлены с характеристиками шума наиболее совершенных модулей производства зарубежных фирм.

Ключевые слова: гироскоп микромеханический, акселерометр микромеханический, шумовые составляющие выходного сигнала, вариация Аллана

Для цитирования:

Лестев А. М., Федоров М. В., Евстафьев С. Д. Идентификация структуры шумов микромеханических инерциальных преобразователей параметров движения // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 2. С. 69–75. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-69-75

© Лестев А. М., Федоров М. В., Евстафьев С. Д., 2019



Identification of the noise structure of micromechanical inertial transducers of motion parameters

A. M. Lestev¹, M. V. Fedorov², S. D. Evstafiev²

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

²JSC «GYROOPTICS», St. Petersburg, Russia

The article presents the results of the analysis of the noise structure of micromechanical transducers of motion parameters – micromechanical gyroscopes (MMG) and micromechanical accelerometers (MMA) of an experimental measuring unit of strapdown inertial position navigation systems. The unit is manufactured and developed at JSC «GYROOPTICS» (St. Petersburg). It consists of a LL-MMG triad with measuring ranges of $\pm 400^{\circ}/\text{s}$ and an axial-type MMA triad with measuring ranges of $\pm 50 \text{ g}$. Micromechanical gyroscopes and accelerometers manufactured using modern microelectronics technologies are among the most promising microsystem technology devices that are widely used as sensors of the primary information of strapdown inertial orientation and navigation systems. The accuracy of the functioning of the inertial orientation and navigation inertial systems is significantly affected by the noise structure of the output signals of the inertial motion parameters sensors. For this reason, the urgent task of identifying the noise of micromechanical gyroscopes and accelerometers. The noise structure of the angular rate and linear acceleration transducers of the tested SINS block was identified by the Allan variance method. The output signals of the transducers were recorded in normal climatic conditions, the sampling interval was 1.0 ms, and the recording duration was 90 minutes. The processing of the output signals of the transducers was carried out on the basis of special software using the AlaVar 5.2 program. It has been established that the predominant noise components of the transducers are the random walk of the output signal – white noise and the instability of the zero signal – flicker noise. No quantization noise was detected in the output signals of the transducers. The values of the noise characteristics in Allan variance of the output signals of the angular rate transducers and the linear acceleration of the test block are compared with the noise characteristics of the most advanced modules produced by foreign companies.

Keywords: MEMS, noise, micromechanical gyroscope, micromechanical accelerometer, Allan variance

For citation:

Lestev A. M., Fedorov M. V., Evstafiev S. D. Identification of the noise structure of micromechanical inertial transducers of motion parameters. Radiopromyshlennost, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 69–75 (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-69-75

Введение

Микромеханические инерциальные преобразователи угловых скоростей и линейных ускорений – микромеханические гироскопы (ММГ) и микромеханические акселерометры (ММА) – широко применяются в беспилотных системах ориентации и навигации (БИСО и БИНС) подвижных объектов различного назначения. В БИСО и БИНС определение углов ориентации и координат объекта производится на основе интегрирования кинематических и навигационных уравнений [1]. На точность функционирования инерциальных навигационных систем существенно влияет структура шумов выходных сигналов ММГ и ММА, применяемых в качестве датчиков первичной информации навигационных систем. В частности, при интегрировании шума ММГ типа белой последовательности среднее квадратическое отклонение (СКО) ошибки в определении угла ориентации объекта возрастает пропорционально квадратному корню [2] из времени функционирования навигационной системы ($t^{1/2}$).

Дискретный белый шум в выходном сигнале ММА при двукратном интегрировании приводит к ошибке в определении координат, СКО которой возрастает пропорционально ($t^{3/2}$). Вследствие этого актуальна задача идентификации шумов инерциальных датчиков параметров движения.

При идентификации структуры шумов и анализе погрешностей датчиков широкое применение получили методы, основанные на использовании вариации Аллана (Allan variance) [3, 4] или девиации Аллана (Allan deviation), определяемой как квадратный корень из вариации Аллана. Метод вариации Аллана был предложен для оценки погрешностей цезиевого эталона частоты при больших интервалах времени. В последующем вариации Аллана были включены в спецификации характеристик инерциальных датчиков параметров движения [2, 5, 6]. Несмотря на то, что метод вариации Аллана является эвристическим и не имеет строгого математического обоснования [7], вариации Аллана включаются в паспортные данные МЭМС-гироскопов

и МЭМС-акселерометров многих зарубежных фирм [8, 9]. В настоящее время этот метод получил распространение при анализе случайных погрешностей и идентификации структуры шумов российских разработок лазерных и волоконно-оптических гироскопов и микромеханических гироскопов, а также акселерометров [10–17].

Вариации Аллана и результаты испытаний

Сущность метода вариации Аллана состоит в вычислении дисперсии отклонений разности осредненных значений дискретных случайных величин, формируемых из массива измерений выходного сигнала датчика

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{k=1}^{n-1} [\bar{U}(\tau)_{k+1} - \bar{U}(\tau)_k]^2, \quad (1)$$

где $\bar{U}(\tau)_k$ – анализируемый сигнал, осредненный на интервале $(k\tau, (k+1)\tau)$ времени τ ;

n – количество интервалов осредненного сигнала.

Вариация Аллана $\sigma_A^2(\tau)$ связана со спектральной плотностью $S_U(f)$ стационарного случайного процесса $U(t)$ зависимостью

$$\sigma_A^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_U(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df. \quad (2)$$

В статье [18] предлагается, а в последующих публикациях [10, 15, 16] используется аппроксимирующее выражение для $\sigma_A^2(\tau)$

$$\sigma_A^2(\tau) = R^2 \frac{\tau^2}{2} + K^2 \frac{\tau}{3} + B^2 \frac{2}{\pi} \ln 2 + N^2 \frac{1}{\tau} + Q^2 \frac{3}{\tau^2}, \quad (3)$$

учитывающее следующие составляющие шума выходного сигнала: квазидетерминированное изменение вида Rt ; случайное блуждание (винеровский процесс), описываемое спектральной плотностью $S(f) = (K/2\pi)2/f$; фликкер-шум ($S(f) = B^2/2\pi f$, $f \leq f_0$; $S(f) = 0$, $f > f_0$, f_0 – частота среза); белый шум ($S(f) = N^2$); шум квантования ($S(f) = (2\pi f)^2 Q^2 \tau$).

Типовой вид графика зависимости $\sigma_A(\tau)$ – квадратного корня из вариации Аллана – от времени осреднения в логарифмическом масштабе представлен на рис. 1. Решение задачи идентификации с использованием вариации Аллана сводится к оцениванию коэффициентов R, K, B, N, Q , определение числовых значений которых производится с использованием метода наименьших квадратов.

В данной работе объектом исследований является экспериментальный образец инерциального измерительного блока, содержащего триаду микромеханических преобразователей угловой скорости с диапазонами измерений $\pm 400^\circ/\text{с}$ и триаду микромеханических преобразователей линейного ускорения с диапазонами $\pm 50\text{g}$. Блок разработан и изготовлен в АО «ГИРООПТИКА» (Санкт-Петербург). Конструкции ММГ и ММА, использованные в качестве датчиков первичной информации блока, созданы на основе расчетов с использованием вычислительной системы ANSYS. Геометрическая и конечно-элементная модели чувствительного элемента (ЧЭ) преобразователя угловой скорости представлены на рис. 2, преобразователей линейного ускорения – на рис. 3.

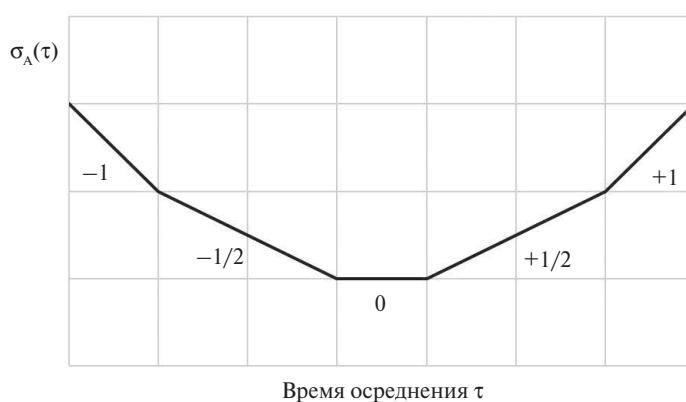


Рисунок 1. Общий вид кривой девиации Аллана. Типичные наклоны (μ) $\sigma_A(\tau)$ – графика (в масштабе $\log_{10} - \log_{10}$): $\mu = -1$ – белый шум в угле (линейной скорости) или шум квантования; $\mu = -1/2$ – белый шум в угловой скорости (линейном ускорении); $\mu = 0$ – фликкер-шум в угловой скорости (линейном ускорении) – нестабильность нуля; $\mu = +1/2$ – белый шум в угловом ускорении; $\mu = +1$ – тренд в угловой скорости (линейном ускорении)

Figure 1. General view of the Allan deviation curve. Typical slopes (μ) $\sigma_A^2(\tau)$ – graph (on the scale of $\log_{10} - \log_{10}$): $\mu = -1$ – white noise in the angle (linear velocity) or quantization noise; $\mu = -1/2$ – white noise in angular rate (linear acceleration); $\mu = 0$ – flicker noise in angular rate (linear acceleration) – Bias instability; $\mu = +1/2$ – white noise in angular acceleration; $\mu = +1$ – trend in angular rate (linear acceleration)

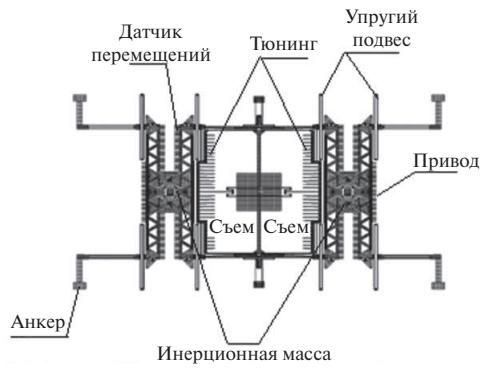


Рисунок 2. Геометрическая и конечно-элементная модели чувствительного элемента преобразователей угловой скорости
Figure 2. Geometric and finite element models of angular rate transducers' sensing element

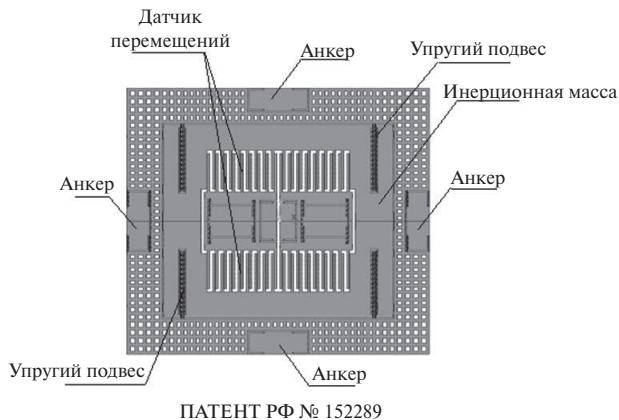


Рисунок 3. Геометрическая и конечно-элементная модели чувствительного элемента преобразователей линейного ускорения
Figure 3. Geometric and finite element models of the linear acceleration transducers' sensing element

На рис. 4 и 5 в логарифмическом масштабе по обеим осям приведены графики отклонений Аллана и аппроксимирующие кривые, построенные по результатам обработки записей выходных сигналов длительностью 90 мин преобразователей угловых скоростей и линейных ускорений исследуемого блока. Запись производилась на неподвижном относительно Земли основании в нормальных климатических условиях, интервал дискретизации составлял 1,0 мс. Обработка выходных сигналов преобразователей осуществлялась с помощью специального программного обеспечения (М. А. Лестев, АО «ГИРООПТИКА») в среде программирования C++ с привлечением программы AlaVar 5.2

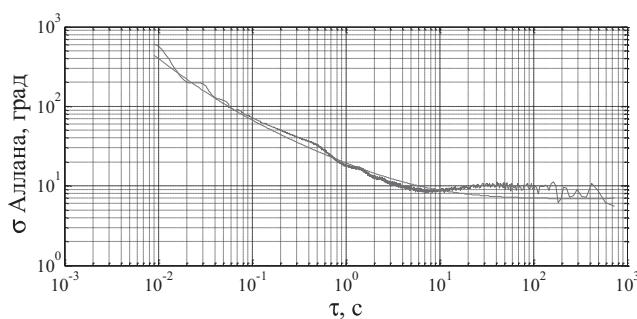
(<http://www.alamath.com/alavar/>). Определение числовых значений коэффициентов R , K , B , N , Q выражения (3), характеризующих интенсивность шумовых составляющих выходных сигналов преобразователей, производилось методом наименьших квадратов, реализованным средствами вычислительной системы MathCad. Полученные значения указанных коэффициентов приведены в таблице.

Кривые вариации Аллана преобразователей угловой скорости и линейного ускорения инерциального измерительного блока содержат участки с характерными наклонами « $\frac{1}{2}$ » и «0», свойственные белому шуму и фликкер-шуму выходных сигналов преобразователей. Преобладающими составляющими шумов в исследуемых сигналах являются случайное блуждание (N) выходного сигнала – белый шум и нестабильность (B) нулевого сигнала – фликкер-шум. Шумы квантования в выходных сигналах гироскопических и акселерометрических каналах измерительного блоков не обнаружены.

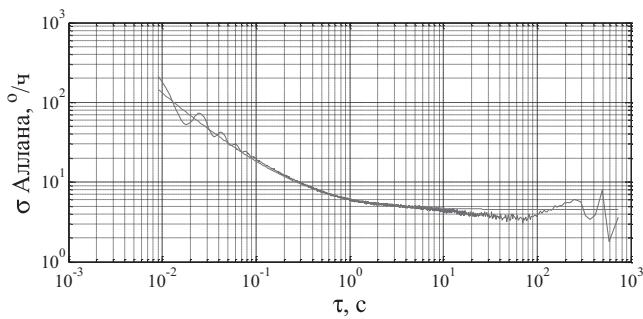
В паспортных данных инерциальных датчиков параметров движения зарубежных фирм приводятся следующие характеристики шума: случайное блуждание выходного сигнала (ARW – Angle Random Walk и VRW – Velocity Random Walk), а также нестабильность нулевого сигнала (Bias Instability). Наиболее точные инерциальные модули фирм Analog Devices и Honeywell (США) ADIS16488 (диапазоны измерений $\pm 450^{\circ}/\text{с}$ и $\pm 5 \text{ g}$) и HG 1700 ($\pm 1000^{\circ}/\text{с}$ и $\pm 5 \text{ g}$) характеризуются следующими значениями параметров шума: гироскопические каналы ARW – 18 и $30^{\circ}/\text{ч}/\sqrt{\text{Гц}}$, Bias Instability – 6,25 и $10^{\circ}/\text{ч}$; акселерометрические каналы VRW – 0,029 и $0,37 \text{ м}/\text{с}/\sqrt{\text{ч}}$ и Bias Instability – 0,032 и $1,0 \text{ mg}$. В статье [11] приведены результаты испытаний установочной партии ММГ, разработанного ЦНИИ «Электроприбор» совместно с французской фирмой Tronics Microsystems: ARW – не выше $36^{\circ}/\text{ч}/\sqrt{\text{Гц}}$, Bias Instability – не более $10^{\circ}/\text{ч}$; отдельные образцы имели уровень шума $7,2$ – $10,8^{\circ}/\text{ч}/\sqrt{\text{Гц}}$ и нестабильность нуля $12^{\circ}/\text{ч}$.

Выводы

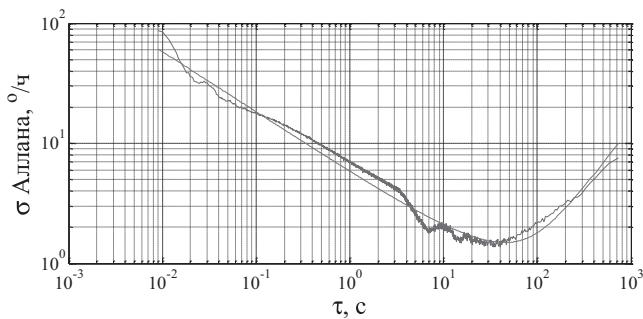
С использованием метода вариации Аллана выполнена идентификация структуры шумов микромеханических преобразователей угловой скорости (диапазон $\pm 400^{\circ}/\text{с}$) и линейного ускорения (диапазон $\pm 50 \text{ g}$) экспериментального измерительного блока бесплатформенной инерциальной навигационной системы, разработанного и изготовленного АО «ГИРООПТИКА» (Санкт-Петербург). Установлено, что преобладающими составляющими шумов в выходных сигналах преобразователей являются случайное блуждание – белый шум и нестабильность нулевого сигнала – фликкер-шум.



а)



б)

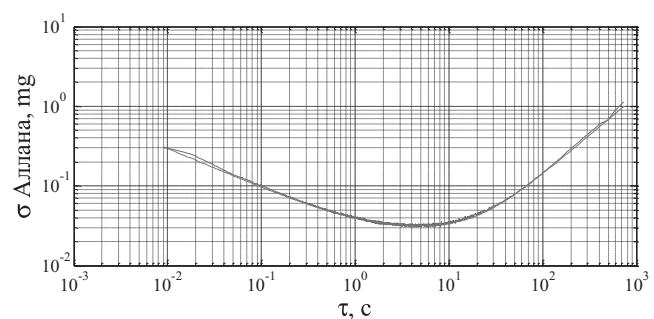


в)

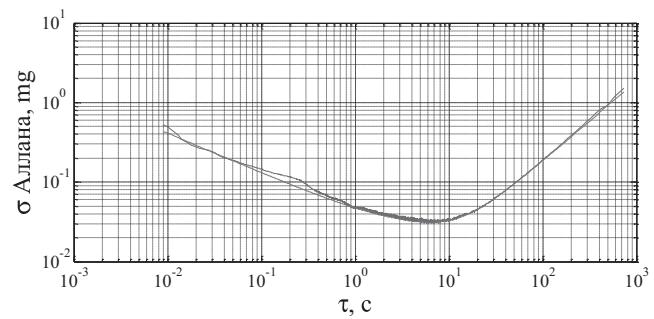
Рисунок 4. Вариации Аллана преобразователей угловой скорости измерительных каналов X (а), Y (б) и Z (в)

Figure 4. Allan variations of angular rate transducers measuring channels X (а), Y (б) and Z (в)

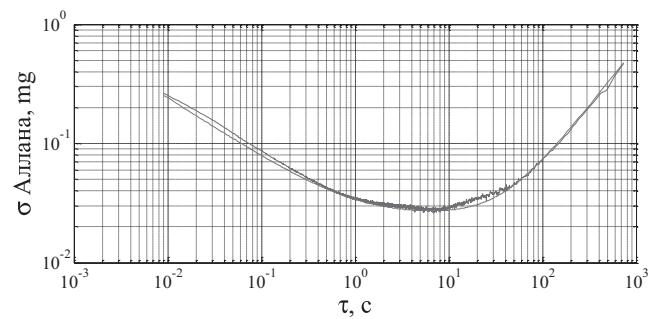
По результатам испытаний ММГ экспериментального образца блока могут быть отнесены к микромеханическим гироскопам класса точности $10^\circ/\sqrt{\text{Гц}}$, MMA – к микромеханическим акселерометрам класса точности $0,05 \text{ mg}/\sqrt{\text{Гц}}$. Сравнение по вариациям Аллана характеристик шума выходных сигналов микромеханических преобразователей угловой скорости (ММГ) и линейного



а)



б)



в)

Рисунок 5. Вариации Аллана преобразователей линейного ускорения измерительных каналов X (а), Y (б) и Z (в)

Figure 5. Allan variations of linear acceleration transducers of measuring channels X (а), Y (б) and Z (в)

ускорения (ММА) экспериментального образца измерительного блока АО «ГИРООПТИКА» с разработками зарубежных фирм и российских предприятий показывает, что шумовые характеристики испытуемого блока близки к характеристикам наиболее совершенных инерциальных модулей зарубежных фирм и сопоставимы с характеристиками шума отечественных аналогов.

Таблица. Значения коэффициентов интенсивности шумовых составляющих преобразователей угловой скорости и линейного ускорения
Table. The intensity factors of the noise components of the converters of angular rate and linear acceleration

Коэффициент интенсивности шума / Noise intensity factor	Единица измерения / Unit of measurement	Ось X / Axis X	Ось Y / Axis Y	Ось Z / Axis Z
Преобразователи угловой скорости / Angular rate transducers				
<i>R</i>	°/ч/ч	0,00	0,00	0,02
<i>K</i>	°/ч/ $\sqrt{\text{Ч}}$	0,10	0,00	0,00
<i>B</i>	°/ч	4,50	3,00	0,70
<i>N</i>	°/ч/ $\sqrt{\text{Гц}}$	18,00	4,00	5,80
<i>Q</i>	мкрад	0,00	0,00	0,00
Преобразователи линейного ускорения / Linear acceleration transducers				
<i>R</i>	mg/ч	0,0019	0,0026	0,0009
<i>K</i>	mg/ $\sqrt{\text{Ч}}$	0,0071	0,001	0,0050
<i>B</i>	mg	0,0175	0,0160	0,0160
<i>N</i>	mg/ $\sqrt{\text{Гц}}$	0,0295	0,0410	0,0240
<i>Q</i>	м/с	0,0000	0,0000	0,0000

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Бранец В.Н., Шмышевский И.П. Введение в теорию бесплatformенных инерциальных навигационных систем. М.: Наука, 1992. 280 с.
- IEEE Std. 1431–2004, Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros, 2004.
- Allan D.W. Statistics of atomic Frequency Standards. Proc. of IEEE, 1966, vol. 54, no. 2, pp. 221–230.
- Allan D.W. History, Strengths and Weaknesses of Allan Variances and Their General Applications. Methods for navigation Sensor Performance Determination, SPb, CSRI Electropribor Publ., 2015, pp. 507–524.
- IEEE Std. 528-2001, IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology, IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2001.
- IEEE Std. 1545–2005, IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition and Analysis. IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2005.
- Сирия Т.Н. Вариации Аллана как оценка погрешности измерения // Гирокопия и навигация. 2010. № 2 (69). С. 29–36.
- Сайт компании Analog Devices [Электронный ресурс]. URL: <http://www.analog.com/en/products/sensors-mems.html> (дата обращения: 27.03.2019).
- Сайт компании Honeywell [Электронный ресурс]. URL: <https://aerospace.honeywell.com/en/product-listing/sensors> (дата обращения: 27.03.2019).
- Использование вариации Аллана при исследовании характеристик микромеханических гирокопов / С.Г. Кучерков, Д.И. Лычев, А.И. Скалон, Л.А. Чертков // Гирокопия и навигация. 2003. № 2 (41). С. 98–104.
- Результаты испытаний установочной партии микромеханических гирокопов RR-типа / В.Г. Пешехонов, Я.А. Некрасов, П.Пфлюгер, Ц.Кергерис, Х.Хаддара, А.Эльсайд // Гирокопия и навигация. 2011. № 1 (72). С. 37–48.
- Среднеточная ИНС «АИСТ-320» с кориолисовым вибрационным гирокопом «АИСТ-100», идеология и результаты разработки, производства и испытаний / А.П. Мезенцев, Е.Н. Фролов, М.Ю. Климкин, О.А. Мезенцев // Гирокопия и навигация. 2007. № 3 (58). С. 3–19.
- Кробка Н.И. Дифференциальные методы идентификации структуры шумов гирокопов // Гирокопия и навигация. 2011. № 1 (72). С. 59–77.
- Krobka N.I. On the topology of the Allan Variance Graphs and Typical Misconceptions in the interpretations of the Gyro Noise Structure. Methods for navigation Sensor Performance Determination, SPb., CSRI Electropribor Publ., 2015, pp. 525–550.
- Оценка основных характеристик бесплatformенного инерциального блока с использованием вариации Аллана / Д.А. Кутовой, П.В. Ситников, А.А. Федотов, В.Л. Якимов // Вестник СГАУ им. С.П. Королева. 2014. № 1 (43). С. 201–207.
- Использование вариации Аллана для практического определения структуры шумов чувствительных элементов бесплatformенной инерциальной навигационной системы / В.М. Кутовой, Д.А. Кутовой, О.И. Маслова, С.Ю. Перепелкина, П.В. Ситников, А.А. Федотов // Сборник материалов XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. С. 229–233.
- Матвеев В.В., Погорелов М.Г. Анализ погрешностей микромеханических гирокопов методом вариаций Аллана // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 3. С. 123–135.
- Lawrence C. Ng., Darry Y.P. Characterization of Ring Laser Gyro Performance Using the Allan Variance Method. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1997, vol. 20, no. 1, pp. 211–214.

REFERENCES

1. Branets V.N., Shmyshevskii I.P. Introduction to the theory of strapdown inertial navigation systems. Moscow, Nauka Publ., 1992, 280 p. (In Russian).
2. IEEE Std. 1431–2004, Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros, 2004.
3. Allan D.W. Statistics of atomic Frequency Standards. *Proc. of IEEE*, 1966, vol. 54, no. 2, pp. 221–230.
4. Allan D.W. History, Strengths and Weaknesses of Allan Variances and Their General Applications. *Methods for navigation Sensor Performance Determination*, SPb, CSRI Electropribor Publ., 2015, pp. 507–524.
5. IEEE Std. 528-2001, IEEE Standard for Inertial Sensor Terminology, IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2001.
6. IEEE Std. 1545–2005, IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition and Analysis. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Society*, 2005.
7. Siraya T.N. Allan Variations as Estimation of Measurement Error. *Giroskopiya i navigaciya*, 2010, no. 2 (69), pp. 29–36. (In Russian).
8. Analog Devices company website. Available at: <http://www.analog.com/en/products/sensors-mems.html> (accessed 27.03.2019).
9. Honeywell company website. Available at: <https://aerospace.honeywell.com/en/product-listing/sensors> (accessed 27.03.2019).
10. Kucherkov S.G., Lychev D.I., Skalon A.I., Chertkov L.A. The use of Allan variation in the study of the characteristics of micromechanical gyroscopes. *Giroskopiya i navigaciya*, 2003, no. 2 (41), pp. 98–104. (In Russian).
11. Peshekhanov V.G., Nekrasov Ya. A., Pfluger P., Kergueris C., Haddara H., Elsayed A. The test results of the initial batch of micromechanical gyroscopes RR-type. *Giroskopiya i navigaciya*, 2011, no. 1 (72), pp. 37–48. (In Russian).
12. Mezentsev A.P., Frolov E.N., Klimkin M.Yu., Mezentsev O.A. Medium INS «AIST-320» with Coriolis vibratory gyroscope «AIST-100», ideology and results of development, production and testing. *Giroskopiya i navigaciya*, 2007, no. 3 (58), pp. 3–19. (In Russian).
13. Krobka N.I. Differential methods for identifying noise structure gyroscopes. *Giroskopiya i navigaciya*, 2011, no. 1 (72), pp. 59–77. (In Russian).
14. Krobka N.I. On the topology of the Allan Variance Graphs and Typical Misconceptions in the interpretations of the Gyro Noise Structure. *Methods for navigation Sensor Performance Determination*, SPb., CSRI Electropribor Publ., 2015, pp. 525–550.
15. Kutovoi D.A., Sitnikov P.V., Fedotov A.A., Yakimov V.L. Evaluation of the main characteristics of the strapdown inertial unit using Allan variation. *Vestnik SGAU im. S.P. Koroleva*, 2014, no. 1 (43), pp. 201–207. (In Russian).
16. Kutovoi V.M., Kutovoi D.A., Maslova O.I., Perepelkina S.Yu., Sitnikov P.V., Fedotov A.A. Using the Allan variation for practical determination of the noise structure of sensitive elements of the strapdown inertial navigation system. Materials of the XXII St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, SPb, CSRI Electropribor Publ., 2015, pp. 229–233. (In Russian).
17. Matveev V.V. Pogorelov M.G. Analysis of errors of micromechanical gyroscopes using the Allan variation method. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2015, iss. 3, pp. 123–135. (In Russian).
18. Lawrence C. Ng., Darry Y.P. Characterization of Ring Laser Gyro Performance Using the Allan Variance Method. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 1997, vol. 20, no. 1, pp. 211–214.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лестев Александр Михайлович, д.ф.-м.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, тел.: +7 (812)371-91-73, e-mail: Lestev_AM@guap.ru.

Федоров Максим Вячеславович, к.т.н., начальник отдела расчетов и моделирования, АО «ГИРООПТИКА», 194044, Санкт-Петербург, ул. Чугунная, д. 14, тел.: +7 (812) 702-42-74, e-mail: fedorov@gyro.ru.

Евстафьев Сергей Дмитриевич, начальник отдела исследований и производства, АО «ГИРООПТИКА», 194044, Санкт-Петербург, ул. Чугунная, д. 14, тел.: +7 (812) 702-42-74, e-mail: evstafiev@gyro.ru.

AUTHORS

Aleksandr M. Lestev, Dr. Sci. (Physical and Mathematical), professor, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67A, ulitsa B. Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia, tel.: +7 (812)371-91-73, e-mail: Lestev_AM@guap.ru.

Maksim V. Fedorov, Ph.D. (Engineering), Head of Design and Modeling Department, JSC «GYROOPTICS», 14, ulitsa Chugunnaya, 194044, St. Petersburg, Russia, tel.: +7 (812) 702-42-74, e-mail: fedorov@gyro.ru.

Sergey D. Evstafiev, Head of Research and Production Department, JSC «GYROOPTICS», 14, ulitsa Chugunnaya, 194044, St. Petersburg, Russia, tel.: +7 (812) 702-42-74, e-mail: evstafiev@gyro.ru.

Поступила 01.03.2019; принята к публикации 25.03.2019; опубликована онлайн 27.05.2019.
Submitted 01.03.2019; revised 25.03.2019; published online 27.05.2019.

DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-76-88

УДК 004.932.2: 621.396.96

Многопороговая селекция объектов на изображениях в системах дистанционного наблюдения

В.Ю. Волков^{1, 2, 3}, М.И. Богачев², О.А. Маркелов²

¹АО «Научно-производственное предприятие «Радар мms», Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Цель работы – повышение эффективности селекции объектов различной природы на цифровых монохромных изображениях, формируемых в системах дистанционного наблюдения. Для этого в структуру многопороговой обработки вводятся алгоритмы формирования признаков объектов, относительно которых задаются граничные значения. Предложены новые схемы многопороговой обработки и селекции объектов интереса с установкой порога по результатам селекции. Получены и опробованы алгоритмы многопороговой селекции объектов по площади и по другим масштабно-инвариантным геометрическим признакам, таким как коэффициент удлинения периметра объекта и коэффициент удлинения главной оси описывающего эллипса. Порог бинаризации устанавливается для каждого из селектируемых объектов исходя из экстремума применяемого геометрического критерия. Используемые новые инвариантные геометрические признаки различаются для круглых и удлиненных объектов и обеспечивают независимость характеристик при изменениях масштаба изображения. Представлены результаты обработки типовых моделей изображений, а также результаты селекции объектов на реальных телевизионных и инфракрасных изображениях, показывающие эффективность предложенного метода селекции.

Ключевые слова: многопороговая обработка, селекция объектов, сегментация

Для цитирования:

Волков В.Ю., Богачев М.И., Маркелов О.А. Многопороговая селекция объектов на изображениях в системах дистанционного наблюдения // Радиопромышленность. 2019. Т. 29, № 2. С. 76–88. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-76-88

© Волков В.Ю., Богачев М.И., Маркелов О.А., 2019



Multi-threshold object selection in images of remote sensing systems

V. Yu. Volkov^{1, 2, 3}, M.I. Bogachev², O.A. Markelov²

¹ Research and Production Enterprise Radar mms JSC, Saint-Petersburg, Russia

² Saint-Petersburg State Electrotechnical University, Saint-Petersburg, Russia

³ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russia

The aim of the work is to increase the efficiency of selection of objects of different nature in digital monochrome images formed in remote sensing systems. For this purpose, algorithms for the formation of features of objects with respect to which boundary values are specified are introduced into the structure of multi-threshold processing. New schemes of multi-threshold processing and selection of objects of interest with threshold setting based on selection results are proposed. Algorithms of multi-threshold selection of objects by area and other scale-invariant geometric features, such as the elongation coefficient of the perimeter of the object and the elongation coefficient of the main axis of the describing ellipse, are obtained and tested. The binarization threshold is set for each of the selected objects based on the extremum of the applied geometric criterion. The new invariant geometric features used are different for round and elongated objects and provide independence of characteristics with changes in the image scale. Results of processing of typical models of images, and also results of selection of objects on the real television and infrared images showing efficiency of the proposed selection method are presented.

Keywords: multi-threshold processing, object selection, segmentation

For citation:

Volkov V. Yu., Bogachev M.I., Markelov O.A. Multi-threshold object selection in images of remote sensing systems. Radiopromyshlennost, 2019, vol. 29, no. 2, pp. 76–88. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-2-76-88

Введение

Задачи обнаружения, выделения, селекции и локализации объектов различной формы возникают в системах радиовидения, использующих синтезированные антенные решетки (SAR), инфракрасные, лидарные и телевизионные камеры видимого диапазона. При этом круг решаемых задач включает идентификацию объектов, слежение за ними, сопоставление и совмещение изображений от разнородных датчиков, индексацию и восстановление изображений [1, 2].

Разнообразие и изменчивость форм и текстур объектов, а также интенсивный нестационарный фон определяют сложность обработки. В области объектов интереса, как правило, реализуются небольшие отношения сигнал/фон. Кроме того, зарегистрированное цифровое изображение может иметь низкое качество, малое число уровней квантования, неоднородный характер и нечеткие границы естественных и искусственных структур (рек, дорог, мостов, зданий).

На практике в системах дистационного наблюдения статистический фон сильно отличается от гауссовского, распределение явно асимметрично, а хвости плотностей вероятности похожи на логнормальную или загрязненную нормальную (*contaminated-normal*) плотности. При ограниченной выборке вид плотности фона идентифицируется с трудом. Фон также может содержать элементы,

которые структурно похожи на сигналы. Такой характер фона практически исключает применение известных методов адаптивной пороговой обработки, так как неправильное формирование порогов может привести к потере полезных объектов на самой ранней стадии. Другая проблема – низкое качество формируемых изображений, пятна, размытые границы; кроме того, изображения SAR страдают от серьезного внутреннего спектрального шума [3].

В теории и практике распознавания объектов на изображениях в системах дистанционного зондирования и технического зрения используются два основных подхода:

1. Дискриминантный подход, основанный на сравнении с эталоном [4]. К нему относятся корреляционные и спектральные методы. Эти методы обладают слабой устойчивостью к возможным искажениям отдельных элементов описания объектов.
2. Структурно-синтаксический подход, более перспективный и связанный с анализом внутренней структуры объектов интереса и выделением локальных признаков [5, 6]. Этот подход обычно включает этап преобразования или реконструкции исходного изображения, чтобы можно было применить селекцию объектов по заданным признакам. В большинстве подходов этап

реконструкции имеет целью сегментацию изображения, т.е. выделение областей, пиксели в которых обладают одинаковым свойством. На этом этапе используются свойства связности и однородности областей. Далее области селектируются по заданным признакам объектов интереса. Трудности использования данного подхода связаны с необходимостью описания разнообразия объектов конечной системой правил. Кроме того, ему присущ большой объем вычислений, особенно в условиях разнообразных геометрических преобразований.

В традиционных схемах сегментации используются признаки, которые выделяются из исходного изображения и только косвенно учитывают свойства объектов интереса. В частности, широко используются свойства гистограммы исходного изображения, свойства кромок и контуров. Результаты последующей селекции объектов практически не используются для сегментации [7–15].

В данной статье рассматривается метод селекции связных объектов, основанный на многопороговой обработке и установке порога по различным геометрическим критериям и их комбинациям, основы которого заложены в работах [16–18].

Селекция объектов при многопороговой обработке

Пусть монохромное изображение $I(x, y)$, где I – интенсивность, а x, y – координаты пикселей, бинаризовано фиксированным глобальным порогом T . Результатом является двоичный слой B_T : $\{B_T = 1\}$, если $I(x, y) \geq T$; $B_T = 0$, если $I(x, y) < T\}$, в котором подмножество единиц представляет объекты интереса (*foreground*), например здания, сооружения, транспортные средства, береговая линия, а подмножество нулей относится к фону (*background*), который определяется ландшафтом области наблюдения.

Если интенсивности пикселей объектов интереса в основном выше интенсивностей фоновых пикселей, то общепринятым методом выбора глобального порога является метод Отсу, работающий в довольно общих условиях. Он основан на анализе гистограммы исходного изображения и дает минимальную сумму внутригрупповых дисперсий для подмножеств $\{I(x, y) > T\}$ и $\{I(x, y) \leq T\}$ соответственно. Ясно, что в практических сценариях объекты интереса размыты, а фон неоднороден и зашумлен, что в случае глобального порога приводит к перекрытию участков распределений для указанных подмножеств и неизбежным ошибкам.

В идеале для каждого объекта интереса требуется свое значение порога, и такие локальные пороги возможно сформировать при использовании

локальных (скользящих) окон, в пределах которых фон считается однородным. При этом необходимо задать контролируемую, или базовую (связанную с размерами ожидаемого объекта), и опорную (фоновую) области. Опорная область располагается вблизи контролируемой и используется для формирования адаптивного порога [19]. Эти методы требуют априорного знания размеров объекта интереса. Кроме того, использование фонового окна приводит к потере разрешающей способности по близким объектам и к подавлению одного объекта соседними объектами, которые попадают в область этого окна.

Альтернативные подходы возможны с использованием многопороговой обработки. Один из методов предлагает установку для каждой категории объектов интереса своего порога, который выбирается по заданному критерию [16–18]. При этом для описания категории объектов можно использовать различные параметры, отражающие, например, размеры объекта или его ориентацию. Для анализа разномасштабных изображений удобнее оказываются инвариантные параметры, такие как отношение квадрата периметра к площади, коэффициент растяжения эллипса, а также другие геометрические или текстурные характеристики.

В этом случае на каждом двоичном слое производится селекция объектов, удовлетворяющих заданным свойствам, и порог бинаризации для таких объектов выбирается таким образом, чтобы получить максимальное число отселектированных объектов данной категории (или их пикселей) с учетом требуемого сохранения формы объектов. Этот процесс можно автоматизировать, что приводит к адаптивным методам установки порогов.

Селекция объектов по площади

Считается, что основным свойством, отличающим объект интереса от шумового фона, является связность смежных пикселей на бинарном изображении I_T . На рис. 1 представлена модель монохромного зашумленного изображения на сетке размером 256×256 пикселей, в которой сигнальное поле (рис. 1а) суммируется с гауссовским шумом (рис. 1б) таким образом, что в результирующем поле (рис. 1в) объекты интереса имеют малое отношение сигнал/шум $d = 1,163$ в каждом сигнальном пикселе.

Отношение сигнал/шум вводится как отношение сдвига математического ожидания к среднеквадратичному значению шума. Сигнальное поле содержит прямоугольные объекты размером 20×8 , 20×16 , 20×32 и 20×64 пикселей, так что наименьшая площадь объекта равна 160 пикселям.

Рассмотрим чисто шумовое поле с гауссовским распределением вероятности (см. рис. 1б). При

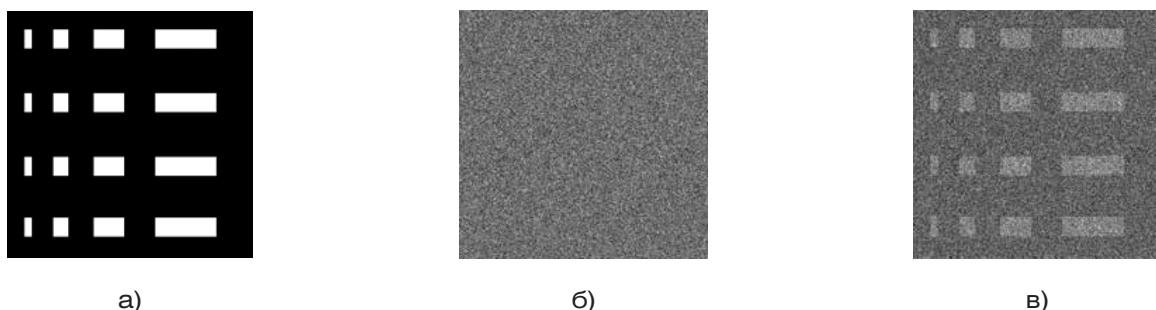


Рисунок 1. Модель изображения, содержащая объекты прямоугольной формы на фоне гауссовского шума: а – сигнальное поле, б – гауссовский шум, в – результирующее поле
Figure 1. An image model containing rectangular objects against a Gaussian noise: a – the signal field, б – Gaussian noise, в – the resultant field

каждом значении порога бинаризации выделяются связные изолированные объекты, содержащие разное число пикселей. Поскольку в дальнейшем будет представлять интерес форма объекта интереса, мелкие объекты (площадь которых меньше $S_{\min} = 120$ пикселей) исключаются из рассмотрения, что позволяет существенно снизить уровень шума после бинаризации. На рис. 2а показан результат бинаризации при значении 0,6 для порога, нормированного к максимальному значению. Изолированные объекты шумовой природы имеют ярко выраженную фрактальную структуру. Число связных объектов зависит от значения порога (рис. 2б), причем всегда имеется максимум, связанный с определенной процентной точкой плотности вероятности шума [16–18].

На рис. 3 показаны результаты однопороговой селекции связных объектов прямоугольной формы с учетом удаления мелких объектов. Заметны два вида искажения формы объектов: потеря пикселей в области объекта и добавление лишних пикселей по его границам. При высоких значениях порога, необходимых для малого числа ложных объектов,

полезные объекты в основном теряют пиксели. При малых отношениях сигнал/шум полезные объекты претерпевают существенные деформации границ, которые приобретают фрагментированный вид. Это приводит к достаточно заметному увеличению периметра таких связных фрагментов.

Оптимальный порог должен обеспечить приемлемое сохранение формы полезных объектов. В частности, можно потребовать примерного равенства числа пикселей, потерянных внутри объекта, и числа пикселей, «при克莱ившихся» по его границе. В этом случае оптимальный порог не будет соответствовать максимуму отсектированных объектов заданной площади ($S_b = 160$ и больше), а будет несколько смещен в сторону более высоких значений. На рис. 3а порог бинаризации был равен $T = 115$, при этом выделилось объектов $N_{\text{obj}} = 15$, в то время как максимальное число $N_{\text{obj}} = 21$ объектов площадью более S_b образовалось при значении $T = 108$ (рис. 3б).

При последовательном снижении порога (рис. 3в) по сравнению с наиболее высоким (см. рис. 3б) наблюдается «при克莱ивание» фоновых пикселей

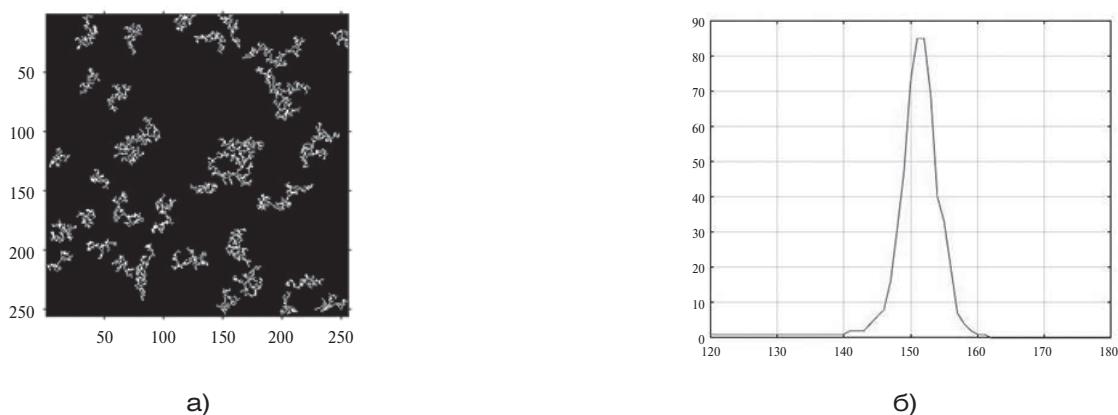


Рисунок 2. Результат бинаризации шумового поля: а – шумовые объекты, б – зависимость числа выделенных объектов от значения порога
Figure 2. The result of the noise field binarization: a – noise objects, б – dependence of the number of discriminated objects on the threshold value

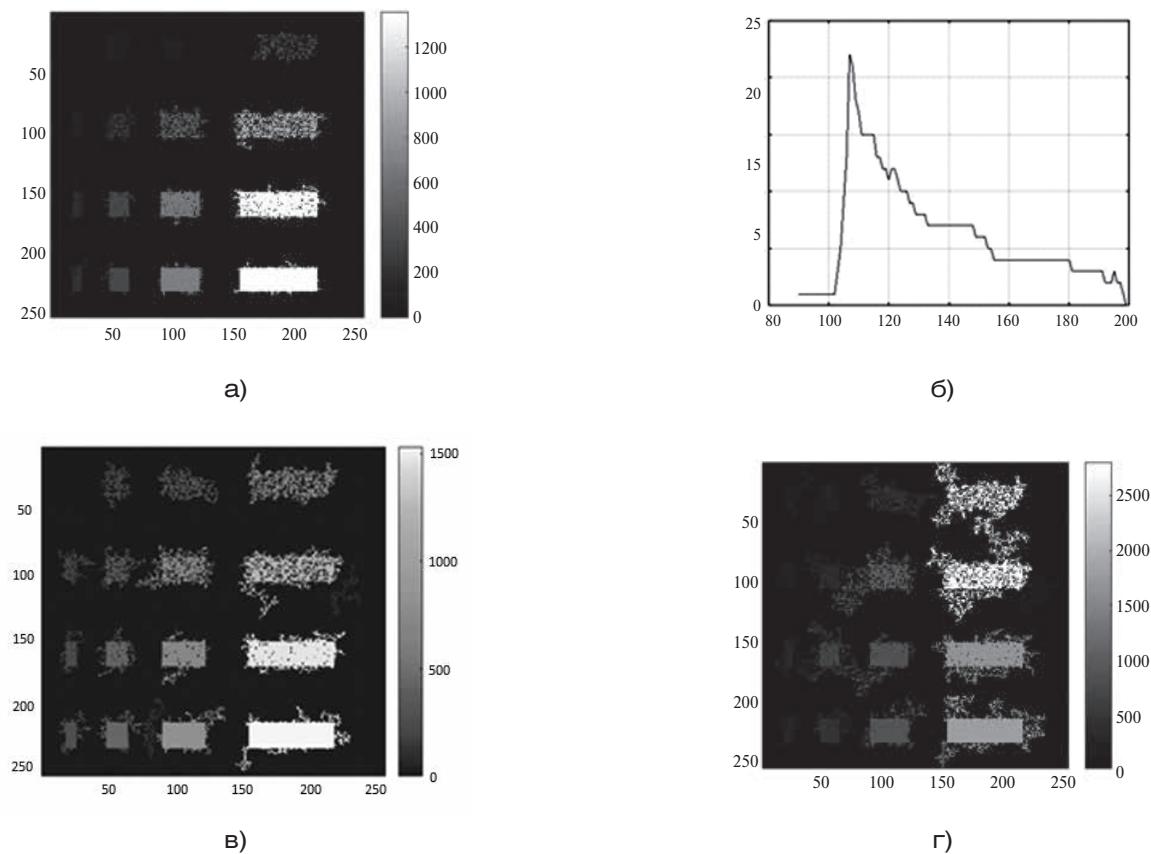


Рисунок 3. Результаты однопорогового выделения прямоугольных объектов (а, в, г) и зависимость (б) числа выделенных объектов от значения порога (яркость объектов пропорциональна их площади): а – $T = 115$, в – $T = 110$, г – $T = 108$

Figure 3. Results of the single-threshold selection of rectangular objects (а, в, г) and dependence (б) of the number of discriminated objects on the threshold value (brightness of objects is proportional to their area): а – $T = 115$, в – $T = 110$, г – $T = 108$

по границам объектов, далее эти «приклеившиеся» отростки разрастаются, а затем соседние объекты сливаются, образуя конгломераты. В этом случае число полезных объектов может уменьшиться. Однако в фоновой области появляются ложные объекты, площадь которых оказывается сравнимой с площадью полезных объектов.

Адаптивная селекция объектов по площади может быть реализована путем установки порога по результатам многопороговой обработки таким образом, чтобы получить на выходе максимальное число объектов заданной площади (или максимальное число пикселей при селекции таких объектов) с учетом требований по искажениям формы объектов [16, 18]. При этом для селекции может быть выбран диапазон площадей желаемых объектов интереса.

Если предположить как одну из самых неблагоприятных ситуаций, что значения интенсивностей в пикселях изображения взаимно независимы, а фон и объекты интереса однородны, можно рассчитать эффективность обнаружения объекта интереса на заданной площади S , включающей n

пикселей. Если порог бинаризации достаточно высок, можно пренебречь малым числом фоновых пикселей, которые «прилипают» к объекту в виде фрактальных хвостов. Тогда задача обнаружения объекта интереса в шуме решается путем регистрации k превышений порога из n возможных в области S и сравнения статистики k с порогом счета k_T (метод бинарного интегрирования) [19, 20].

В чистом виде метод бинарного интегрирования может быть реализован путем суммирования числа превышений в пределах скользящего окна заданных размеров, согласованного с размерами обнаруживаемых объектов. При каждом положении скользящего окна статистика k распределена по биномиальному закону. Вероятность достижения или превышения порога k_T статистикой k дается известной формулой [20]

$$P(k \geq k_T) = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k},$$

где C_n^k – биномиальные коэффициенты, а p – вероятность превышения порога в каждом пикселе. Эта вероятность равна p_0 в области шумового фона

и p_1 – в области объекта, причем полагается, что $p_1 > p_0$. При достаточно больших n биномиальное распределение можно аппроксимировать гауссовским и ввести дефлекцию решающей статистики $dk = \sqrt{n}(p_1 - p_0) / \sqrt{p_0(1 - p_0)}$ как отношение сдвига математического ожидания к среднеквадратичному значению шума. При бинарном интегрировании статистика k имеет математическое ожидание $m = np$ и дисперсию $\sigma^2 = np(1 - p)$. Таким образом, в области объекта меняется как математическое ожидание, так и дисперсия решающей статистики.

В случае селекции объектов по площади оказывается возможным существенно снизить вероятность p_0 и соответственно уменьшить порог бинаризации. При этом значения p_1 в области объекта селекции возрастают, что и обеспечивает повышение эффективности обработки. Однако статистика k уже не подчиняется биномиальному распределению, поскольку селектируются лишь связные объекты, а их число существенно меньше, чем число сочетаний из n по k . По аналогии со случаем бинарного интегрирования вероятность достижения или превышения порога k_T статистикой k можно записать в виде

$$P(k \geq k_T) = \sum_{k=k_T}^n B_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \quad (1)$$

где B_n^k – коэффициенты, значения которых определяют число связных объектов, состоящих из k пикселей на площади в n пикселей. Вычислить точные значения этих коэффициентов удалось пока только для одномерной модели и для малой площади объектов $n \leq 9$ [18].

Трудности расчетов вероятностей по формуле (1) препятствуют определению точного значения порога счета k_T . Однако это можно сделать путем адаптации. Для адаптивной установки порога используется селекция объектов по площади с учетом ограничений на искажение формы объектов. Эти искажения количественно характеризуются числом появляющихся ложных пикселей вокруг границ объекта и числом пропадающих полезных пикселей внутри объекта.

Результаты моделирования представлены на рис. 4, где на стандартном гауссовском шумовом фоне располагаются 49 квадратных объектов размером 16×16 пикселей (рис. 4б). Отношение сигнал/шум (относительный сдвиг математического ожидания) в каждом пикселе равно $d = 1,163$. На рис. 4в представлена зависимость общего числа связных объектов от значения порога. При селекции объектов по площади приемлемое искажение границ объектов достигается при значениях порога,

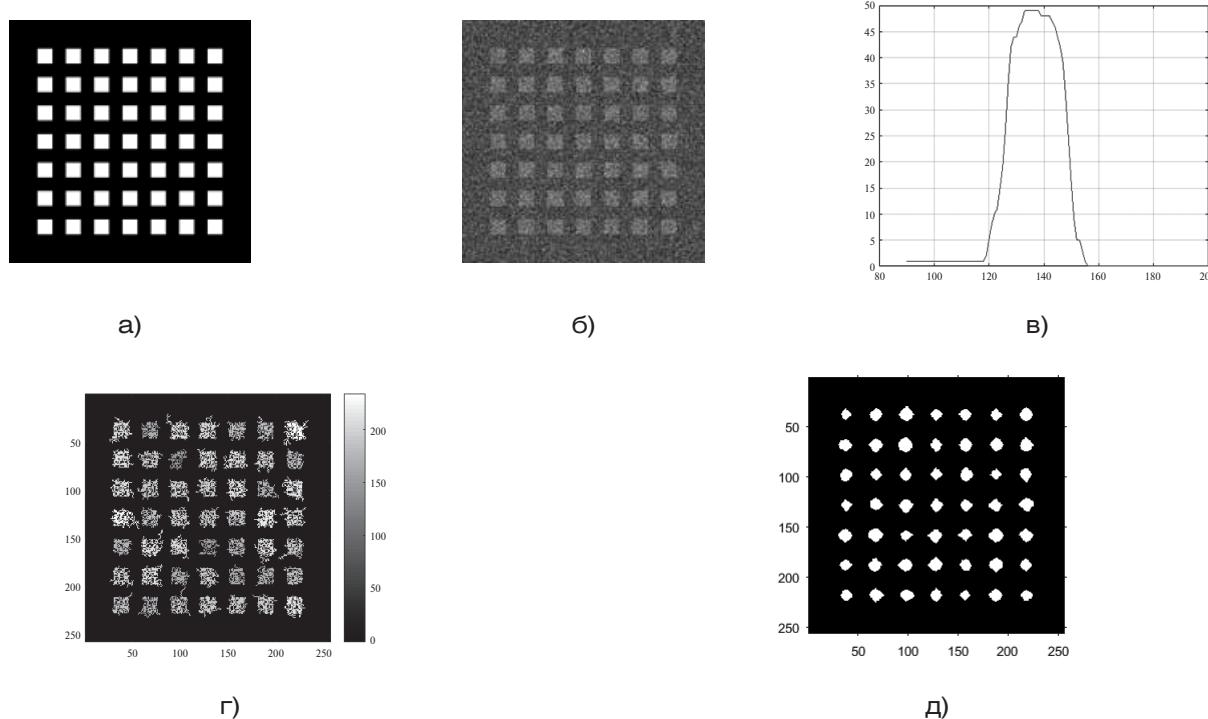


Рисунок 4. Моделирование селекции по площади квадратных объектов (а) на фоне гауссовского шума (б); в – зависимость числа селектируемых объектов от значения порога; г – результаты селекции объектов по площади; д – результаты обнаружения объектов методом бинарного интегрирования

Figure 4. Simulation of discrimination by area of square objects (a) against the background of Gaussian noise (б); в – dependence of the number of selected objects on the threshold value; г – the results of the discrimination of objects by area; д – results of the detection of objects by the method of binary integration

превышающих $T = 138$ (рис. 4г). При меньших значениях порога форма объектов искажается фрактальным шумом, который существенно фрагментирует границы.

Метод селекции объектов по площади обеспечивает неплохое выделение формы объектов даже при малых отношениях сигнал/шум, практически не уступая по помехоустойчивости методу бинарного интегрирования (рис. 4д). Хорошо заметно, что алгоритм, работающий по методу бинарного интегрирования, значительно искажает форму

объектов, обеспечивая взамен наибольшее отношение сигнал/шум при накоплении.

На рис. 5 представлены результаты селекции объектов по площади на изображении, полученном аэрофотосъемкой (рис. 5а). На рис. 5б показана зависимость числа селектируемых объектов от значения порога. Изображение (рис. 5в) получено при установке порога на максимальное число выделяемых связных объектов ($N_{\text{obj}} = 30$ при $T = 101$). Шкала интенсивностей отражает значения площадей объектов в пикселях. С увеличением порога удается

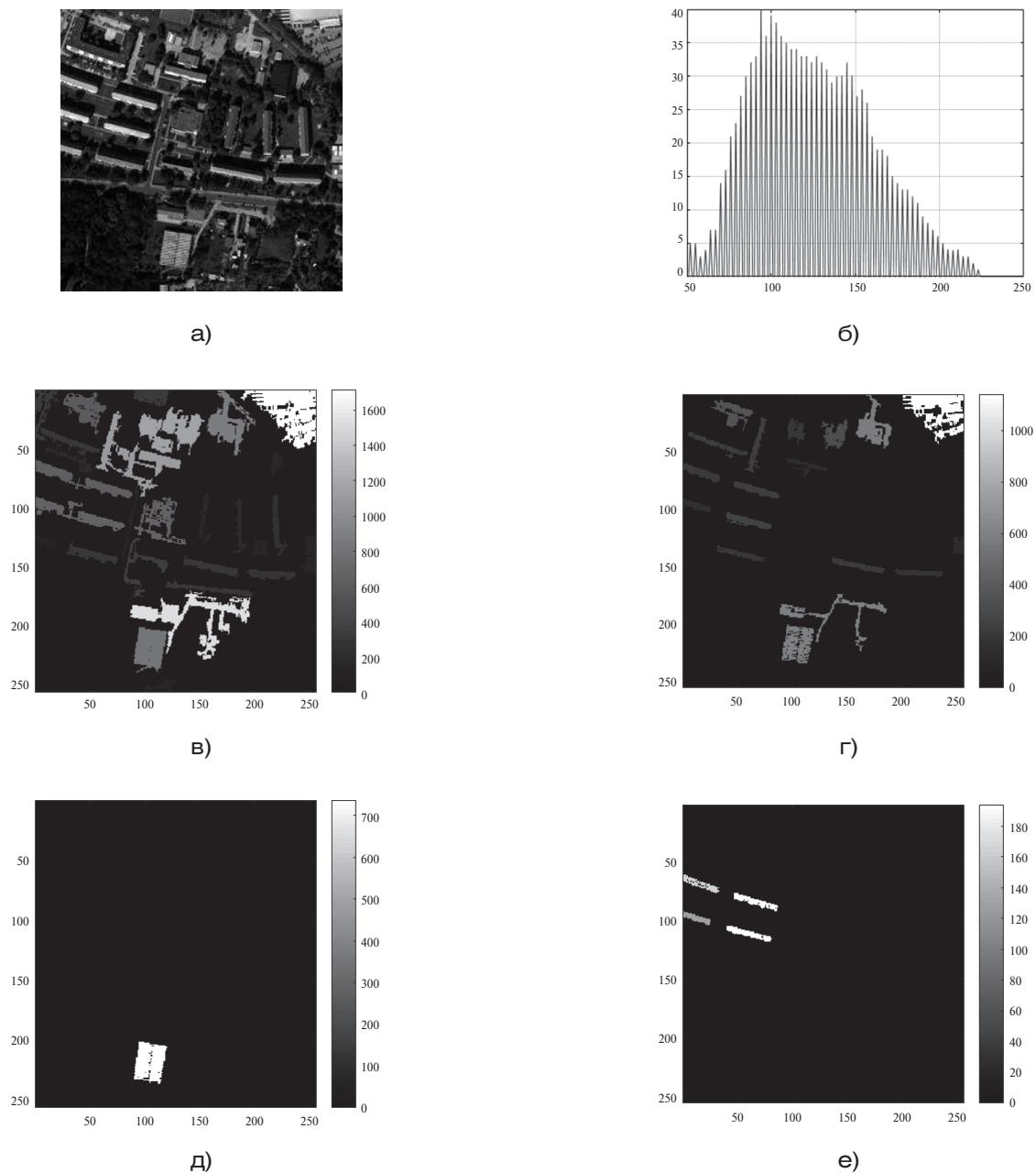


Рисунок 5. Результаты селекции объектов по площади: а – реальное изображение; б – зависимость числа связных объектов от значения порога; в – слияние объектов при низких порогах; г – пропадание объектов при высоких порогах; д, е – отсектированные объекты
 Figure 5. The results of the discrimination of objects by area: a – the real image; б – dependence of the connected objects number against the threshold value; в – merging of objects at low thresholds; г – loss of objects at high thresholds; д, е – selected objects

повысить разрешение объектов (рис. 5г), но при этом менее интенсивные объекты исчезают. Если объекты изолированы, после селекции каждый объект локализуется, т.е. определяются координаты его центра, а также другие параметры формы и текстуры.

Недостатком селекции по площади является необходимость задания параметра площади в абсолютных величинах (пикселях), что затруднительно в случаях изменения масштаба изображения. Этот метод плохо работает в случае неоднородного фона, который может давать ложные объекты, сравнимые по площади с объектами интереса (см. рис. 5в).

Селекция объектов по геометрическим инвариантам

Среди множества характеристик формы объектов интереса наиболее используемыми являются такие, которые инвариантны к масштабу изображения и вычисление которых осуществляется достаточно просто. К ним относятся отношение квадрата периметра к площади объекта (коэффициент удлинения периметра) и отношение длин осей эквивалентного эллипса (коэффициент эллиптичности).

Как известно, отношение квадрата периметра к площади имеет наименьшее значение 4π для круглых объектов. Определим коэффициент удлинения периметра объекта как $P_S = P^2/4\pi S$, где P – периметр объекта, S – его площадь. Тогда для объекта в виде круга этот коэффициент равен единице. Любые изменения формы объекта приводят к увеличению этого коэффициента. Действие шума приводит к фрагментированию границ и их удлинению, так что в шуме данный коэффициент также растет

и для объектов круглой формы. Часто удобнее оперировать с обратной величиной $1/P_S$, которая меняется от нуля до единицы и имеет максимальное единичное значение для круга.

Несмотря на то что формально минимизация коэффициента P_S обоснована для круглых объектов, она годится и для выделения других регулярных объектов с коэффициентом удлинения периметра, близким к единице, например для квадратных объектов, где этот коэффициент равен 1,273. Действие шума приводит к существенному (на один-два порядка) увеличению P_S для таких объектов за счет удлинения границ, что превышает незначительные различия в коэффициентах для разных регулярных форм объектов при отсутствии шума. При низких порогах объект сливаются с окружающим шумом, который имеет фрактальную структуру.

С ростом порога эта шумовая фрактальная структура отделяется, но одновременно возникают потери пикселей в области объекта, приводящие к фрагментированию его границ. Таким образом, как низкие, так и высокие значения порогов приводят к росту коэффициента удлинения периметра объекта при действии шума. Минимизируя этот коэффициент, можно выбрать наилучший бинарный слой (и порог бинаризации) для представления объектов круглой или иной регулярной формы (если они присутствуют в изображении) с наименьшей фрагментированностью границ.

На рис. 6 представлены результаты селекции объектов прямоугольной формы по обратному значению коэффициента P_S . При отсутствии шума величина $1/P_S$ имеет наибольшее значение, равное 0,786 для квадратных объектов. Для прямоугольных объектов эта величина имеет меньшие значения. Воздействие шума при малых отношениях

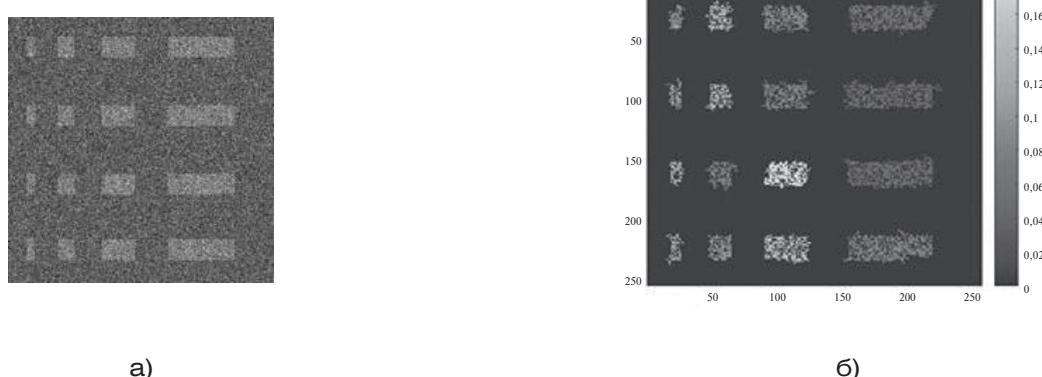


Рисунок 6. Селекция тестовых объектов по коэффициенту удлинения периметра. Яркость объектов (шкала яркостей дана справа) обратно пропорциональна коэффициенту удлинения периметра:
а – зашумленное изображение, б – результаты селекции по коэффициенту удлинения периметра
Figure 6. Selection of test objects by the perimeter elongation coefficient. The brightness of objects (the brightness scale is given on the right) is inversely proportional to the perimeter elongation coefficient:
a – noisy image, б – selection results according to the perimeter elongation coefficient

сигнал/шум (рис. 6а) приводит к разрушению формы объектов (рис. 6б) и к появлению фрактальных отростков по границам объектов. В результате периметр объекта существенно растет, а отношение площади к квадрату периметра уменьшается, чему способствует также пропадание пикселей в области объекта. На рис. 6г максимальное значение $1/P_S = 0,178$ имеет прямоугольный объект в третьей колонке, хотя, несмотря на искажения формы вследствие шума, квадратные объекты получили в среднем большие значения этой величины, чем прямоугольные. Рисунок 7 представляет результат селекции удлиненных объектов по критерию $1/P_S$ на инфракрасном изображении.

Поскольку оценка периметра объекта при действии шума становится завышенной, можно использовать вместо нее оценку главной оси A описывающего эллипса, которая хорошо отражает удлинение объекта, сглаживая при этом флюктуации вследствие фрактальности.

Рассмотрим геометрический инвариант к масштабу, равный отношению площади объекта к квадрату главной оси описывающего эллипса. В случае круга отношение квадрата диаметра к площади равно $4/\pi$, поэтому коэффициент удлинения главной оси объекта можно нормировать к этому значению, с тем чтобы для круглых объектов он равнялся единице. Таким образом, определим $P_L = A^2\pi/4S$. Для квадратного объекта этот коэффициент равен $P_L = \pi/2 = 1,571$. Чтобы получать для круглых и квадратных объектов максимальные значения по отношению к другим объектам, можно использовать обратную величину $1/P_L$, которая для квадратного объекта равна 0,637.

На рис. 8 показаны результаты селекции прямоугольных объектов при малом отношении сигнал/

шум в каждом пикселе ($d = 1,163$) и при использовании критерия селекции $1/P_L$. Как видно из рисунка, алгоритм корректно распознает квадратные объекты как объекты с максимальными значениями коэффициента $1/P_L$. Для удлиненных объектов прямоугольной формы эти значения уменьшаются.

Результаты обработки реальных изображений представлены на рис. 9, где приведены наблюдения одно и того же участка местности с самолета и со спутника. Пороги бинаризации для каждого объекта устанавливались по максимальным значениям используемого критерия с учетом предварительного удаления мелких объектов. Несмотря на существенные различия в характере сцен и статистике наблюдений, алгоритм довольно успешно селектирует одинаковые объекты, что особенно важно для решения задач сопоставления разнородных изображений.

Выводы

Задача выделения объектов интереса на изображении обычно решается путем сегментации изображения, т.е. разделения его на непересекающиеся области. Селекция объектов осуществляется с использованием различных признаков, характеризующих форму и текстуру объекта. Как правило, эти этапы осуществляются последовательно, т.е. сначала определяются «области интереса» и лишь затем анализируются свойства этих областей. Традиционные схемы сегментации напрямую не используют свойства или признаки объектов интереса.

Предложен метод адаптивной установки порога бинаризации для каждого селектируемого объекта после многопороговой (многослойной) обработки исходя из экстремума геометрического

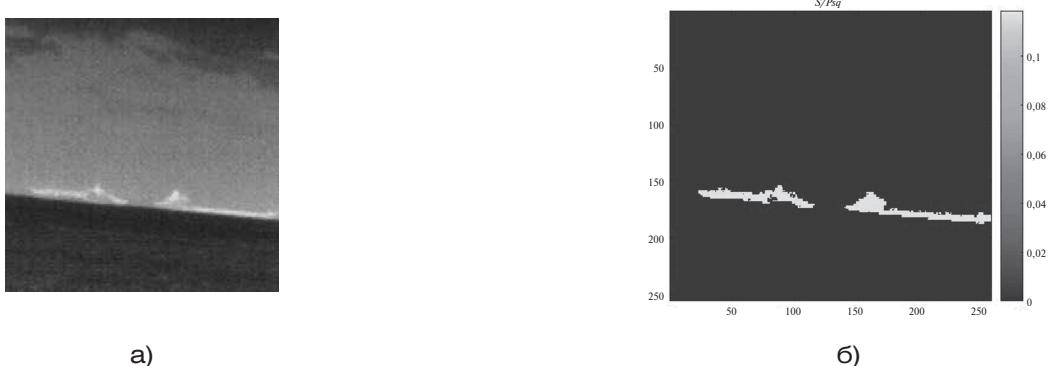


Рисунок 7. Селекция объектов на инфракрасном изображении по коэффициенту удлинения периметра: а – исходное инфракрасное изображение; б – результат селекции. Яркости объектов (шкала яркостей справа) обратно пропорциональны соответствующим коэффициентам удлинения периметра

Figure 7. Selection of objects in the infrared image by the perimeter elongation coefficient: a – the original infrared image; б – selection result. The brightness of objects (the brightness scale on the right) is inversely proportional to the corresponding perimeter elongation coefficients

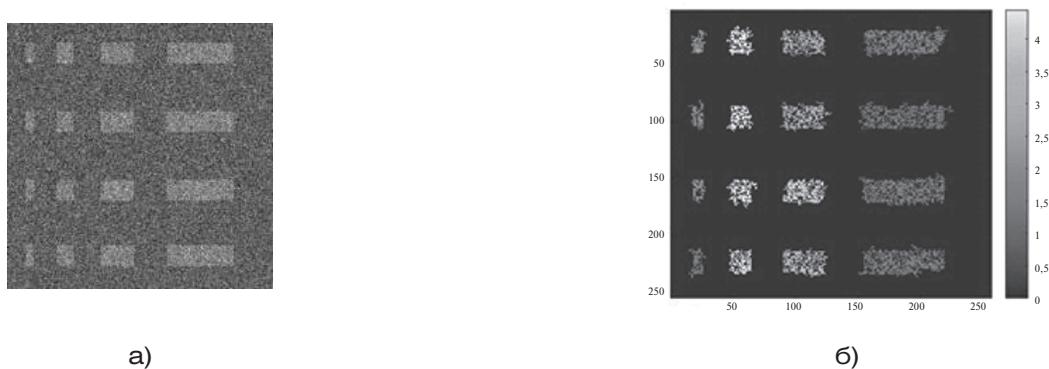


Рисунок 8. Селекция объектов по коэффициенту удлинения главной оси описывающего эллипса:
а – исходное изображение; б – выделенные объекты. Яркости объектов обратно пропорциональны
соответствующим коэффициентам удлинения главной оси описывающего эллипса
Figure 8. Selection of objects by the coefficient of elongation of the main axis of the describing ellipse:
a – the original image; б – selected objects. The brightness of objects is inversely proportional to the
corresponding elongation coefficients of the main axis of the describing ellipse

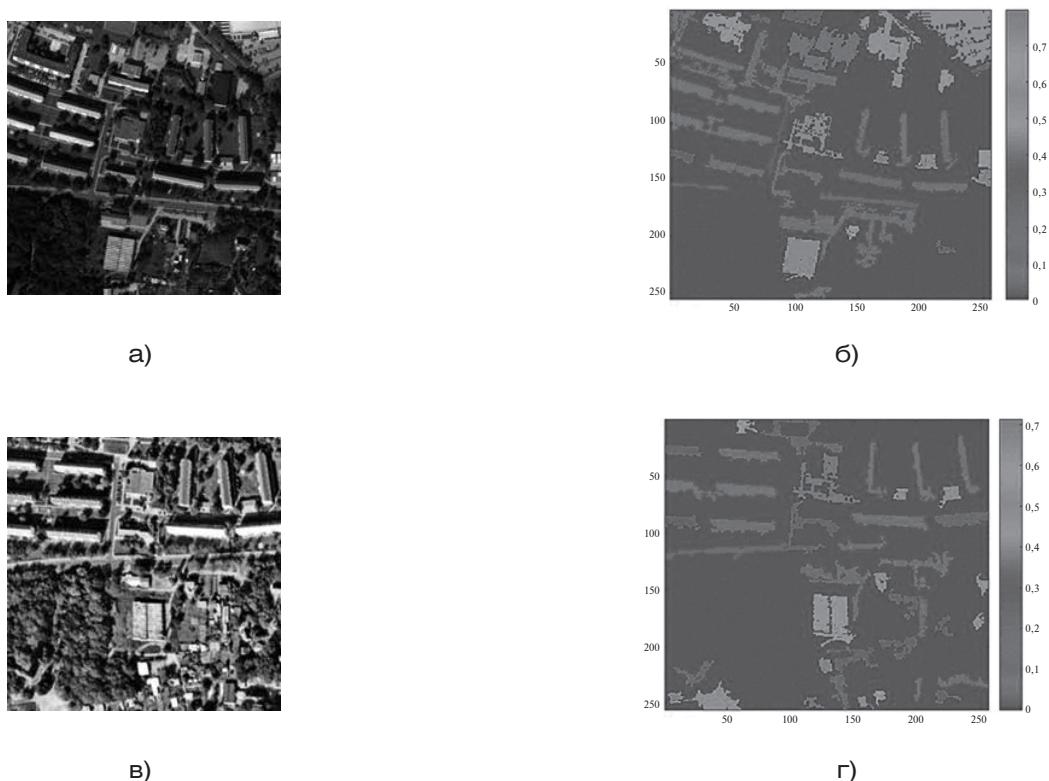


Рисунок 9. Селекция объектов на самолетном и на спутниковом изображениях по коэффициенту
удлинения оси описывающего эллипса: а – самолетное изображение; б – результат селекции;
в – спутниковое изображение; г – результат селекции. Яркости отсeлективированных объектов
обратно пропорциональны PL
Figure 9. Selection of objects in the aircraft and satellite images by the elongation coefficient of the axis
of the describing ellipse: а – aircraft image; б – selection result; в – satellite image; г – selection result.
The brightness of the selected objects is inversely proportional to PL

критерия. Таким критерием, кроме площади объекта, могут быть коэффициенты удлинения периметра или главной оси описывающего эллипса. Эти коэффициенты различаются для круглых и протяженных объектов и обеспечивают инвариантность

характеристик при изменениях масштаба изображения.

Рассмотренная методология проста, алгоритм имеет всего несколько свободных параметров, которые легко интерпретировать. Отметим два

важных параметра, которые определяют граничные условия, а именно минимальный базовый размер объекта S_b, и максимальный коэффициент PS (или коэффициент PL), который будет учитываться при многослойном контент-анализе. Разумный выбор обоих параметров позволяет ускорить алгоритм, а также устраниТЬ высокочастотные помехи, представленные многочисленными мелкими изолированными объектами, многие из которых содержат только один или несколько пикселей. Однако для надлежащего выбора обоих параметров требуется

знание типичного размера интересующего объекта, а также размера разрешения изображения, хотя на практике они часто подстраиваются в процессе испытаний.

Результаты селекции объектов на типовых зашумленных модельных и реальных телевизионных и инфракрасных изображениях показали работоспособность и эффективность селекции протяженных компактных (пятенных) и удлиненных объектов интереса с минимальными искажениями их границ при довольно низких отношениях сигнал/шум.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 16–19–00172).

ACKNOWLEDGMENT

The study was performed with the support of the Russian Science Foundation (project no. 16–19–00172).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Blaschke T. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, vol. 65, iss. 1, pp. 2–16.
2. Lang S., Baraldi A., Tiedel D., Hay G., Blaschke T. Towards a (GE)OBIA 2.0 manifesto – achievements and open challenges in information & knowledge extraction from big Earth data. Conference GEOBIA 2018, Montpellier, 18–22 June 2018, pp. 30–42.
3. Gao G. Statistical modeling of SAR images: A Survey. *Sensors*, 2010, vol. 10, pp. 775–795. DOI: 10.3390/s100100775.
4. Горелик А.Л., Кривошеев Ю.Л., Эпштейн С.С. Селекция и распознавание на основе локационной информации. М: Радио и связь, 1990. 240 с.
5. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004, 928 с.
6. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко, М.В. Осоков. А.В. Моржин. М.: Физматкнига, 2010. 689 с.
7. Zhou W., Troy A. An Object-Oriented Approach for Analyzing and Characterizing Urban Landscape at the Parcel Level. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, vol. 29, no. 11, pp. 3119–3135.
8. Gu H., Han Y., Yang Y., Li H., Liu Z., Soergel U., Blaschke T., Cui S. An efficient parallel multi-scale segmentation method for remote sensing imagery. *Remote Sensing*, 2018, no. 10(4), p. 590. DOI: 10.3390/rs10040590.
9. Cheng J., Tsai Y., Hung W., Wang S., Yang M. Fast and accurate online video object segmentation via tracking parts. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Salt Lake City, UT USA, 2018, pp. 7415–7424.
10. Wang M. A multiresolution remotely sensed image segmentation method combining rainfalls watershed algorithm and fast region merging. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing 2008, pp. 1–25.
11. Arora S., Acharya J., Verma A., Panigrahi P.K. Multilevel thresholding for image segmentation through a fast statistical recursive algorithm. *Pattern Recognition Letters* 29, 2008, pp. 119–125.
12. Yang J., Yang Y., Yu W., Feng J. Multi-threshold Image Segmentation based on K-means and Firefly Algorithm. *Proceedings of the 3rd International Conference on Multimedia Technology*. Proc. ICMT-13, 2013, Atlantis Press, pp. 134–142.
13. Priyanka P., Vasudevarao K., Sunitha Y., Sridhar B.A. Multi level fuzzy threshold image segmentation method for industrial applications. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, 2017, Vol. 12, Iss. 2, pp. 6–17. DOI: 10.9790/2834–1202030617.
14. Banimelhem O., Yahya Y. Multi-thresholding image segmentation using genetic algorithm. Proc. IPCV, 2012, pp. 1–5.
15. Cuevas E., González A., Fausto F., Zaldívar D., Pérez-Cisneros M. Multithreshold Segmentation by Using an Algorithm Based on the Behavior of Locust Swarms. Hindawi Publishing Corporation. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, article ID805357, 25 p.
16. Volkov V. Y. Extraction of extended small-scale objects in digital images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/ W6, 2015, pp. 87–93 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W6/87/2015/> (дата обращения: 23.04.2019).
17. Bogachev M., Volkov V., Markelov O., Trizna E., Baydamshina D., Melnikov V., Murtazina R., Zelenikhin P., Sharafutdinov I., Kayumov A. Fast and simple tool for the quantification of biofilm-embedded cells sub-populations from fluorescent microscopic images. *PLoS One*, 2018, vol. 13, iss. 3, p. e0192022 [Электронный ресурс]. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0193267> (дата обращения: 26.04.2019).
18. Волков В.Ю. Адаптивное выделение мелких объектов на цифровых изображениях // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 1. С. 17–28.

19. Волков В.Ю. Адаптивные и инвариантные алгоритмы обнаружения объектов на изображениях и их моделирование в Matlab. СПб.: М.; Краснодар: Лань, 2014. 191 с.
20. Клюев Н.Ф. Обнаружение импульсных сигналов с помощью накопителей дискретного действия. М.: Советское радио, 1963. 121 с.

REFERENCES

1. Blaschke T. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, vol. 65, iss. 1, pp. 2–16.
2. Lang S., Baraldi A., Tiedel D., Hay G., Blaschke T. Towards a (GE)OBIA 2.0 manifesto – achievements and open challenges in information & knowledge extraction from big Earth data. *Conference GEOBIA 2018*, Montpellier, 18–22 June 2018, pp. 30–42.
3. Gao G. Statistical modeling of SAR images: A Survey. *Sensors*, 2010, vol. 10, pp. 775–795. DOI: 10.3390/s100100775.
4. Gorelik A. L., Krivosheev Yu. L., Epshtein S. S. *Selektsiya i raspoznavanie na osnove lokatsionnoi informatsii* [Discrimination and recognition based on location information], Moscow, Radio i svyaz Publ., 1990. 240 p. (In Russian).
5. Forsait D., Pons Zh. *Kompyuternoe zrenie. Sovremennyi podkhod* [Computer vision. Modern approach]. Moscow: Viljams Publ., 2004, 928 p. (In Russian).
6. Vizilter Yu. V., Zheltov S. Yu., Bondarenko A. V., Ososkov M. B., Morzhin A. V. *Obrabotka i analiz izobrazhenii v zadachakh mashinnogo zreniya* [Image processing and analysis in computer vision problems]. Moscow, Fizmatkniga Publ., 2010, 689 p. (In Russian).
7. Zhou W., Troy A. An Object-Oriented Approach for Analyzing and Characterizing Urban Landscape at the Parcel Level. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, vol. 29, no. 11, pp. 3119–3135.
8. Gu H., Han Y., Yang Y., Li H., Liu Z., Soergel U., Blaschke T., Cui S. An efficient parallel multi-scale segmentation method for remote sensing imagery. *Remote Sensing*, 2018, no. 10(4), p. 590. DOI: 10.3390/rs10040590.
9. Cheng J., Tsai Y., Hung W., Wang S., Yang M. Fast and accurate online video object segmentation via tracking parts. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Salt Lake City, UT USA, 2018, pp. 7415–7424.
10. Wang M. A multiresolution remotely sensed image segmentation method combining rainfalls watershed algorithm and fast region merging. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B4. Beijing 2008, pp. 1–25.
11. Arora S., Acharya J., Verma A., Panigrahi P. K. Multilevel thresholding for image segmentation through a fast statistical recursive algorithm. *Pattern Recognition Letters* 29, 2008, pp. 119–125.
12. Yang J., Yang Y., Yu W., Feng J. Multi-threshold Image Segmentation based on K-means and Firefly Algorithm. *Proceedings of the 3rd International Conference on Multimedia Technology*. Proc. ICMT-13, 2013, Atlantis Press, pp. 134–142.
13. Priyanka P., Vasudevarao K., Sunitha Y., Sridhar B. A. Multi level fuzzy threshold image segmentation method for industrial applications. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, 2017, vol. 12, iss. 2, pp. 6–17. DOI: 10.9790/2834–1202030617.
14. Banimelhem O., Yahya Y. Multi-thresholding image segmentation using genetic algorithm. *Proc. IPCV*, 2012, pp. 1–5.
15. Cuevas E., González A., Fausto F., Zaldívar D., Pérez-Cisneros M. Multithreshold Segmentation by Using an Algorithm Based on the Behavior of Locust Swarms. Hindawi Publishing Corporation. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, article ID805357, 25 p.
16. Volkov V. Y. Extraction of extended small-scale objects in digital images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-5/ W6, 2015, pp. 87–93. Available at: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W6/87/2015/> (accessed 23.04.2019).
17. Bogachev M. Volkov V., Markelov O., Trizna E., Baydamshina D., Melnikov V., Murtazina R., Zelenikhin P., Sharafutdinov I., Kayumov A. Fast and simple tool for the quantification of biofilm-embedded cells sub-populations from fluorescent microscopic images. *PLoS One*, 2018, vol. 13, iss. 3, p. e0192022. Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0193267> (accessed 26.04.2019).
18. Volkov V. Yu. Adaptive Extraction of Small Objects in Digital Images. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika*, 2017, no. 1, pp. 17–28. (In Russian).
19. Volkov V. Yu. *Adaptivnye i invariantnye algoritmy obnaruzheniya ob'ektov na izobrazheniyakh i ikh modelirovaniye v Matlab* [Adaptive and invariant algorithms for detecting objects in images and their modeling in Matlab]. St. Petersburg – Moscow – Krasnodar: Lan Publ., 2014, 191 p. (In Russian).
20. Klyuev N. F. *Obnaruzhenie impulsnykh signalov s pomoshchyu nakopitelei diskretnogo deistviya* [Detection of pulse signals using discrete-variable storages]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1963, 121 p. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Волков Владимир Юрьевич, д.т.н., профессор, начальник Учебно-методического центра, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А., тел.: +7 (905) 280-87-81, e-mail: volkov_vju@radar-mms.com.

Богачев Михаил Игоревич, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник кафедры Радиотехнических систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, тел.: +7 (911) 721-45-78, e-mail: roges@yandex.com.

Маркелов Олег Александрович, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, тел.: +7 (921) 989-79-84, e-mail: OAMarkelov@etu.ru.

AUTHORS

Vladimir Yu. Volkov, Dr. Sci. (Engineering), professor, chief of the department, Research and Production Enterprise Radar mms JSC, 37A, Novoselkovskaya ulitsa, Saint-Petersburg, 197375, Russia, tel. +7 (905) 280-87-81, e-mail: volkov_vju@radar-mms.com.

Mikhail I. Bogachev, Ph.D. (Engineering), associate professor, leading researcher at the Radio Systems Department, Saint-Petersburg State Electrotechnical University, 5, ulitsa Professora Popova, Saint Petersburg, 197376, Russia, tel.: +7 (911) 721-45-78, e-mail: rogex@yandex.com.

Oleg A. Markelov, Ph.D. (Engineering), associate professor, Saint-Petersburg State Electrotechnical University, 5, ulitsa Professora Popova, Saint Petersburg, 197376, Russia, tel.: +7 (921) 989-79-84, e-mail: OAMarkelov@etu.ru.

Поступила 18.04.2019; принята к публикации 22.04.2019; опубликована онлайн 27.05.2019.
Submitted 18.04.2019; revised 22.04.2019; published online 27.05.2019.

ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

К рассмотрению принимаются нигде не опубликованные ранее рукописи статей с оригинальными результатами теоретических и экспериментальных исследований в области радиоэлектроники, а также научные обзоры. Минимальный объем статьи – 18000 печатных знаков (с пробелами), максимальный объем статьи – 23000 печатных знаков (с пробелами), включая формулы, иллюстрации, таблицы.

Обязательными являются следующие элементы статьи:

- **Тематическая рубрика журнала**, к которой должна быть отнесена статья.
- **Индекс УДК**.
- **Название статьи**, максимально конкретное и информативное.
- **Ф.И.О. всех авторов** (полностью).
- **Информация об авторах**: регалии; место работы (полное и сокращенное название организации, почтовый адрес с указанием города и почтового индекса), должность; электронный адрес; телефон; ORCID. Если авторов несколько, то информация должна быть представлена по каждому из них.
- **Аннотация статьи**. В аннотации подчеркивается новизна и актуальность темы (без повтора заглавия статьи в тексте аннотации). Аннотация статьи должна быть информативной и подробной, описывать методы и главные результаты исследования. Из аннотации должно быть ясно, какие вопросы поставлены для исследования и какие ответы на них получены. Предпочтительна структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты/обсуждение, заключение/выводы. Объем аннотации составляет 100–200 слов.
- **Ключевые слова** на русском и английском языках. Должны отражать основное содержание статьи, но, по возможности, не повторять ее название. Рекомендуемый объем – 3–6 слов или коротких словосочетаний.
- **Основной текст статьи**. Следует соблюдать единообразие терминов, а также единообразие в обозначениях, системах единиц измерения, номенклатуре. Следует избегать излишних сокращений, кроме общеупотребительных. Если сокращения все-таки используются, то они должны быть расшифрованы в тексте при первом упоминании.
- **Список литературы**. Должен в достаточной мере отражать современное состояние исследуемой области и не быть избыточным. Должен содержать ссылки на доступные источники. Не цитируются тезисы, учебники, учебные пособия, диссертации без депонирования. Допустимый объем самоцитирования автора – не более 20% от источников в списке литературы.
- **Список иллюстраций**. Должен располагаться в конце статьи и содержать названия иллюстраций и подписи, размещенные на рисунке.

Правила оформления статей

Материалы статьи представляются для публикации в электронном виде.

В состав электронной версии статьи должны входить текстовая часть в формате MS Word (формулы в MathType), а также иллюстрации в виде отдельных графических файлов (каждый файл должен содержать один рисунок).

Статья представляется в итоговом варианте, т. е. не предполагает существенных авторских изменений и дополнений, а также не содержит исправлений, отображаемых на полях или в тексте работы.

Графический материал

Все иллюстрации должны быть черно-белыми.

Иллюстрации для каждой статьи должны находиться в отдельной папке с названием статьи; название файла должно включать номер рисунка. Каждый файл должен содержать только один рисунок.

Параметры иллюстраций:

- форматы *.tif или *.eps;
- цветовая модель Grayscale (Black 95%), разрешение 300 dpi при 100% величине;
- цветовая модель Bitmap, разрешение не ниже 600 dpi;
- толщины линий не менее 0,5 point;
- не следует использовать точечные закраски в программах работы с векторной графикой, таких как Noise, Black&white noise, Top noise;
- не следует добавлять сетку или серый фон на задний план графиков и схем;
- желательно иллюстрации предоставлять в двух вариантах (первый – со всеми надписями и обозначениями, второй – без текста и обозначений);
- все надписи на рисунках и названия рисунков обязательно (!) должны быть набраны текстом и располагаться на отдельной странице в текстовой части статьи.

Текст статьи

Текст должен быть в формате MS Word, набран через двойной интервал шрифтом Times New Roman, размер шрифта – 12 пунктов.

Не следует вводить больше одного пробела подряд (в том числе при нумерации формул). Используйте абзацный отступ и табуляцию.

Подзаголовки должны быть без нумерации.

Таблицы представляются в формате MS Word.

Их следует располагать в тексте непосредственно после ссылки на таблицу.

В тексте статьи должны быть ссылки на все рисунки и таблицы. Если в статье один рисунок и/или таблица, номер не ставится. Рисунки с цифро-буквенной нумерацией обозначаются в тексте без запятой и пробела (например, рис. 1а).

В шапке таблицы пустых ячеек быть не должно.

В таблице не должно быть графы с порядковым номером. Если нумерация строк необходима, то порядковый номер указывается непосредственно перед текстом.

При отсутствии данных в ячейках должны быть прочерки (т. е. пустых ячеек быть не должно).

Подписи к рисункам должны содержать расшифровку всех обозначений, использованных на рисунке.

На отдельном листе в конце статьи должны быть набраны названия рисунков с подписями, а также текст, размещенный на рисунках.

Формулы и буквенные обозначения

Все формулы должны быть набраны только (!) в математическом редакторе MathType с настройками строго (!) по умолчанию. Не допускается набор из составных элементов (часть – текст, часть – математический редактор). Не допускается также вставка формул в виде изображений. Формулы располагают по месту в тексте статьи.

По возможности следует избегать «многоэтажных» формул. В частности, в сложных формулах экспоненту рекомендуется представлять как «*exp*».

Дроби предпочтительно располагать отдельной строкой, числитель от знаменателя отделять горизонтальной чертой.

В десятичных дробях для отделения целой части используется запятая (например, 10,5).

В качестве знака умножения используется символ точки (·), при переносе формулы в качестве знака умножения следует использовать символ крест (×).

Знак умножения в формулах ставится только (!) перед цифрой и между дробями.

В формулах и тексте скалярные величины, обозначаемые латинскими буквами, набираются курсивом, обозначаемые греческими буквами – прямым шрифтом. Для обозначения векторных величин используется прямой полужирный шрифт, стрелка вверху не ставится.

Одиночные буквы или символы, одиночные переменные или обозначения, у которых есть только верхний или только нижний индекс, единицы измерения и цифры в тексте, а также простые математические и химические формулы следует набирать в текстовом режиме без использования внедренных рамок (т. е. без использования математических редакторов).

Слова «минус» и «плюс» перед цифрами обозначаются знаками (например, +4; -6).

Размерности

Размерности отделяются от числа пробелом, кроме градусов, процентов, промилле.

Для сложных размерностей допускается использование как отрицательных степеней, так и скобок.

Главное условие – соблюдение единообразия написания одинаковых размерностей по всему тексту и в иллюстрациях.

При перечислении, а также в числовых интервалах размерность приводится только после

последнего числа (например, 18–20 кг), за исключением угловых градусов.

Числовой диапазон оформляется коротким тире без пробелов (например, 18–20).

Размерности переменных пишутся после их обозначений через запятую, а не в скобках.

Список использованных источников

В журнале принимается Ванкуверская система цитирования – последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их упоминания в тексте, таблицах и рисунках. Единый список литературы оформляется также в порядке упоминания в тексте.

На все работы, включенные в список литературы, должна быть ссылка в тексте.

Допустимый объем самоцитирования автора не более 20% от источников в списке литературы.

Не цитируются:

- тезисы, учебники, учебные пособия;
- диссертации без депонирования.

Единый список литературы размещают в конце текста статьи и озаглавливают «Список использованных источников».

В тексте статьи ссылки приводят в квадратных скобках: [1–5] или [1, 3, 5].

Источники приводят на языке оригинала. Русские – на русском, англоязычные – на английском.

Пример оформления статьи из периодического издания:

Таран П.П., Иванов А.А. Глобализация и трудовая миграция: необходимость политики, основанной на правах человека // Век глобализации. 2010. № 1. С. 66–88.

Пример оформления книги:

Костылева Л.В. Неравенство населения России: тенденции, факторы, регулирование. М.: ИСЭРТ РАН, 2011. 200 с.

Пример оформления электронного источника:

Костылева Л.В. Неравенство населения России: тенденции, факторы, регулирование [Электронный ресурс]. М., 2011. 30 с. URL: <http://elsevierscience.ru/> (дата обращения: 10.11.2018).

Подписи к рисункам

На отдельном листе должны быть набраны (в порядке упоминания в тексте) порядковый номер рисунка, его название, а также все надписи, расположенные на рисунке. Подписи к рисункам должны содержать расшифровку всех обозначений, использованных на рисунке.

Комплект предоставляемых материалов

Комплект материалов статьи должен включать электронную версию статьи, иллюстрации в виде отдельных графических файлов, экспертное заключение о разрешении публикации материалов в открытом доступе.

Материалы следует загружать через электронную форму на сайте www.radioprom.org.

RULES FOR SUBMITTING ARTICLES

Manuscripts with original results of theoretical and experimental research in the field of electronics and scientific reviews with no publishing record are accepted for consideration. The minimal article length is 18000 printed characters (with spaces), the maximum article length is 23000 printed characters (with spaces), including formulas, illustrations, tables.

The mandatory elements of the articles are the following:

- Thematic heading of magazine to which article should be carried.
- Index of the universal decimal classification.
- The name of article, at the most specific and informative.
- The information on authors: full name, science degree; place of job (the full and shorthand name of the organization, the post address with the indication of city and the postal index), a position; the electronic address; phone; ORCID. If there're few authors then the information should be presented on each of them.
- The summary of article. Novelty and a urgency of subject matter (without repetition of the title of article in the text of the summary) should be emphasized in the summary. The summary of article have to be informative and detailed, describe methods and the main results of research. The summary has to cover what questions are put for research and the answers to them are received. The structure of the summary has to repeat structure of article and including introduction, objectives and problems, methods, results/discussions, the conclusion/conclusions is preferential. The volume of the summary makes 100–200 words.
- Key words. Should reflect the main content of the article, but if possible not to repeat its name. The recommended amount – 3–6 words or short phrases.
- The main text of the article. The uniformity of terms should be observed as well as uniformity in the notation, systems of units, nomenclature. Avoid unnecessary abbreviations commonly used in addition. If the abridgement is still used then it must be transcribed in the text at the first mention.
- References. Must adequately reflect the current state of the study area and not be excessive. Must contain references to available sources. Not quoted theses, textbooks, manuals, thesis without deposit. The allowable amount of self-citation of the author should not exceed 20% of the sources in the bibliography.
- The list of illustrations should be placed down in the end of article and contain names of illustrations and the signatures placed in picture.

Rules for articles

Materials of the Articles are submitted for publication in electronic form.

The electronic version of the paper should include the text portion in MS Word format (formulas in Math-Type), as well as illustrations as separate image files (each file should contain one figure).

The article appears in the final version and copyright does not involve significant changes and additions, as well as does not include patches that are displayed in the fields or in the text of the work.

Graphical material

All illustrations should be in black and white. Illustrations for each article must be in a separate folder with the title of the article; File name should include the figure number. Each file must contain only one drawing.

Illustrations parameters:

- formats *.tif or *.eps;
- color model Grayscale (Black 95%), the resolution of 300 dpi at 100% value;
- color model Bitmap, resolution of at least 600 dpi;
- Lines's thickness of not less than 0,5 point;
- It is not necessary to use dot shadings in programs of work with vector graphics, such as Noise, Black*white noise, Top noise;
- It is not necessary to add a grid or a grey background on a background of charts and diagrams;
- It is desirable to provide the illustrations in two versions (the first – with all the inscriptions and symbols, the second – without text and symbols);
- All signs in the figures and the names of figures is obligatory (!) Should be typed in the text and placed on a separate page in the text of the article.

The text of article

The text should be in MS Word format; typed double-spaced; font Times New Roman, font size – 12 points.

Do not enter more than one space in a row (including the numbering of formulas). Use indentation and tabs.

Subtitles should be without numbering.

Tables submitted in MS Word format. They should be placed in the text immediately following the reference to the table.

The text of the article should be a reference for all figures and tables. If an article of one figure and / or table number is not assigned. Figures alphanumeric numbering are indicated in the text without a comma and a space (for example, Fig. 1a).

In the header of the table empty cells should not be. The table should not have graphs with a serial number.

If line numbering is needed, the serial number is indicated immediately before the text.

In the absence of data in the cells must be dashes (empty cells should not be).

Captions should include decoding of symbols used in the figure.

On a separate sheet at the end of the article should be typed in the names of images with captions, and also the text that appears in the figures.

Formulas and letter designations

All formulas should be typed only (!) In MathType mathematical editor. Not allowed set of constituents (Part – text part – mathematical editor). There can be no insert formulas in the form of images. Formula for a If possible, avoid «multi-storey» formulas. In particular, complex formulas recommended exponent of as «exp».

Fractions are preferably arranged separately, the numerator by the denominator separated by a horizontal line.

In decimal fractions to separate the integer part of a comma (e.g. 10,5).

As a sign of multiplication using the dot (·), when transferring the formula should use the cross symbol (x) as a multiplication sign.

The multiplication sign in the formulas is put only (!) before a figure between fractions.

In the formulas and text scalar quantities, denoted by Latin letters, italicized, denoted by Greek letters – font.

To indicate vector quantities used straight bold, arrow at the top is not put.

Single letters or symbols, single variables or symbols that have only the upper or only the lower the index, units, and figures in the text, as well as simple mathematical and chemical formulas should be typed in text mode without the use of embedded frames (i.e., without the use of Mathematical editors).

The words «minus» and «plus» to the numbers indicated by signs (e.g., 4, -6).

Dimensions

Dimensions are separated from the number by a space, except degrees, percent, per mille.

For complex dimensions allowed as the negative powers, and parentheses. The main condition – that the consistency of writing the same dimensions throughout the text and illustrations.

In the listing, as well as the dimension of the numerical ranges given only after the last day (e.g. 18–20 kg) except angular degrees.

A numeric range is made short dash without spaces (for example, 18–20).

The dimensions of the variables are written after the notation, separated by commas, but not in parentheses.

References

The Vancouver citation system is used in the journal. It means consistent numerical style: links are numbered in the course of their appearance in the text, tables and figures.

A single list of references is also executed in the order mentioned in the text.

All work included in the list of references should be referenced in the text.

The allowable amount of self-citation is not the author of more than 20% of the sources in the references.

Do not quoted:

- theses, textbooks, teaching aids;
- dissertation without deposit.

The text of the article links lead brackets: [1–5] or [1, 3, 5].

References should indicate in the original language.

Signatures to pictures

On a separate sheet should be typed (in order of appearance in the text) the serial number of the picture, its name, as well as all the inscriptions located in the picture. Captions should include decoding of symbols used in the figure.

The complete set of provided materials

The complete set of materials of article should include the electronic version of article; illustrations in the form of separate graphic files, expert opinion on the permission of the materials publication in open access.

Materials should be submit online www.radioprom.org.

