

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**



*Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности*

*Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля*

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

*Микро- и нанoeлектроника.
Физика конденсированного состояния*

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств*

Мировоззренческие основы технологии и общества



ISSN 2500-316X

Э Л Е К Т Р О Н Н О Е С Е Т Е В О Е И З Д А Н И Е

РОССИЙСКИЙ технологический журнал

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**

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

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

**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2021, том 9, № 1**

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2021, Vol. 9, No. 1**

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1>

<https://www.rtfj-mirea.ru>



**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2021, том 9, № 1**

Дата опубликования 29 января 2021 г.

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2021, Vol. 9, No. 1**

Publication date January 29, 2021.

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

The peer-reviewed scientific and technical journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Периодичность: 6 раз в год.

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

Six issues a year are published.

The journal was founded in December 2013. The name was «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»
119454, РФ, г. Москва, пр-кт Вернадского, д. 78.

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution
of Higher Education

«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia.

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

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

Главный редактор:

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

Editor-in-Chief:

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

Редакция:

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

Editorial staff:

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

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

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

Редакционная коллегия

Кудж Станислав Алексеевич	профессор, д.т.н., ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788 , rector@mirea.ru
Банис Юрас Йонович	профессор, хабилитированный доктор наук, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва, Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
Боков Алексей Алексеевич	старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 , abokov@sfu.ca
Буслаева Татьяна Максимовна	профессор, д.х.н., РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru
Буш Александр Андреевич	профессор, д.т.н., директор Института материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, http://orcid.org/0000-0003-3990-9847 , bush@mirea.ru
Вахрушев Сергей Борисович	профессор, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (РАН), профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Голованова Наталья Борисовна	профессор, д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru
Гуляев Юрий Васильевич	академик РАН, член Президиума РАН, профессор, д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия, Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
Жуков Дмитрий Олегович	профессор, д.т.н., заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
Кимель Алексей Вольдемарович	профессор, к.ф.-м.н., Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
Кондратенко Владимир Степанович	профессор, д.т.н., заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru
Крамаров Сергей Олегович	профессор, д.ф.-м.н., Сургутский государственный университет, Сургут, Россия, Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513 , mavoo@yandex.ru
Мишина Елена Дмитриевна	профессор, д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, http://orcid.org/0000-0003-0387-5016 , mishina@mirea.ru
Пасечник Сергей Вениаминович	профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, http://orcid.org/0000-0002-6050-2761 , pasechnik@mirea.ru
Перно Филипп	профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция, Scopus Author ID 7003429648, philippe.pemod@ec-lille.fr
Романов Михаил Петрович	профессор, д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Савиных Виктор Петрович	член-корр. РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
Соколов Виктор Васильевич	профессор, д.ф.-м.н., советник по научной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru
Тимошенко Андрей Всеволодович	профессор, д.т.н., проректор по учебной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru
Фетисов Юрий Константинович	профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры наноэлектроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru
Харин Юрий Семенович	член-корр. НАН Беларуси, профессор, д.ф.-м.н., директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by
Цветков Виктор Яковлевич	профессор, д.т.н., советник ректората РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru

Editorial Board

Stanislav A. Kudzh	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788 , rector@mirea.ru
Juras Banis	Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania, Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
Alexei A. Bokov	Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 , abokov@sfu.ca
Tatyana M. Buslaeva	Dr. Sci. (Chemistry), Professor, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru
Alexander A. Bush	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Materials of Solid State Electronics, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, http://orcid.org/0000-0003-3990-9847 , bush@mirea.ru
Sergey B. Vakhrushev	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences (RAS), Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Nataliya B. Golovanova	Dr. Sci. (Economics), Professor, Deputy First Vice-Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru
Yury V. Gulyaev	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia, Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
Dmitry O. Zhukov	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
Alexey V. Kimel	PhD (Phys.-Math.), Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
Vladimir S. Kondratenko	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru
Sergey O. Kramarov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Surgut State University, Surgut, Russia, Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513 , mavoo@yandex.ru
Elena D. Mishina	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, http://orcid.org/0000-0003-0387-5016 , mishina@mirea.ru
Sergey V. Pasechnik	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, http://orcid.org/0000-0002-6050-2761 , pasechnik@mirea.ru
Philippe Pernod	Professor, Dean of Research, University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France, Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Mikhail P. Romanov	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Cybernetics, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Viktor P. Savinykh	Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
Viktor V. Sokolov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Adviser on Scientific Work of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru
Andrey V. Timoshenko	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Vice Rector for Academic Affairs of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru
Yury K. Fetisov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Nanoelectronics, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru
Yury S. Kharin	Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus, Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by
Viktor Ya. Tsvetkov	Dr. Sci. (Engineering), Professor, Councilor of the Administration of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАТИКА. ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Томашевская В.С., Яковлев Д.А.** 7
Способы обработки неструктурированных данных

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Костин М.С., Ярлыков А.Д.** 18
Радиоволновая технология резонансной газосенсорной СВЧ-телеметрии
- Куликов Г.В., Лелюх А.А.** 29
Влияние амплитудного и фазового разбаланса квадратур на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Сигов А.С., Минаева О.А., Аневский С.И., Лебедев А.М., Минаев Р.В.** 38
Метрологические исследования характеристик многослойных поверхностных покрытий с использованием синхротронного излучения

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

- Иванов В.С., Гладкий Д.А., Воруничев Д.С.** 48
LPKF-LDS-технология производства трехмерных схем на пластиках
- Курбанисмаилов З.М., Тарланов А.Т., Матяш Е.Д., Карбова Е.С.** 58
Адаптивная система визуализации электромагнитного поля рассеяния летательных аппаратов
- Макаров В.Н., Шмелева Д.В., Боос Н.А.** 73
Фантом для контроля процесса термоабляции

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Лебо И.Г.** 79
О моделировании самофокусировки светового пучка в плазме при облучении мишеней мощным ультрафиолетовым лазером

CONTENTS

INFORMATION SYSTEMS. COMPUTER SCIENCES. ISSUES OF INFORMATION SECURITY

- Tomashevskaya V.S., Yakovlev D.A.*** 7
Research of unstructured data interpretation problems

MODERN RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

- Kostin M.S., Yarlykov A.D.*** 18
Radiowave technology of resonant gas-sensor microwave telemetry
- Kulikov G.V., Lelyukh A.A.*** 29
Influence of amplitude and phase imbalance of quadratures on the noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation

MICRO- AND NANOELECTRONICS. CONDENSED MATTER PHYSICS

- Sigov A.S., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Lebedev A.M., Minaev R.V.*** 38
Metrological studies of the characteristics of multilayer surface coatings using synchrotron radiation

ANALYTICAL INSTRUMENTATION AND TECHNOLOGY

- Ivanov V.S., Gladky D.A., Vorunichev D.S.*** 48
LPKF-LDS technology for the production of three-dimensional schemes on plastics
- Kurbanismailov Z.M., Tarlanov A.T., Matyash E.D., Karbova E.S.*** 58
Adaptive system for visualization of the electromagnetic scattering field of aircraft
- Makarov V.N., Shmeliova D.V., Boos N.A.*** 73
Phantom to control the thermal ablation process

MATHEMATIC MODELING

- Lebo I.G.*** 79
About the modeling of light beam self-focusing in plasma at the irradiation of the target by power UV laser

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-7-17>



УДК 004.6

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Способы обработки неструктурированных данных

В.С. Томашевская[@],
Д.А. Яковлев

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: tomashevskaya@mirea.ru

Термин «неструктурированные данные» подразумевает данные, неупорядоченные и произвольные по форме, однако этот тип информации все же обладает определенной структурой. На сегодняшний день существует большое разнообразие данных и, как следствие, появляется необходимость их интерпретировать. Среди задач интерпретации можно выделить прогнозирование, классификацию, кластеризацию, ассоциацию, поиск последовательностей, визуализацию данных, анализ отклонений. Сложность обработки заключается в том, что сами данные могут различаться не только с точки зрения формата, но и с точки зрения своей структуры. Одной из ключевых задач при работе с неструктурированными данными является поиск и выявление закономерностей с целью их понимания и разработки шаблонов заполнения. В работе проводится анализ правил оформления библиографических источников с целью выявления общих закономерностей. Затрагиваются понятия структурированных и неструктурированных данных. Рассматриваются существующие направления работы с неструктурированными данными и способы их обработки, в частности, правила оформления библиографических списков литературных источников. На основании этих правил сформированы шаблоны, состоящие из смысловых групп, на основе примеров соответствующих списков библиографических источников. При итоговом сравнении полученных шаблонов выявлены как общие черты, объединяющие все рассмотренные шаблоны, так и черты, их разделяющие.

Ключевые слова: неструктурированные данные, текстовая аналитика, неструктурированная информация

Для цитирования: Томашевская В.С., Яковлев Д.А. Способы обработки неструктурированных данных. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):7–17. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-7-17>

RESEARCH ARTICLE

Research of unstructured data interpretation problems

Valeriya S. Tomashevskaya[@],
Dmitriy A. Yakovlev

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author, e-mail: tomashevskaya@mirea.ru

The term «unstructured data» means data that is unordered and arbitrary in shape. However, this type of information has a certain structure. Today there is a wide variety of data and, as a result, it is necessary to interpret them. Interpretation tasks include forecasting, classification, clustering, association, sequence search, data visualization, and variance analysis. The difficulty lies in the fact that the data itself can differ not only in terms of format, but also in terms of its structure. One of the key tasks when working with unstructured data is to find and identify patterns in order to understand them and develop filling patterns. The paper analyzes the rules for the design of bibliographic sources in order to identify common patterns. The concepts of structured and unstructured data are touched upon. The existing directions of work with unstructured data and methods of processing unstructured data, in particular, the rules for the design of bibliographic lists of literary sources, are considered. These rules were used to form templates consisting of semantic groups on the basis of examples of the corresponding lists of bibliographic sources. The final comparison of the obtained templates revealed both common features that unite all the considered templates and features that separate them.

Keywords: unstructured data, text analytics, unstructured information

For citation: Tomashevskaya V.S., Yakovlev D.A. Research of unstructured data interpretation problems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):7–17 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-1-7-17>

Введение

На сегодняшний день существует большое разнообразие данных и, как следствие, появляется необходимость их интерпретировать. Среди задач интерпретации можно выделить прогнозирование, классификацию, кластеризацию, ассоциацию, поиск последовательностей, визуализацию данных, анализ отклонений. Эти задачи находят применение в таких областях как розничная торговля, телекоммуникации, банковское дело, страхование, медицина, техника и т.д. Сложность обработки данных заключается в том, что они могут различаться как с точки зрения формата, так и с точки зрения структуры.

По своей структуре данные можно разделить на два типа – структурированные и неструктурированные. К первому типу относятся данные, упорядоченные определенным образом и организованные с целью обеспечения возможности применения к ним некоторых действий [1]. Второй

тип – это неупорядоченные данные, произвольные по форме, которые были собраны независимо от того, как они могут быть использованы [2].

Для работы со вторым типом данных применяются три направления: интеллектуальный анализ данных, обработка естественного языка и интеллектуальный анализ текста. Первое направление исследует и решает проблемы, связанные с поиском неочевидных закономерностей и причинно-следственных связей в системах, процессах и явлениях [3]. Здесь применяются такие методы как дескриптивный, корреляционный, регрессионный, факторный анализ и многие другие методы, требующие представления входной информации определенным образом [4, 5]. Данное направление применимо в любых сферах человеческой деятельности, где существуют какие-либо данные и есть необходимость принятия решений: в экономике, здравоохранении, страховании, торговле, в различных областях, связанных с контролем и прогнозированием состояния

сложных динамических систем [6]. Второе направление подразумевает под собой компьютерный анализ и синтез естественных языков. Естественным языком является любой язык, используемый для общения людей и не созданный целенаправленно. Главной целью является создание более удобной формы взаимодействия компьютера и человека [7]. Третье направление представляет собой автоматизированный аналитический процесс извлечения новых и потенциально полезных знаний из текстовых документов [8]. При этом главной задачей является нахождение в неструктурированной текстовой информации новых знаний. Схожесть третьего с первым направлением наблюдается в целях, подходах к переработке информации и сферах применения. Различие между направлениями выражается в используемых методах.

Существует несколько способов обработки неструктурированных данных:

- 1) выделение онтологии – описания-схемы предметной части, характеризующейся конкретной структурой;
- 2) поиск упоминаний, категоризация и извлечение фактов;
- 3) выделение эмоциональной окраски, оценки интересов, отношения;
- 4) выделение закономерностей – динамика и процесс изменения отношения, выделение общего, заимствования [9].

Целью данной статьи является анализ правил оформления библиографических источников и выявление возможных тенденций, закономерностей, зависимостей или аномалий с целью получения новых знаний для последующего их применения. Для достижения данной цели будет использоваться четвертый способ обработки неструктурированных данных.

Анализ правил оформления библиографических источников с целью выявления общих закономерностей

В рамках заданных условий в наличии имеется список правил оформления литературных источников. По ходу решения задачи необходимо выявить различные тенденции, закономерности, зависимости или аномалии, на основании которых можно будет

составить шаблоны определения типа литературного источника. Правила оформления следующие:

- оформление описаний монографий;
- оформление описаний статей или отдельных глав с указанием разных авторов из книги или сборника;
- оформление описаний диссертаций и авторефератов диссертаций;
- оформление описаний статей из газет или журналов;
- оформление описаний источников электронного ресурса удаленного доступа.

Первым шагом просматривается текст на естественном языке. Затем осуществляется его разбиение на одиночные токены. На третьем и последнем шаге токены объединяются в смысловые группы. Эта последовательность действий проиллюстрирована на рис. 1.

Тексты и документы представляют собой неструктурированные наборы данных, которые можно представить в виде $A = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, где A – это предложение, содержащее текстовые сегменты, а X – текстовый сегмент, содержащий набор символов.

Вначале текст распределяется на образующие его элементы, как это показано на рис. 2.

Этот процесс подразумевает представление текста в виде последовательности слов. Для этого используется метод предварительной обработки – токенизация – разбиение потока текста на более мелкие части, которые называются токенами или лексическими элементами. К токенам относятся

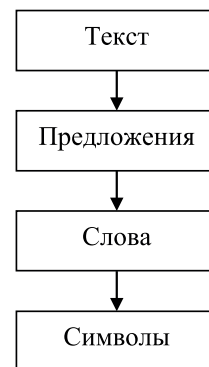


Рис. 2. Распределение текста на составные элементы.

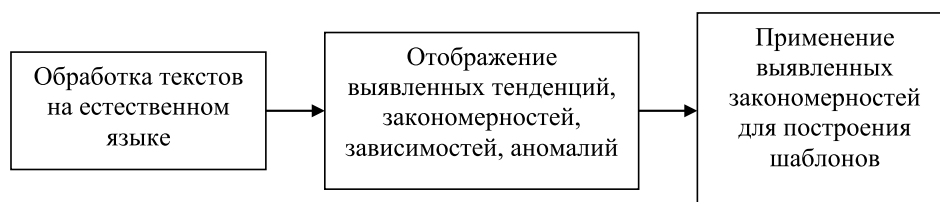


Рис. 1. Последовательность действий для построения шаблонов и выявления закономерностей при анализе списков литературных источников.

как слова, так и знаки препинания, границы абзацев и т.п. Как правило, после токенизации необходимо провести чистку информации на предмет знаков пунктуации и незначимых слов. Пример токенизации приведен на рис. 3.

Сам процесс не представляет трудности в языках, использующих символы-пробелы для разделения слов, но в языках, подобных китайскому, это сделать гораздо труднее, поскольку иероглифы могут обозначать как слоги, так и целые слова [10]. После разбиения текста происходит сборка токенов в группы, которые разграничиваются различными знаками препинания. Следующие за знаком препинания пробелы удаляются, поскольку они являются сугубо конвенциональными и не несут функциональной нагрузки [11]. Данные группы представляют собой смысловые части предложения, при этом важно отметить, что в роли такой части может выступать даже одиночный токен. Полученные группы можно представить в виде шаблона предложения.

Список требований по оформлению литературных источников основывается на стандартах, среди которых можно выделить стандарт ГОСТ Р 7.0.5-2008 СИБИД¹. Он подразумевает деление ссылок следующим образом:

– в зависимости от того, где они размещаются

в тексте: внутритекстовые, подстрочные и затекстовые;

– по составу элементов, находящихся в составе ссылки: полные и краткие.

В данной работе объектом рассмотрения являются краткие затекстовые ссылки, главное назначение которых заключается в оказании помощи при поиске объекта ссылки. Правила, утверждающие использование знаков препинания и представления элементов, должны осуществляться с использованием стандартов ГОСТ Р 7.0.100-2018 (СИБИД)² и ГОСТ 7.82-2001 СИБИД³. Данные правила являются независимыми от назначения ссылки.

При оформлении библиографического описания в ссылке его дополняют заголовком библиографической записи в соответствии с ГОСТ 7.80-2000 СИБИД⁴. Требования к сокращениям слов устанавливаются в соответствии со стандартами ГОСТ Р 7.0.12-2011⁵ и ГОСТ 7.11-2004 (ИСО 832:1994) СИБИД⁶. Первый регламентирует правила для слов на русском языке, второй – для слов на иностранных европейских языках. Следование требованиям вышеуказанных пяти ГОСТов осуществляется с учетом особенностей, указанных в стандарте ГОСТ Р 7.0.5-2008 СИБИД. Библиографические ссылки, в зависимости от стиля, могут иметь различный набор правил оформления описа-

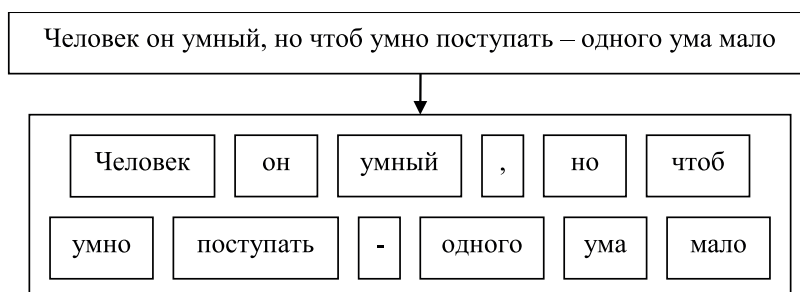


Рис. 3. Пример токенизации.

¹ Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. [Электронный ресурс].

URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200063713> [Elektronnyi fond pravovoi i normativno-tekhicheskoi dokumentatsii (Electronic fund of legal and normative-technical documentation). [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200063713>]

² Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. [Электронный ресурс].

URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200161674> [Elektronnyi fond pravovoi i normativno-tekhicheskoi dokumentatsii (Electronic fund of legal and normative-technical documentation). [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200161674>]

³ Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. [Электронный ресурс].

URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200025968> [Elektronnyi fond pravovoi i normativno-tekhicheskoi dokumentatsii (Electronic fund of legal and normative-technical documentation). [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200025968>]

⁴ Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. [Электронный ресурс].

URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006960> [Elektronnyi fond pravovoi i normativno-tekhicheskoi dokumentatsii (Electronic fund of legal and normative-technical documentation). [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006960>]

⁵ Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. [Электронный ресурс].

URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200093114> [Elektronnyi fond pravovoi i normativno-tekhicheskoi dokumentatsii (Electronic fund of legal and normative-technical documentation). [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200093114>]

⁶ Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. [Электронный ресурс].

URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200039536> [Elektronnyi fond pravovoi i normativno-tekhicheskoi dokumentatsii (Electronic fund of legal and normative-technical documentation). [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200039536>]

ний для монографий, статей, электронных ресурсов и т.д. В работе рассматриваются правила оформления согласно требованию ВАК РФ. При описании правил оформления указывается текстовое наполнение и сопутствующие знаки препинания.

Правило оформления описания монографий

Автор/ы: указывается фамилия и инициалы автора монографии, при наличии более одного автора они перечисляются через запятую. Заглавие: указываются сведения, относящиеся к заглавию, разделительный знак «/», указываются сведения об ответственности. Сведения об издании включают в себя номер издания и информацию о переиздании. Серия: указывается серия. Место издания: разделительный знак «—», сокращенное название издательства. Год издания: указывается дата, когда монография была опубликована. Объем: разделительный знак «—», указывается количество страниц монографии. Разбиение текста на соответствующие группы представлено на примере ниже (рис. 4).

Полученные группы можно представить в виде

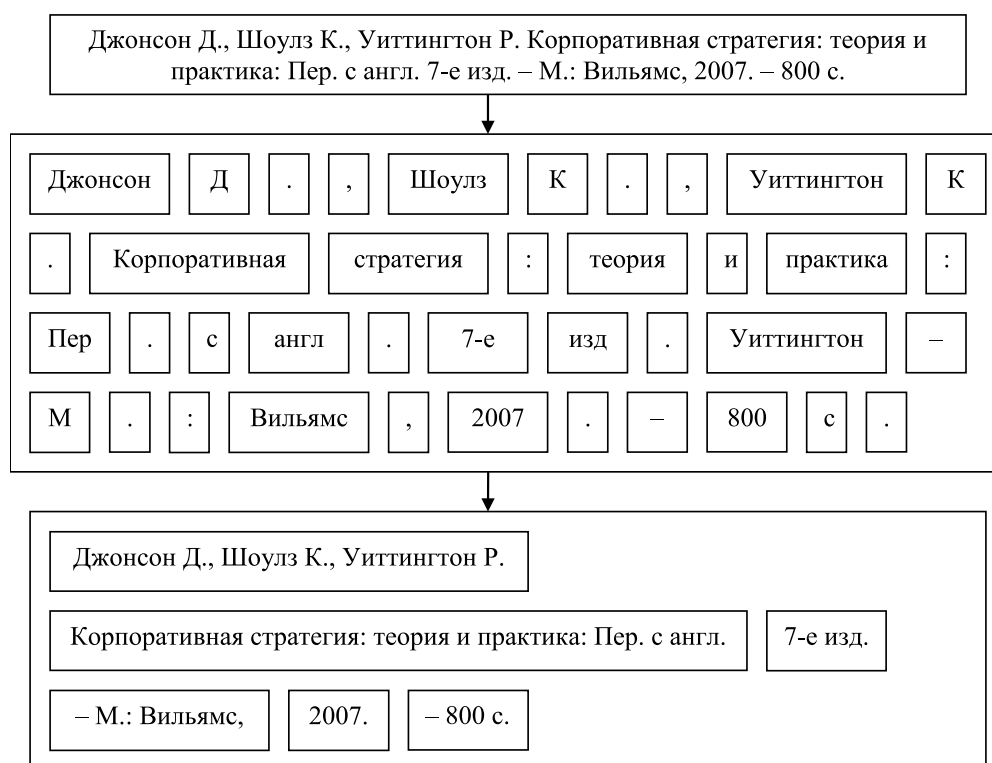


Рис. 4. Разбиение описания книг на смысловые группы.

Автор/ы	Заглавие	Сведения об издании	Место издания	Год издания	Объем
---------	----------	---------------------	---------------	-------------	-------

Рис. 5. Шаблон примера оформления описания монографий.

следующего шаблона (рис. 5).

Правило оформления описания статей или отдельных глав с указанием разных авторов из книги или сборника

Автор/ы: указывается фамилия и инициалы автора статьи, при наличии более одного автора перечисляются через запятую. Заглавие: указываются сведения, относящиеся к заглавию, разделительный знак «/», указываются сведения об ответственности. Заглавие книги: разделительный знак «//», указываются сведения, относящиеся к заглавию. Сведения об ответственности: разделительный знак «/», указываются сведения об ответственности, указываются последующие сведения об ответственности. Место издания: разделительный знак «—», сокращенное название издательства. Год издания: указывается дата, когда статья была опубликована. Объем: разделительный знак «—», указывается интервал страниц, обозначающий местоположение статьи. Разбиение текста на соответствующие группы представлено на примере ниже (рис. 6).

Полученные группы можно представить в виде следующего шаблона (рис. 7).

Правило оформления описаний диссертаций и авторефератов диссертаций

Автор: указываются фамилия и инициалы автора диссертации. Заглавие: указываются сведения, относящиеся к заглавию, разделительный знак «:», добавляется дисс. (автореф. дисс.), разделительный знак «...». Кандидат (доктор) наук: текстовая конструкция вида «канд.(док.) наук.» с указанием отрасли наук автора диссертации. Место издания (место написания): разделительный знак «—», название издательства (если указано). Год издания: указывается дата, когда диссертация была опубликована. Объем: разделительный знак «—», указывается количество страниц диссертации. Разбиение

текста на соответствующие группы представлено на примере ниже (рис. 8).

Полученные группы можно представить в виде следующего шаблона (рис. 9).

Правило оформления описаний статей из газет или журналов

Автор: указывается фамилия и инициалы автора статьи. Заглавие: указываются сведения, относящиеся к заглавию. Название журнала: разделительный знак «//» указывается название журнала. Год выпуска: разделительный знак «—», указывается дата, когда журнал был опубликован. Номер выпуска: разделительный знак «—», указывается номер выпуска. Местоположение статьи: разделительный знак «—», указывается интервал страниц, обозначающий местоположение статьи. Разбиение текста на

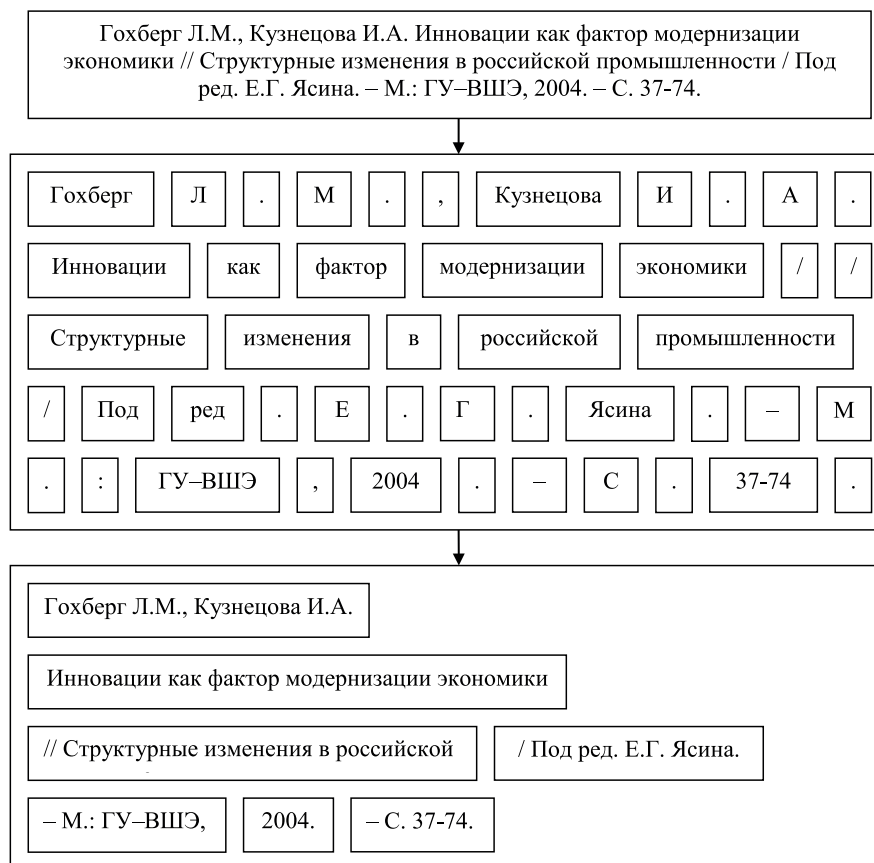


Рис. 6. Разбиение описания статей или отдельных глав с указанием разных авторов из книги или сборника на смысловые группы.

Автор/ы	Заглавие статьи	Заглавие книги	Сведения об ответственности	Место издания	Год издания
Объем					

Рис. 7. Шаблон примера оформления описания статей или отдельных глав с указанием разных авторов из книги или сборника.

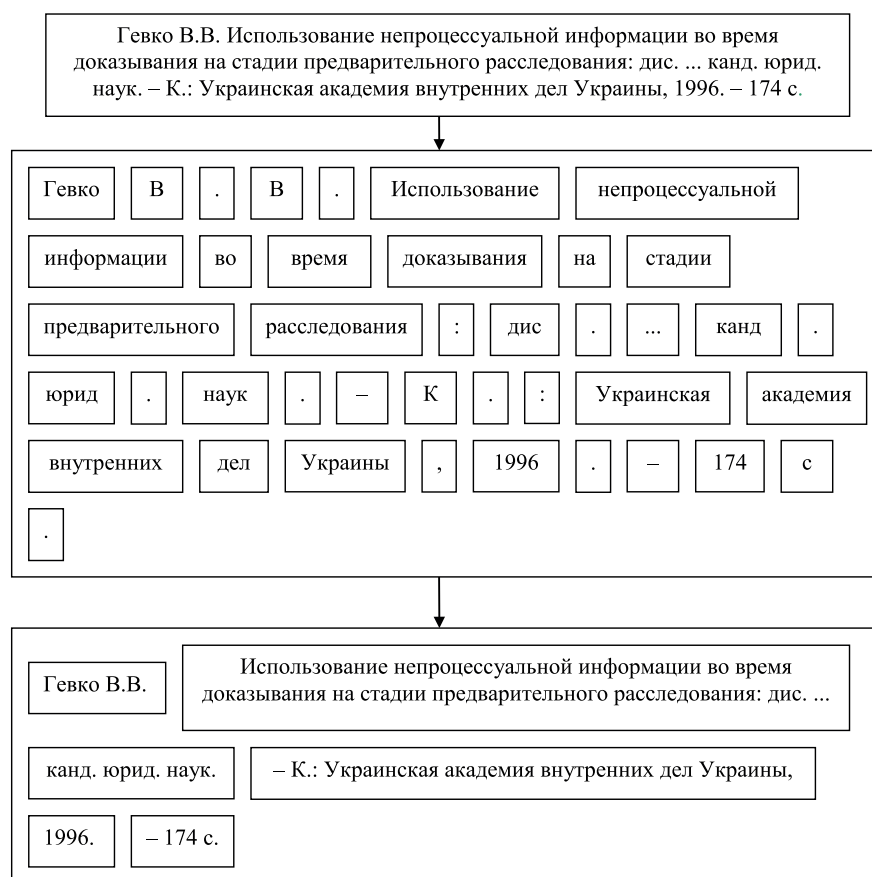


Рис. 8. Разбиение описаний диссертаций и авторефератов диссертаций на смысловые группы.

Автор	Заглавие	канд.(док.) наук.	Место написания	Год издания	Объем
-------	----------	-------------------	-----------------	-------------	-------

Рис. 9. Шаблон примера оформления описаний диссертаций и авторефератов диссертаций.

соответствующие группы представлено на примере ниже (рис. 10).

Полученные группы можно представить в виде следующего шаблона (рис. 11).

Пример оформления описания источников электронного ресурса удаленного доступа

Автор: указывается фамилия и инициалы автора. Заглавие: указываются сведения, относящиеся к заглавию. Название: разделительный знак «//», название источника, текстовая конструкция вида «[Электронный ресурс]. – Режим доступа:», указывается ссылка на ресурс, текстовая конструкция вида «(дата обращения: число, месяц, год)» с указанием числа, месяца и года. Разбиение текста на соответствующие группы представлено на примере ниже (рис. 12).

Полученные группы можно представить в виде следующего шаблона (рис. 13).

Полученные результаты можно представить в виде таблицы.

При рассмотрении таблицы можно выделить три типа полей. К первому можно отнести поля, которые идентичны по смысловому наполнению и по формулировке, ко второму – те поля, которые имеют разную формулировку, но схожее значение. Третий тип – это неидентичные поля.

Поля колонок 1 и 2 можно отнести к первому типу. Колонка под номером 1 отведена под имена авторов, а под номером 2 – предназначена для заглавия литературного источника. Далее можно выделить поле «Место издания» в строке «Оформление описаний монографий» и в строке «Оформление описаний статей или отдельных глав с указанием разных авторов из книги или сборника». Они предназначены для одинаковой смысловой информации, но занимают разное местоположение в своих строках.

Второй тип полей можно наблюдать при рассмотрении полей «Год издания» в строках

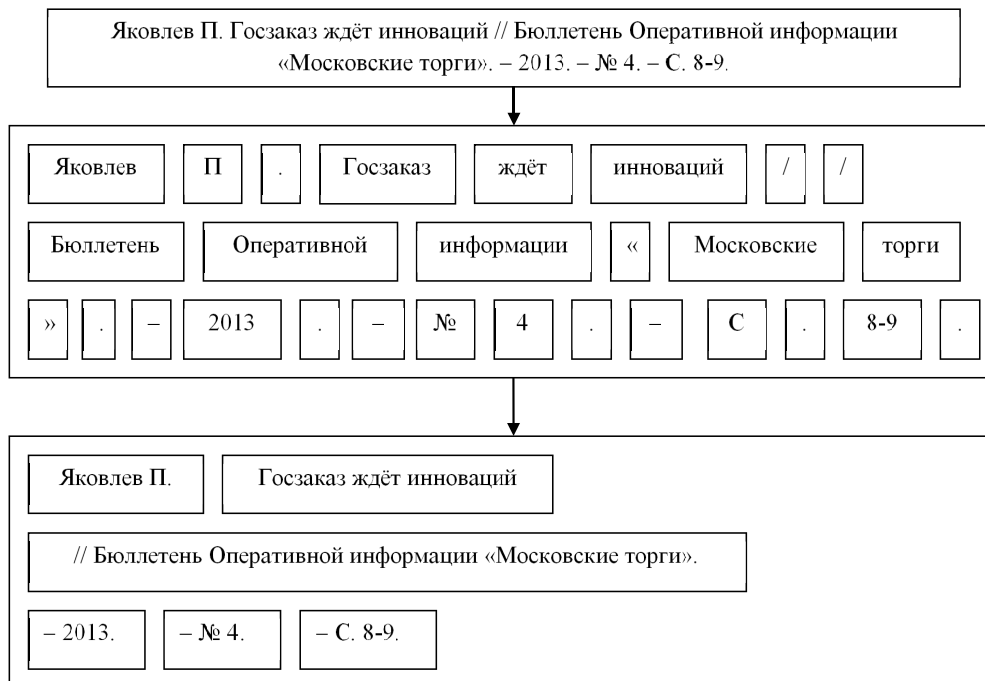


Рис. 10. Разбиение описания статьи из газеты или журнала на смысловые группы.

Автор	Заглавие	Название журнала	Год выпуска	Номер выпуска	Местоположение статьи
-------	----------	------------------	-------------	---------------	-----------------------

Рис. 11. Шаблон примера оформления описаний статьи из газеты или журнала.

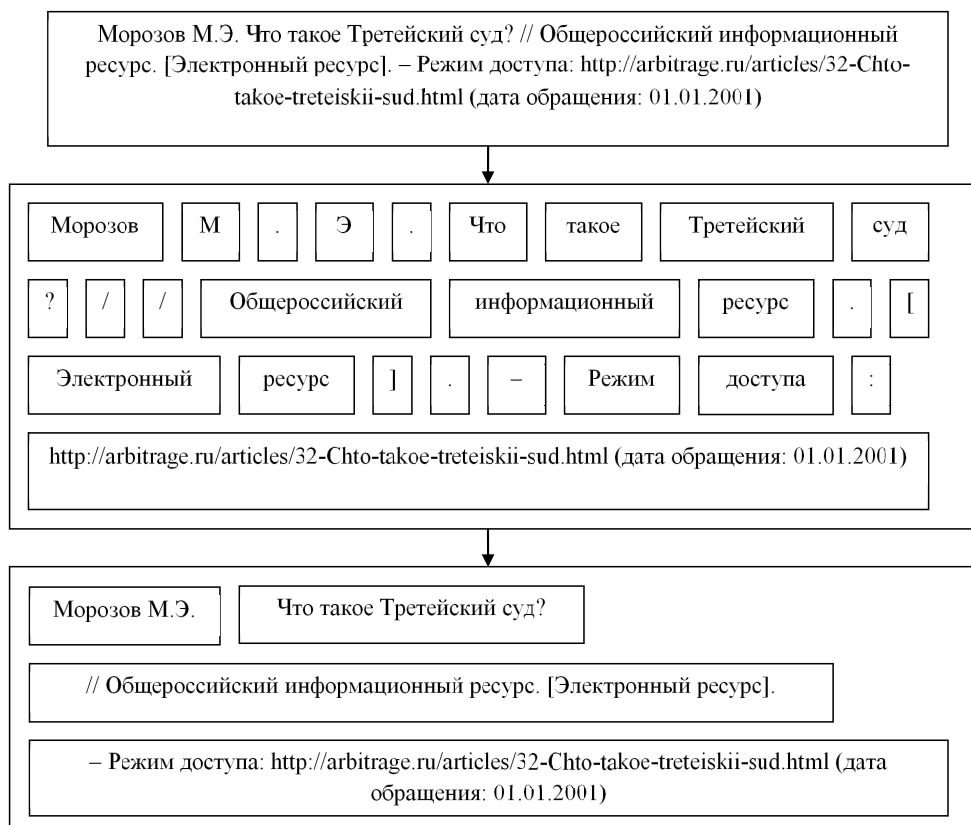


Рис. 12. Разбиение описаний источников электронного ресурса удаленного доступа на смысловые группы.

Автор	Заглавие статьи	Название источника	Режим доступа
-------	-----------------	--------------------	---------------

Рис. 13. Шаблон оформления описаний источников электронного ресурса удаленного доступа.

Сравнение шаблонов оформления литературных источников.

Название строк	1	2	3	4	5	6	7
Оформление описания монографий	Автор/ы	Заглавие	Сведения об издании	Место издания	Год издания	Объем	
Оформление описания статей или отдельных глав с указанием разных авторов из книги или сборника	Автор/ы	Заглавие	// Заглавие книги	/ сведения об ответственности	Место издания	год издания	Местоположение статьи
Оформление описания диссертаций и авторефератов диссертаций	Автор	Заглавие	канд.(док.) наук	Место написания	Год издания	Объем	
Оформление описания статей из газет или журналов	Автор.	Заглавие	// Название журнала	Год выпуска	Номер выпуска	Местоположение статьи	
Оформление описания источников электронного ресурса удаленного доступа	Автор	Заглавие	// Название источника. [Электронный ресурс].	Режим доступа: URL и дата обращения	Дата обращения		

«Оформление описания монографий», «Оформление описания статей или отдельных глав с указанием разных авторов из книги или сборника», «Оформление описания диссертаций и авторефератов диссертаций» и поля «Год выпуска» в строке «Оформление описания статей из газет или журналов». Несмотря на отличия в названии, все эти поля содержат информацию о годе выхода публикации.

К третьему типу можно отнести оставшиеся поля.

В результате при осуществлении анализа на определение принадлежности к литературному источнику необходимо начинать с третьей колонки, так как различия начинаются именно с нее.

Заключение

Несмотря на то, что термин «неструктурированные данные» подразумевает данные неупорядоченные и произвольные по форме, этот тип данных все же обладает определенной структурой. Одной из ключевых задач при осуществлении работы с неструктурированными данными является поиск и выявление закономерностей с целью их понимания и разработки шаблонов заполнения.

На основании правил оформления библиографических списков литературных источников сформированы шаблоны, состоящие из смысловых групп. Сравнение шаблонов выявило в них поля, как схожие по смыслу и значению, так и отличные друг от друга. Опираясь на эти сведения, можно будет определить тип библиографического источника и удостовериться в правильности его оформления.

Таким образом, на примере данной работы демонстрируется, что из потока данных можно отобрать образцы (шаблоны), анализ которых поможет выделить закономерности всего потока данных с целью получения новых знаний о связанных с ним процессах.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Николаев А.А. Разнообразие структур данных в современной информации. *Молодой ученый*. 2019;23(261):21–23. URL: <https://moluch.ru/archive/261/60410/>
2. Антонов С.И., Редько С.Г. Автоматизация управления неструктурированными данными в рамках системы управления контентом на предприятии. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Инноватика*. 2009;5:277–282.
3. Татур М.М., Лукашевич М.М., Перцев Д.Ю., Искра Н.А. Интеллектуальный анализ данных и облачные вычисления. *Доклады БГУИР*. 2019;6(124):62–71. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-62-71>
4. Дядичев В.В., Ромашка Е.В., Голуб Т.В., Задачи и методы интеллектуального анализа данных. *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2015;1-11(3):23–29.
5. Амаева Л.А. Сравнительный анализ методов интеллектуального анализа данных. *Инновационная наука*. 2017;2(1):27–29.
6. Клишко Е.Г. Программно-алгоритмические средства интеллектуального анализа данных. *Радиоэлектроника и информатика*. 2001;3:64–67.
7. Юсков В.С., Баранникова И.В. Сравнительный анализ платформ обработки естественного языка. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;3:272–278.
8. Цитульский А.М., Иванников А.В., Рогов И.С. Интеллектуальный анализ текста. *Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet»*. 2020;6:476–483.
9. Укуев Б.Т. Особенности обработки неструктурированных данных в информационной базе научных исследований ВУЗа. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2018;03:75–76.
10. Цитульский А.М., Иванников А.В., Рогов И.С. NLP – Обработка естественных языков. *Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet»*. 2020;6:467–475.
11. Кузнецов С.А., Скребцова Т.Г., Суворов С.Г., Клементьева А.В. Лингвистический анализатор: преобразование текста в метаязыковую структуру данных. СПб: Изд-во СПбГУ; 2019. 238 с. ISBN 978-5-288-05927-8

References

1. Nikolaev A.A. Variety of data structures in modern information. *Molodoi uchenyi*. 2019;23(261):21–23 (in Russ.). URL: <https://moluch.ru/archive/261/60410/>
2. Antonov S.I., Redko S.G. Automation of unstructured data management as part of a content management system at an enterprise. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt Peterburgskogo tehicheskogo universiteta. Innovatika = Scientific and technical statements of SPbSPU (Saint Petersburg State Polytechnic University)*. 2009;5:277–282 (in Russ.).
3. Tatur M.M., Lukashevich M.M., Pertsev D.Yu., Iskra N.A. Intelligent data analysis and cloud computing. *Doklady BGUIR*. 2019;6(124):62–71 (in Russ.). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-62-71>
4. Dyadichev V.V., Romashka E.V., Golub T.V. Objectives and methods of data mining. *Geopolitika i jekogeodinamika regionov = Geopolitics and ecogeodynamics of regions*. 2015;1-11(3):23–29 (in Russ.).
5. Amaeva L.A. Comparative analysis of data mining methods. *Innovacionnaja nauka = Innovation Science*. 2017;2(1):27–29 (in Russ.).
6. Klimko E.G. Software-algorithmic tools for data mining. *Radioelektronika i informatika = Radioelectronics & Informatics*. 2001;3:64–67 (in Russ.).
7. Yuskov V.S., Barannikova I.V. Comparison of platforms of natural language processing. *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten' = Mining Information and Analytical Bulletin*. 2017;3:272–278 (in Russ.).
8. Tsitulsy A.M., Ivannikov A.V., Rogov I.S. Intelligent text analysis. *Nauchno-obrazovatel'nyj zhurnal dlja studentov i prepodavatelej «StudNet» = Scientific and educational journal for students and teachers «StudNet»*. 2020;6:476–483 (in Russ.).
9. Ukuev B.T. Features of processing of unstructured data in information base of scientific research of higher education institution. *Sovremennaja nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Serija: Estestvennye i tehnicheckie nauki = Modern Science: actual problems of theory & practice. Series of Natural and technical sciences*. 2018;3:75–76 (in Russ.).
10. Tsitulsy A.M., Ivannikov A.V., Rogov I.S. NLP – Natural Language Processing. *Nauchno-obrazovatel'nyj zhurnal dlja studentov i prepodavatelej «StudNet» = Scientific and educational journal for students and teachers «StudNet»*. 2020;6:467–475 (in Russ.).
11. Kuznecov S.A., Skrebцова T.G., Suvorov S.G., Klement'eva A.V. *Lingvisticheskij analizator: preobrazovanie teksta v metajazykovuju strukturu dannyh (Linguistic analyzer: transformation of text into a metalanguage data structure)*. St. Petersburg: St. Petersburg State Polytechnic University Publishing house; 2019. 238 p. (in Russ.). ISBN 978-5-288-05927-8

Об авторах:

Томашевская Валерия Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: tomashevskaya@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0002-6460-2866>.

Яковлев Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: abracadabraZzzz@yandex.ru. <http://orcid.org/0000-0002-3630-5389>.

About the authors:

Valeriya S. Tomashevskaya, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: tomashevskaya@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0002-6460-2866>.

Dmitriy A. Yakovlev, Postgraduate Student of the Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: abracadabraZzzz@yandex.ru. <http://orcid.org/0000-0002-3630-5389>.

Поступила: 06.08.2020; получена после рецензирования: 26.10.2020; принята к опубликованию: 05.11.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-18-28>



УДК 537.5

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Радиоволновая технология резонансной газосенсорной СВЧ-телеметрии

М.С. Костин[@],
А.Д. Ярлыков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: kostin_m@mirea.ru

Исследована возможность применения микрополосковых СВЧ-резонаторов отражающего типа в решении задач резонансной газосенсорной телеметрии на слоистых диэлектрических подложках с газочувствительным напылением. Отмечено, что применение химически активных напылений, например, на основе цеолитов, имеющих высокую селективную газ-адсорбентную кинетику по быстродействию, позволяет создавать радиосенсорные материалы, способные изменять диэлектрическую проницаемость в процессе поглощения газовых веществ, а также сублимированных паров твердых и жидких фаз различных соединений. В качестве альтернативного подхода в области дозиметрического газомониторинга предлагается модификация радиосенсорных приложений на основе микроволновых датчиков, позволяющих при помощи микроволновых решений на базе микрополосковых СВЧ-резонаторов с активным газочувствительным сорбционным цеолитным напылением на диэлектрическую подложку проводить газоанализ в режиме реального времени. Сформулирован радиоволновой принцип действия микрополоскового газосенсорного анализатора. Разработана его электродинамическая модель в среде Altair Feko. Спланирован эксперимент и проведены испытания метода газосенсорной телеметрии паров нитрида водорода, растворенных в воде. Установлено, что количество сорбированной воды и нитрида водорода в цеолите однозначно соответствует, как абсолютному значению коэффициента отражения в микрополосковом газосенсорном анализаторе в режиме резонанса, так и самой резонансной частоте анализатора.

На примере регистрации паров нитрида водорода показано, что зависящие от концентрации адсорбированного газа коэффициент отражения и сдвиг частоты в резонаторе соответствуют характеристикам насыщения газосенсорного датчика и позволяют многократно измерять небольшие концентрации газа, поглощенного цеолитом, при температуре, соответствующей условию быстрого испарения контролируемого газа с активного слоя диэлектрика, что гарантирует десорбцию датчика. Установлено, что в целях повышения быстродействия газосенсорного отклика целесообразно создавать микрополосковый резонатор для резо-

нансной области 8–10 ГГц и использовать материал подложки микрополоскового датчика с высокой диэлектрической проницаемостью. Переход в область верхних частот СВЧ позволит сократить размеры топологии микрополоскового резонатора и уменьшить эффективную площадь цеолитового напыления, а, следовательно, повысить скорость адсорбции газочувствительного слоя активного диэлектрика.

Ключевые слова: газо-сенсорная телеметрия, микрополосковый резонатор, диэлектрическая проницаемость, резонансная частота, коэффициент отражения, сорбция, газоактивный материал, цеолитное напыление

Для цитирования: Костин М.С., Ярлыков А.Д. Радиоволновая технология резонансной газосенсорной СВЧ-телеметрии. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):18–28. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-18-28>

RESEARCH ARTICLE

Radiowave technology of resonant gas-sensor microwave telemetry

Mikhail S. Kostin@,
Alexey D. Yarlykov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: kostin_m@mirea.ru

The possibility of using microstrip reflector microwave resonators in solving problems of resonant gas-sensor telemetry on layered dielectric substrates with gas-sensitive sputtering was investigated. It is noted that the use of chemically active sputtering, for example, on the basis of zeolites having a high selective gas adsorbent kinetics in terms of speed, makes it possible to create radiosensor materials capable of changing the dielectric constant in the process of absorbing gases, as well as of sublimated vapors of solid and liquid phases of various compounds. As an alternative approach in the field of dosimetric gas monitoring, a modification of radiosensor applications based on microwave sensors is proposed, which allows using microwave solutions based on microstrip microwave resonators with active gas-sensitive sorption zeolite sputtering on a dielectric substrate to conduct gas analysis in real time. The radio-wave principle of the microstrip gas sensor analyzer was formulated. An electrodynamic model of a microstrip gas sensor analyzer in the Altair Feko environment was developed. An experiment was planned, and gas-sensor telemetry tests of ammonia vapors dissolved in water were carried out. It was established that the amount of sorbed water and ammonia in the zeolite unambiguously conforms both to the absolute value of the reflection coefficient at resonance and to the resonant frequency itself.

Using the example of recording hydrogen nitride vapors it was shown that the reflection coefficient and frequency shift in the resonator, which depend on the concentration of the adsorbed gas, correspond to the saturation characteristics of the gas sensor and make it possible to repeatedly measure small concentrations of a gas that can be absorbed by zeolite at a temperature corresponding to the condition of rapid evaporation of controlled gas from the active dielectric layer, which guarantees desorption of the sensor. It was established that in order to increase the speed of the gas sensor response it is advisable to create a microstrip resonator for the resonance region of 8...10 GHz and to use a microstrip sensor substrate material with a high dielectric constant. This is due to the fact that the transition to the upper microwave frequencies will allow reducing the size of the topology of the microstrip resonator and reducing the effective area of the zeolite deposition, and, consequently, increasing the adsorption rate of the gas-sensitive layer of the active dielectric.

Keywords: gas-sensor telemetry, microstrip resonator, dielectric constant, resonant frequency, reflection coefficient, sorption, gas-active material, zeolite spraying

For citation: Kostin M.S., Yarlykov A.D. Radiowave technology of resonant gas-sensor microwave telemetry. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):18–28 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-18-28>

Введение

Датчики газосенсорной телеметрии подразделяются на оптические (лазерные), принцип действия которых основан на эффекте спектрального газопоглощения, металлоксидные или химорезистивные, использующие динамику омического эффекта, каталитические, базирующиеся на поглощении и термических реакциях, термографические, биохимические и т.д. [1]. Отдельно также классифицируют группу сенсорных устройств радиоэлектронной газорегистрации, основанных на емкостных, вольтамперометрических или потенциометрических эффектах селективного преобразования концентрации и идентификации химического состава различных газообразных соединений в параметры радиотехнических сигналов [2]. Так, применение химически активных напылений, например, на основе цеолитов, имеющих высокую селективную газoadсорбентную кинетику по быстродействию, позволяет создавать радиосенсорные материалы, способные изменять диэлектрическую проницаемость в процессе поглощения газов, а также сублимированных паров твердых и жидких фаз различных соединений. В качестве альтернативного подхода в области газоанализа возрастает научно-практический интерес к созданию устройств на основе микроволновых датчиков, позволяющих при помощи радиоволновых решений на базе микрополосковых СВЧ-резонаторов в диапазоне 1–18 ГГц, на топологию которых нанесено соответствующее активное сорбционное напыление, обеспечивать газосенсорную телеметрию в режиме реального времени.

Практическое применение микроволновых радиосенсорных датчиков, безусловно, представляет интерес при регистрации атмосферной влажности, а также различных паров и газов при химических или биомедицинских исследованиях, в том числе промышленного назначения. В последние несколько лет были предложены плоские микроволновые датчики для обнаружения нитрида водорода, толуола, углекислого газа или метана на основе высокочувствительного резонансного метода [1]. Их результативность заключается в использовании в конструкции микрополоскового СВЧ-резонатора активной петли обратной связи для усиления радиосенсорного эффекта, что обеспечивает более высокую разрешающую способность селективного обнаружения газообразных фаз [2]. По чувствительности металло-

органические или цеолитные материалы подложек СВЧ-резонаторов являются предпочтительными для микроволновых газовых датчиков, поскольку в таком случае происходит поглощение большого количества полярных газовых частиц наряду с соответствующим изменением комплексной диэлектрической проницаемости [3].

Научно-практические разработки в области газосенсорной телеметрии демонстрируют способность датчиков на основе микроволнового излучения контролировать концентрацию газа в чувствительном слое активного напыления. Тем не менее, исследования по созданию и применению микроволновых преобразователей для обнаружения газа находятся только на начальном этапе и требуют дальнейшей для разработки интегрированных радиосенсорных устройств. Кроме того, относительно большая площадь напыления активного вещества на датчик препятствует широкому применению микроволновых газосенсоров из-за резкого ухудшения быстродействия в нормальных климатических условиях эксплуатации и требует перехода в более высокочастотную область СВЧ-диапазона с целью минимизации размеров датчика и площади напыления, соответственно. Поэтому в данной работе исследуется кольцевой микрополосковый резонатор достаточно малых размеров, рассчитанный на среднюю частоту 9.0 ГГц, используемый для обнаружения паров нитробензольных соединений. В качестве чувствительного материала выступает смесь оксида железа и цеолита, которая способна поглощать нитрид водорода и пары воды даже при малых концентрациях. Ожидается, что предлагаемый микроволновый преобразователь откроет новые возможности для определения характеристик материалов и газосенсорной телеметрии на базе микроволновых датчиков.

1. Радиоволновой принцип действия микрополоскового газосенсорного анализатора

Вследствие процесса сорбции газочувствительный материал изменяет свою комплексную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ и магнитную проницаемость $\mu = \mu' - j\mu''$. Это приводит к изменению показателя рефракции материала напыления и, как следствие, к изменению длины волны в материальной среде (перестройке частоты микрополоскового резонатора) [4]. Как правило, для передачи

электромагнитных волн в нужном направлении их ограничивают в одной или в двух плоскостях. Широко используемой линией передачи является плоская микрополосковая линия (рис. 1).

Микрополосковые линии состоят из полоскового проводника и слоя заземления, разделенных диэлектрической подложкой, и, вследствие чего, поддерживающих только поперечную электромагнитную волну (ТЕМ-волну). ТЕМ-волна образуется, когда два проводника находятся в одной среде, поэтому на самом деле электромагнитная волна в микрополосковой линии не является однозначно ТЕМ-волной, поскольку волны распространяются не только в подложке, но и в среде над линией проводника. Это вызывает различные фазовые скорости и, как следствие, изменяет продольную составляющую электромагнитного поля. Однако, поскольку ее величина очень мала, то ей часто пренебрегают, и тогда распространяющаяся электромагнитная волна называется квази-ТЕМ-волной. Кроме того, двумерная структура микрополосков делает их хорошо подходящими для миниатюризации и интеграции с другими компонентами твердотельных модулей СВЧ, и они могут быть изготовлены с использованием различных пленочных технологий [5]. Среди микроволновых методов определения характеристик материалов микрополосковых линий применимы нерезонансные или резонансные методы. Резонансные методы являются более предпочтительными вследствие их более высокой чувствительности и точности. В этом отношении хорошо известен метод резонансных возмущений, основанный на изменении резонансной частоты при определении параметров исследуемого материала [6].

Типичными плоскими резонансными структурами с микрополосками являются ленточные, дисковые и кольцевые резонаторы [7, 10]. Вследствие их особой геометрии в резонаторе образуются стоячие волны, удовлетворяющие граничным условиям микрополосковой топологии. При этом микрополосковые резонаторы должны быть соединены с одной или двумя питающими линиями для их радиоволнового

возбуждения. В результате для оценки концентрации поглощения газа можно получить два параметра: коэффициент отражения S_{11} для которого требуется только одна линия питания, и коэффициент передачи. Двухпроводная питающая линия используется, если необходимо помимо коэффициента отражения S_{11} получить коэффициент передачи S_{21} [8, 10].

Как известно, стоячие волны в резонаторе возбуждаются при выполнении резонансного условия в исследуемом материале. Для газочувствительных слоев условие резонанса зависит не только от диэлектрической проницаемости конструктивной подложки резонатора, но и от активных слоев газочувствительного напыления. В этом случае эффективная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{эфф}}$ является аддитивным параметром и представляет собой сумму диэлектрических проницаемостей подложки и газочувствительного напыления. Отсюда можно определить резонансную частоту $f_{\text{рез}}$, как

$$f_{\text{рез}} = \frac{c}{L_x \sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}}, \quad (1)$$

где c – скорость света в свободном пространстве, L_x – характеристическая резонансная длина, которая зависит только от используемой геометрии топологии микрополоскового резонатора. Для кольцевого резонатора ее можно определить как $L_x = 2\pi R$ (рис. 2). Помимо резонансной частоты, еще одним характерным параметром микроволновых резонаторов является ширина полосы пропускания $\Pi_{3\text{дБ}}$ по уровню – 3 дБ, зная которую, можно определить добротность системы Q , которая является мерой точности положения волнового резонанса:

$$Q = \frac{f_{\text{рез}}}{\Pi_{3\text{дБ}}}. \quad (2)$$

В целом принцип работы микрополоскового газосенсорного анализатора состоит в следующем. При наличии газовой фазы, которая поглощается

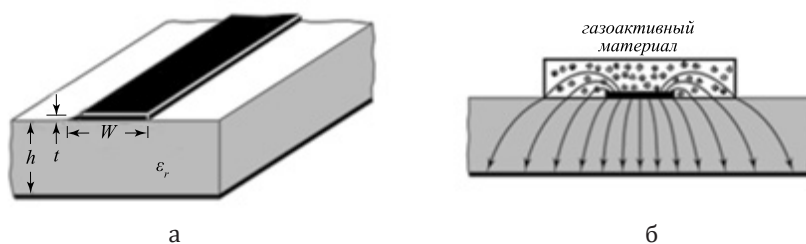


Рис. 1. Микрополосковая линия:

- а – поперечное сечение с заземлением и полосковым проводником;
б – режим распределение электромагнитного поля при помещении в исследуемую (газоактивную) материальную среду.

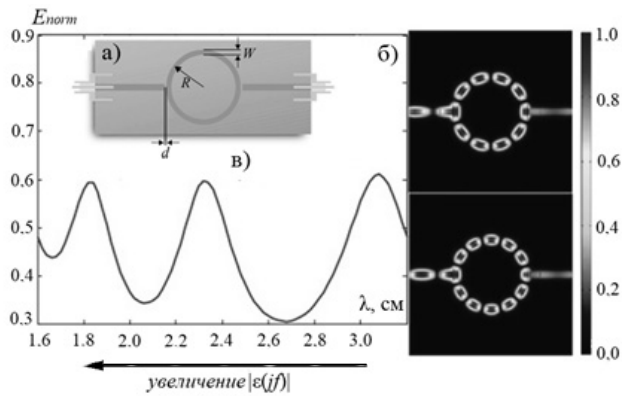


Рис. 2. Микрополосковый кольцевой резонатор на поликоровой подложке (газоактивное напыление не показано):
 а – РСВ-модель с двумя емкостно-связанными питающими фидерами;
 б – нормированная номограмма распределения ближнего поля в резонаторе в диапазоне изменения диэлектрической проницаемости подложки;
 в – длина волны в резонаторе в зависимости от величины диэлектрической проницаемости подложки.

чувствительным слоем, изменяется общая комплексная эффективная диэлектрическая проницаемость слоистой подложки резонатора (газоактивного напыления) и, как следствие, происходит сдвиг резонансной частоты и изменение добротности датчика. Так, при напылении газочувствительного слоя диэлектрика на топологию, открытый микрополосковый резонатор (рис. 1) вырождается в систему закрытого типа, т.е. за счет изменения диэлектрической проницаемости активного напыления в сторону абсолютного увеличения (при поглощении газа) в СВЧ-резонаторе происходит возбуждение более высших мод или сдвиг частоты относительно основной форманты, задаваемой диэлектрической проницаемостью поликоровой подложки. При этом накопленная статистика численных значений регистрируемых частот и добротностей позволяет судить о концентрации, а реактивность сорбционной кинетики активного вещества позволяет судить о качественных показателях – идентифицировать тип газообразного соединения.

2. Разработка и моделирование микрополоскового газосенсорного анализатора в среде Altair Feko

При проведении исследований авторами использовался кольцевой резонатор с газочувствительным цеолитовым напылением (рис. 2). Отсутствие открытых концов уменьшает потери излучения и, следовательно, увеличивает добротность по сравнению с резонаторами с открытым концом. Основными параметрами устройства являются величина зазора d между кольцевым резонатором и линиями питания, толщина микрополоскового кольца W (обе величины

необходимы для определения волнового импеданса) и средний радиус кольца R , который определяет базовую резонансную частоту. Все эти параметры влияют на формирование волнового режима на резонансной частоте и, следовательно, на чувствительность, а также на разрешение наблюдаемого резонансного пика. С целью оценки влияния конструктивных параметров топологии резонатора на его радиофизические характеристики в среде Altair Feko проведено электродинамическое моделирование резонатора.

Общая структура модели резонатора включает в себя SMA-разъемы (50 Ом), две линии МПЛ 50 Ом и кольцевой резонатор с микрополосковыми фидерами (рис. 2а). В качестве материала подложки взят прототип СВЧ-диэлектрика серии RO4003C со следующими параметрами: толщина подложки $h = 0.813$ мм, диэлектрическая проницаемость $\epsilon' = 3.38$, тангенс угла потерь $\text{tg}(\delta) = \epsilon''/\epsilon' = 0.00027$.

Для оценки влияния величины зазора на характеристики радиосенсора расстояние d между кольцевым резонатором и линиями питания микрополоскового кольцевого резонатора постепенно увеличивалось. Как известно, больший зазор улучшает передаваемый сигнал, поскольку для малых зазоров возрастает величина возмущений электрического поля в зазоре, обусловленная краевыми эффектами. Кроме того, величина зазора влияет на резонансную частоту и разрешение резонансного пика и, как следствие, на добротность радиосенсора. Иначе говоря, слабая связь между резонатором и питающими линиями обеспечивает высокую добротность и, следовательно, точность определения резонансной частоты, в то время как высокий уровень связи необходим для передачи мощности [9]. Однако определить требуемый уровень связи достаточно сложно, поэтому моделирование работы устройства при различных значениях зазора позволяет определить его влияние и оценить необходимый уровень микрополосковой связи. Моделирование проводилось при резонансной частоте $f_{\text{рез}} = 4.4$ ГГц, ширине микрополоска $W = 1.87$ мм и сопротивлению 50 Ом. Наименьший зазор был равен $d = 0.025$ мм и увеличивался с шагом 0.025 мм до предельного значения $d = 0.300$ мм.

Зависимость S -параметров от резонансной частоты при различных значениях величины зазора представлена на рис. 3. Исследуя коэффициент передачи S_{21} , можно видеть, что добротность, как и резонансная частота, для слабосвязанных резонаторов возрастает. Однако, исследуя коэффициент отражения S_{11} удалось заметить, что уменьшение связи между резонатором и линиями питания расширяет полосу. Таким образом, резонансная частота не может быть точно определена. Это явление необходимо учитывать, если в качестве характеристики сигнала выступает коэффициент отражения, тогда зазор d следует выбирать различным.

Как было отмечено ранее, чем меньше будет устройство, тем на более высокой частоте будет работать микрополосковый резонатор и тем меньше будет площадь активного газочувствительного напыления, и, как следствие, увеличится быстродействие устройства. Это объясняется тем, что переход в область верхних частот СВЧ позволит сократить размеры топологии микрополоскового резонатора и уменьшить эффективную площадь цеолитового напыления, а, следовательно, повысить скорость адсорбции газочувствительного слоя активного диэлектрика.

Однако при этом также возрастают потери энергии, а добротность уменьшается. Кроме того, небольшое отношение W/R является критическим из-за краевых волновых эффектов, которые влияют на характеристики резонатора. Последствиями малых соотношений W/R могут быть паразитные резонансы, а также более высокие потери. Чтобы учесть этот эффект, было проведено исследование параметров для различных резонансных частот в диапазоне 1–10 ГГц. Характеристическое сопротивление поддерживалось равным 50 Ом, ширина кольца была установлена $W = 1.87$ мм, а величина зазора $d = 0.16$ мм. Радиус кольца R изменялся в пределах от 2.87 мм до 29.3 мм таким образом, чтобы возникали резонансные частоты в заданном диапазоне. В таблице приведены точные значения радиуса кольца и соответствующие резонансные частоты.

На рис. 4 представлены результаты исследования размеров кольцевого резонатора. На более высоких резонансных частотах резонансные пики расширяются за счет снижения добротности, а также увеличивается значение коэффициента передачи.

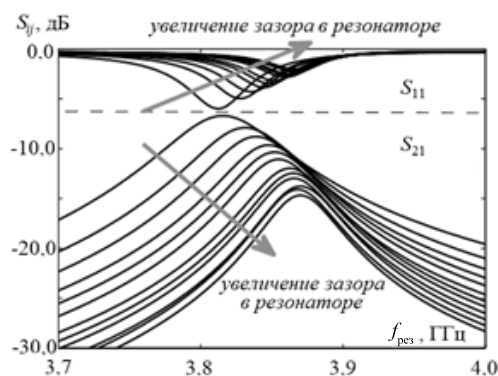


Рис. 3. Зависимость S -параметров от частоты для различных значений величины зазора в топологии газосенсорного телеметрического датчика: S_{11} – коэффициент отражения, S_{21} – коэффициент прямой передачи.

Кроме того, радиотехнические решения в области миниатюризации СВЧ-резонатора показывают важность выбора других параметров, обеспечивающих надлежащий режим работы радиосенсора, как, например, диэлектрической проницаемости подложки, увеличение которой позволяет достичь заданного коэффициента укорочения резонатора.

Действительно, выбор подложки играет ключевую роль в конструировании микрополосковых устройств. В данном случае используется поликор на базе оксида алюминия, обеспечивающий предельно низкие релаксационные потери. В качестве слоя металлизации используется палладий. С другой стороны, согласно теории распределения поля, в микрополосках высокая диэлектрическая проницаемость отрицательно влияет на чувствительность, поскольку поле концентрируется в подложке с более высокой диэлектрической проницаемостью. Тем не менее, более высокая диэлектрическая проницаемость позволяет использовать устройства меньшего размера [7].

Важно отметить, что микроволновый датчик проходного типа (двухпортовый) позволяет получить больше информации, чем оконечный (однопортовый) СВЧ-резонатор отражательного типа [9]. Были смоделированы различия между этими устройствами по чувствительности, которая в данном случае определяется как отношение изменения резонансной частоты к изменению эффективной диэлектрической проницаемости газочувствительного напыления резонатора

$$S_{\varepsilon}^{f_{\text{рез}}} = \frac{\Delta f_{\text{рез}}}{\Delta \varepsilon_{\text{эфф}}}. \quad (3)$$

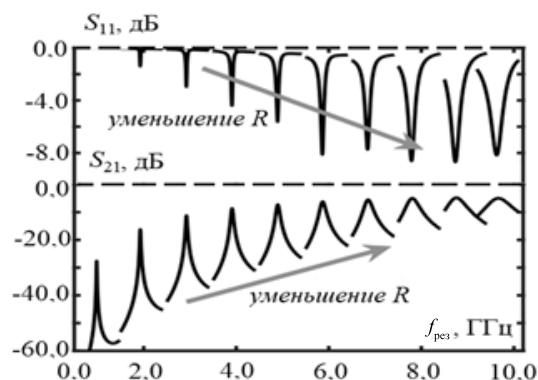


Рис. 4. Зависимость S -параметров от резонансной частоты при различных значениях радиуса резонатора R газосенсорного телеметрического датчика: S_{11} – коэффициент отражения, S_{21} – коэффициент прямой передачи.

Значения радиуса R для различных значений частоты

R , мм	29.31	14.57	9.84	7.31	5.79	4.86	4.19	3.71	3.18	2.79
$f_{\text{рез}}$, ГГц	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0

При моделировании средний радиус кольца был установлен равным $R = 2.08$ мм, толщина цеолитного напыления – 100 мкм, зазоры – $d = 0.16$ мм, а высота подложки из поликора ($\epsilon = 10.1$) была выбрана равной 0.637 мм.

Модель и прототип газосенсорного анализатора, разработанного в среде Altair Feko, показаны на рис. 5. В рамках моделирования изменялись действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости цеолита для учета изменения поляризации и изменения собственных потерь с увеличением поглощенных паров нитрида водорода или воды:

$$\epsilon = \text{var}[3.1:0.1:4.1] + j\text{var}[0.0:0.06:0.6]. \quad (4)$$

В комплексном векторе (4) предельные значения вещественной и мнимой части диэлектрической проницаемости в диапазоне из 11 дискретных значений заданы, исходя из действующего диапазона фактического изменения проницаемости цеолита [4].

Из рис. 6 видно, что для приведенных значений чувствительность оконечного резонатора выше, а резонансный пик менее широкий, чем для резонатора проходного типа. Следовательно, в последующих измерениях рекомендуется использовать резонатор отражательного типа.

В результате, на основе проведенного моделирования были выбраны величина зазора, ширина микрополоски и частота резонанса. Для миниатюризации микроволнового преобразователя резонансная частота кольцевого резонатора была установлена в диапазоне 8.3–9.5 ГГц, что соответствует среднему радиусу кольца резонатора $R = 2.08$ мм. Однако результаты моделирования в среде Altair Feko показали, что это ведет к меньшей точности нахождения

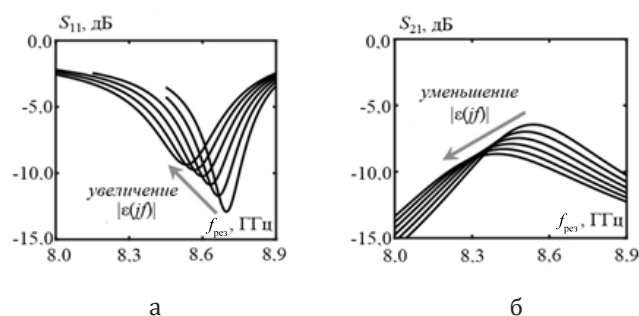


Рис. 6. Зависимость S -параметров от резонансной частоты при изменении комплексной диэлектрической проницаемости для газосенсорного телеметрического датчика:
а – отражательного типа; б – проходного типа.

положения резонансного пика. Чтобы не допустить этого, была установлена очень малая ширина кольцевой полосы $W = 0.22$ мм, что повышает точность нахождения резонансной частоты, а также чувствительность из-за более высокой напряженности поля над подложкой при меньшей ширине микрополоски.

Значение $d = 0.15$ мм было выбрано опытным путем из условия баланса мощностей на основе предварительно созданных прототипов кольцевых резонаторов на базе многофункциональной установки структурирования печатных модулей СВЧ ProtoMat S63 (рис. 7а).

На опытный образец разработанного микроволнового кольцевого газосенсорного анализатора было нанесено цеолитное напыление. Однако вследствие того, что газочувствительное напыление не является строго плоскопараллельным, это приводит к образованию нелинейных эффектов в работе резонатора в процессе сорбции. Предполагается, что неравномерность его толщины может составлять 100–200 мкм.

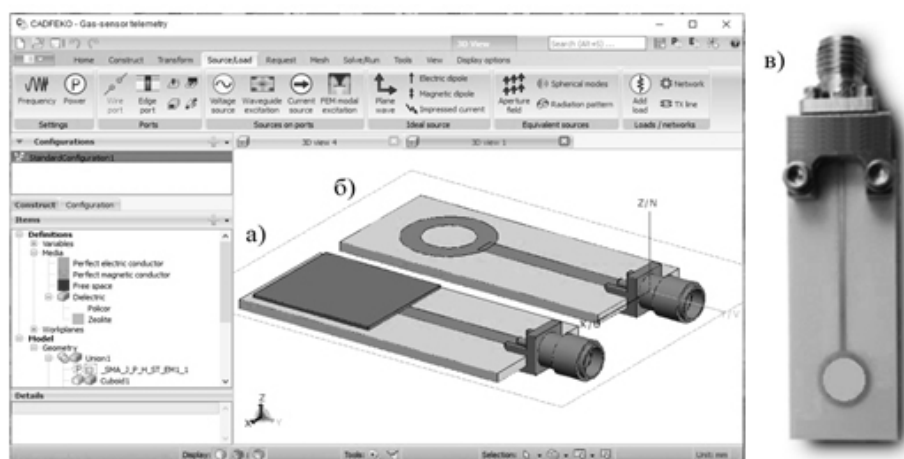


Рис. 5. Построенные в программной электродинамической среде Altair Feko трехмерные модели датчика отражательного типа:
а – модель газосенсорного анализатора с газоактивным напылением;
б – модель газосенсорного анализатора без напыления;
в – экспериментальный прототип радиосенсорного датчика.



Рис. 7. Технологическое оборудование:

а – многофункциональная установка структурирования печатных модулей СВЧ ProtoMat S63;
б – установка инфракрасного экспонирования на базе инфракрасной паяльной станции ASHI IR 6500.

3. Описание эксперимента и испытания газосенсорного телеметрического анализатора

Основные результаты стендовых испытаний микрополоскового газосенсорного телеметрического анализатора получены на базе измерительного и технологического оборудования специализированной лаборатории радиоинжиниринга Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет».

Экспериментальная установка (рис. 8) включает в себя стеклянную камеру для образцов, содержащую микроволновый преобразователь, векторный сетевой анализатор FSL18 компании R&S, систему сбора данных и блок подачи газа, подключенный к камере для образцов. Последний состоит из трех регуляторов для управления потоками азота, нитрида водорода и насыщенного водой азота. Общий расход газа был установлен равным 0.5 мл/мин.

В качестве характеристики работы датчика выступает коэффициент отражения S_{11} , который измерялся в диапазоне частот 8.0–10.0 ГГц с ин-

тервалом 5 мин. Важно отметить, что до начала испытаний были определены резонансная частота и абсолютное значение коэффициента отражения. Также был отфильтрован радиочастотный спектр вблизи рабочей резонансной частоты для удаления шума и паразитных отражений [11]. После каждого измерения уровня поглощенного газа цеолит должен подвергаться термической регенерации при помощи инфракрасного экспонирования на базе инфракрасной паяльной станции ASHI IR 6500 при температуре 120 °С (рис. 7б).

Перед началом измерений были проведены начальные испытания для исследования кинетики поглощения газов цеолитом, нанесенным на микроволновый резонатор при нормальных климатических условиях [12]. Для этого микроволновый датчик был подключен к анализатору спектра и помещен в заданные атмосферные условия. В качестве инициатора газовой фазы использовался стеклянный сосуд, частично заполненный раствором нитрида водорода и воды в соотношении $25 \times 10^{-5}\%$ $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ (рис. 8).

Количество нитрида водорода, перешедшего из жидкого состояния в газообразное, устанавливало парциальное давление нитрида водорода в свобод-

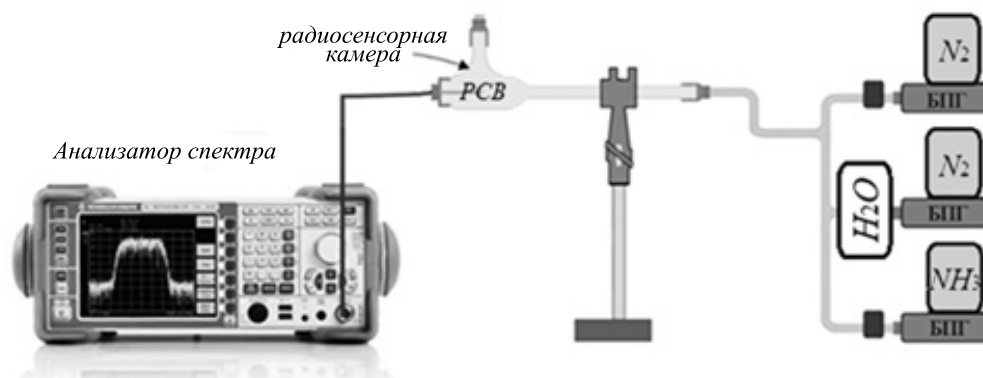


Рис. 8. Экспериментальная установка испытания газосенсорного телеметрического датчика на базе векторного спектроанализатора FSL18.

ном пространстве жидкости внутри стекла. В этом эксперименте были выделены четыре разных случая: датчик размещен вне стеклянной емкости, т.е. на открытом воздухе, без использования цеолитного напыления; датчик размещен внутри стеклянной емкости, т.е. в среде аммиак-атмосферный воздух (ААВ), без использования цеолитного напыления; датчик размещен вне стеклянной емкости, т.е. на открытом воздухе, с использованием цеолитного напыления; датчик размещен внутри стеклянной емкости, т.е. в среде ААВ, с использованием цеолитного напыления.

Если датчик расположен внутри стеклянной емкости (в свободном пространстве над жидкостью), газообразный нитрид водорода и вода должны поглощаться цеолитом и сдвигать резонансную частоту датчика в сторону более низких частот, поскольку эффективная диэлектрическая проницаемость увеличивается. Для справочных целей эксперимент также повторялся без цеолитного напыления.

На рис. 9а показаны измеренные коэффициенты отражения для четырех случаев. Как можно заметить, все резонансные пики по частоте и величине отличаются друг от друга. Резонансные частоты без цеолитного напыления в атмосферном воздухе и в среде ААВ одинаковы (кривые 1, 2 и 3), что было ожидаемо, поскольку при отсутствии цеолита регистрируемый газ почти не вносит вклад в резонансную частоту датчика из-за низкой диэлектрической проницаемости. Как только микрополосковое кольцо покрывается цеолитным напылением, это заставляет основную резонансную частоту сдвигаться к более низким частотам (рис. 9а, кривые 4, 5 и 6, соответственно). Кроме того, поместив датчик, покрытый цеолитом, в среду ААВ, можно наблюдать дальнейшее снижение резонансной частоты до более низких частот, что можно объяснить увеличением диэлектрической проницаемости, когда нитрид водорода и вода поглощаются в цеолите.

Далее для сублимации сорбента цеолиты регенерировались под инфракрасным экспонированием

и эксперимент повторялся двукратно. При этом для каждого нового эксперимента регистрировались и сравнивались резонансные частоты.

Поскольку влажность воздуха влияет на резонансную частоту, во время испарения воды наблюдались флуктуации коэффициента отражения радиосенсора. При этом величины как $f_{\text{рез}}$, так S_{11} и подвержены влиянию попадания воды в цеолит при размещении датчика в воздухе. Поскольку вода увеличивает диэлектрическую проницаемость цеолитов, резонансная частота увеличивается после ее испарения. Результаты также показали, что через 10 минут большая часть воды уже испаряется даже при комнатной температуре. С другой стороны, перед каждым измерением датчик необходимо подвергать инфракрасному экспонированию в течение нескольких минут, чтобы получить воспроизводимые результаты.

При последующих испытаниях определялась концентрация нитрида водорода (рис. 9б). Датчик подвергался влиянию паров нитрида водорода ступенчато изменяющейся молярной концентрации от 0.1 до 450 млн⁻¹ (момент времени t_1) и от 450 до 900 млн⁻¹ (момент времени t_2) без промежуточной регенерации цеолита. Представленные на рис. 9б результаты демонстрируют различные сдвиги резонансной частоты во время адсорбции нитрида водорода на цеолите в 450 млн⁻¹ и 800 млн⁻¹. На первом интервале между t_1 и t_2 при загрузке нитридом водорода в 450 млн⁻¹ видно, что датчик насыщается до тех пор, пока не будет достигнуто полное насыщение нитридом водорода. Кроме того, увеличение концентрации нитрида водорода до 800 млн⁻¹ также приводит к заметному, но меньшему сдвигу резонансной частоты. Затем подача нитрида водорода с концентрацией 800 млн⁻¹ прекращается, и испытательная камера датчика газа продувается чистым азотом (момент времени t_3). Следовательно, резонансный сдвиг частоты уменьшается, но не до исходного значения, как, вероятно, ожидается при испарении воды. Данный эксперимент позволяет оценить предельные

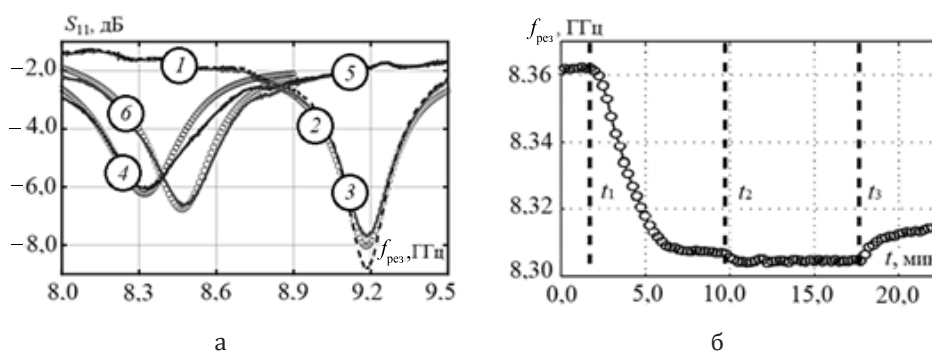


Рис. 9. Экспериментальные кривые:

а – зависимость коэффициента отражения от резонансной частоты при наличии/отсутствии цеолитного покрытия;
б – влияние различной степени концентрации нитрида водорода и азота на дрейф резонансной частоты газосенсорного телеметрического датчика.

возможности изменения диэлектрической проницаемости цеолита (перестройки резонансной частоты газосенсорного датчика) при достижении его адсорбционного насыщения парами нитридом водорода.

Важно отметить, что сильно связанный с активным диэлектриком радиосенсорного датчика нитрид водорода остается на цеолите даже в атмосфере чистого азота при низкой температуре, что уже не позволяет использовать газочувствительный слой многократно. Отсюда можно сделать вывод о том, что для эффективной эксплуатации микроволновых газочувствительных датчиков требуется такая температура среды, при которой обратное испарение контролируемого газа происходит достаточно быстро, чтобы гарантировать обратимость (десорбцию) датчика. Поэтому на подложке датчика необходимо устанавливать слой нагревателя, что будет следующим шагом к модификации радиосенсора.

Заключение

В работе были исследованы радиофизические параметры микрополоскового кольцевого резонатора с цеолитом в качестве газочувствительного диэлектрического напыления. На основе результатов моделирования в среде Altair Feko была разработана микрополосковая кольцевая резонаторная структура на поликорковой подложке с сорбционным газочувствительным цеолитным напылением. Газосенсорный телеметрический датчик прошел стендовые испытания на частоте 8,3–9,0 ГГц в нормальных климатических условиях. Установлено, что количество сорбированной воды и нитрида водорода в цеолите однозначно соответствует, как абсолютному значению коэффициента отражения в точке резонанса, так и самой резонансной частоте газосенсорного датчика. При этом резонансная частота является подхо-

дящей параметрической мерой для регистрации и измерения концентрации газообразных веществ с помощью микроволновой радиосенсорной технологии газоанализа. Зависящие от концентрации адсорбированного газа коэффициент отражения и сдвиг частоты в резонаторе соответствуют характеристикам насыщения газосенсорного датчика и позволяют многократно измерять небольшие концентрации газа, способного поглощаться цеолитом. В целях обеспечения повышения быстродействия газосенсорного отклика целесообразно создавать газосенсорный датчик для резонансной области 8–10 ГГц и использовать материал подложки с высокой диэлектрической проницаемостью, поскольку переход в область верхних частот СВЧ позволяет сократить размеры топологии резонатора, уменьшить эффективную площадь цеолитового напыления и повысить скорость адсорбции газочувствительного слоя активного диэлектрика.

В дальнейшем планируется исследовать кинетические зависимости диэлектрической проницаемости (резонансной частоты и коэффициента отражения) от сорбционной скорости поглощения для различных газочувствительных материалов, а также исследовать селективные возможности качественного контроля паров и газов других соединений на основе различных газоактивных напылений.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

The authors declare no conflicts of interest.

Литература/References

1. Beulertz G., Votsmeier M., Moos R. In operando Detection of Three-Way Catalyst Aging by a Microwave-Based Method: Initial Studies. *Appl. Sci.* 2015;5(3):174–186. <https://doi.org/10.3390/app5030174>
2. Dietrich M., Hagen G., Reitmeier W., Burger K., Hien M., Grass P., Kubinski D., Visser J., Moos R. Radio-Frequency-Based NH_3 -Selective Catalytic Reduction Catalyst Control: Studies on Temperature Dependency and Humidity Influences. *Sensors*. 2017;17(7):1615. <https://doi.org/10.3390/s17071615>
3. Dietrich M., Steiner C., Hagen G., Moos R. Radio-Frequency-Based Urea Dosing Control for Diesel Engines with Ammonia SCR Catalysts. *SAE Int. J. Engines*. 2017;10(4):1638–1645. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0945>

4. Dietrich M., Jahn C., Lanzerath P., Moos R. Microwave based Oxidation State and Soot Loading Determination on Gasoline Particulate Filters with Three-Way Catalyst Coating for Homogenously Operated Gasoline Engines. *Sensors*. 2015;15(9):21971–21988. <https://doi.org/10.3390/s150921971>
5. Nanjundaswamy H., Nagaraju V., Wu Y., Koehler E., Sappok A., Ragaller P., Bromberg L. Advanced RF Particulate Filter Sensing and Controls for Efficient Aftertreatment Management and Reduced Fuel Consumption. SAE Technical Paper. Warrendale, PA, USA; 2015. 12 p. <https://doi.org/10.4271/2015-01-0996>
6. Rauch D., Albrecht G., Kubinski D., Moos R. A microwave-based method to monitor the ammonia loading of a vanadia-based SCR catalyst. *Appl. Catal. B*. 2015;165:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.09.059>

7. Sappok A., Bromberg L., Parks J.E., Prikhodko V. Loading and Regeneration Analysis of a Diesel Particulate Filter with a Radio Frequency-Based Sensor. SAE Technical Paper. Warrendale, PA, USA; 2010. <https://doi.org/10.4271/2010-01-2126>

8. Kostin M.S., Vikulov V.M., Paramonov A.A. Transient Electromagnetic Pulse Emanation in Digital Systems in the Mode of Pulsed Excitation of the Printed Connector Elements. *J. Commun. Technol. Electron.* 2019;64(2):107–110. <https://doi.org/10.1134/S1064226919020116>

9. Stuart G.C. Gas microstrip detectors on thin plastic substrate, Dissertation, Degree: Ph.D., DegreeYear: 1995, Institute: Carleton University (Canada), Adviser: John Armitage.

10. Peskov V., Oliveira R., Martinengo P., Fonte P., Nappi E., Pietrorraolo F., Picchi P. Resistive microstrip and

microdot detectors: a novel approach in developing spark protected micropattern detectors. In: Proceedings of Science. XI Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors (RPC 2012). Italy; 2012. 7 p. <https://doi.org/10.22323/1.159.0070>

11. Fahmy S., Schmidt M., Cordero F., Roques J.P. Integral spectrometer: highlights of five years of operations. In: Proceedings of SpaceOps 2008 conference, Heidelberg, Germany, 2008. 21 p. <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2008-3279>

12. Di Fino L., Zaconte V., Ciccotelli A., Larosa M., Narici L. Fast probabilistic particle identification algorithm using silicon strip detectors. *Advances in space research.* 2012;50(3):408–414. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.015>

Об авторах:

Костин Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kostin_m@mirea.ru.

Ярлыков Алексей Дмитриевич, ассистент кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Mikhail S. Kostin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: kostin_m@mirea.ru.

Alexey D. Yarlykov, Assistant, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 25.05.2020; получена после рецензирования: 31.07.2020; принята к опубликованию: 06.09.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>



УДК 621.391.072

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние амплитудного и фазового разбаланса квадратур на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией

Г.В. Куликов[®],
А.А. Лелюх

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[®]Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru

Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) применяется для высокоскоростной передачи информации во многих радиосистемах и, в частности, в системах цифрового спутникового телевидения DVB-S, DVB-S2/S2X. В приемнике, входящем в состав передатчика таких систем, присутствует блок формирования квадратурных колебаний, выступающих в роли опорных при демодуляции сигналов. За счет аппаратных нестабильностей возможно возникновение амплитудных и фазовых погрешностей, которые приводят к разбалансу квадратур. Эти неточности вызывают дополнительные ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут значительно ухудшить помехоустойчивость приема. В работе исследуется влияние амплитудных и фазовых погрешностей формирования квадратурных колебаний (разбаланса квадратур) на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. Методами статистической радиотехники получены параметры распределений процессов в приемнике и проведена оценка вероятности битовой ошибки. Получены зависимости вероятности битовой ошибки от коэффициента амплитудного разбаланса, фазовой погрешности формирования квадратур и отношения сигнал/шум. Показано, что амплитудный разбаланс квадратур ведет к существенному снижению помехоустойчивости приема сигналов КАМ при $M \geq 16$. Допустимым отклонением амплитуды в этом случае можно считать величину 5%. При $M = 4$ амплитудный разбаланс в широком диапазоне значений практически не сказывается на помехоустойчивости. Фазовый разбаланс квадратур сильно влияет на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. Допустимая фазовая погрешность составляет не более 0.05 рад (3 градуса). С увеличением позиционности сигналов это влияние также усиливается.

Ключевые слова: квадратурная амплитудная модуляция, квадратурные колебания, погрешность, фазовый разбаланс, амплитудный разбаланс, отношение сигнал/шум, вероятность битовой ошибки

Для цитирования: Куликов Г.В., Лелюх А.А. Влияние амплитудного и фазового разбаланса квадратур на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):29–37. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-29-37>

RESEARCH ARTICLE

Influence of amplitude and phase imbalance of quadratures on the noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation

Gennady V. Kulikov@,
Andrey A. Lelyukh

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: kulikov@mirea.ru

Quadrature amplitude modulation (QAM) is used for high-speed information transmission in many radio systems and, in particular, in DVB-S and DVB-S2/S2X digital satellite television systems. A receiver included as a part of the transmitting equipment of such systems has a block for the formation of quadrature oscillations used as a reference for signal demodulation. Due to hardware instabilities, amplitude and phase errors may occur, which leads to quadratures imbalance. These inaccuracies cause additional errors in the received signal demodulation. This can significantly degrade the noise immunity of the reception. The paper investigates the influence of amplitude and phase errors in the formation of quadrature oscillations (imbalance of quadratures) on the noise immunity of coherent reception of QAM signals. Using the methods of statistical radio engineering the parameters of the distributions of processes in the receiver are obtained, and the probability of a bit error is estimated. The dependences of the bit error probability on the amplitude unbalance factor, on the phase error of quadrature formation and on signal-to-noise ratio are obtained. It is shown that the amplitude imbalance of the quadratures leads to a significant decrease in the noise immunity of QAM signals reception at $M \geq 16$. The acceptable amplitude deviation in this case can be considered to be equal to 5%. At $M = 4$, the amplitude imbalance in a wide range of values practically does not affect the noise immunity. The phase imbalance of quadratures markedly affects the noise immunity of coherent reception of QAM signals. The permissible phase error is no more than 0.05 rad (3 degrees). As the signals positionality increases, this influence also increases.

Keywords: quadrature amplitude modulation, quadrature oscillations, error, phase imbalance, amplitude imbalance, signal-to-noise ratio, bit error probability

For citation: Kulikov G.V., Lelyukh A.A. Influence of amplitude and phase imbalance of quadratures on the noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):29-37 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-1-29-37>

Введение

В настоящее время квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) применяется для высокоскоростной передачи информации во многих радиосистемах и, в частности, в системах цифрового спутникового

телевидения DVB-S, DVB-S2/S2X [1–5]. В приемнике, входящем в состав передаточной аппаратуры таких систем, присутствует блок формирования квадратурных колебаний, выступающих в роли опорных при демодуляции сигналов. Это относится как к схеме приемника, построенного по квадратур-

ной схеме, так и к схеме многоканального когерентного приемника с решением по максимуму правдоподобия. Квадратурные колебания в идеальном случае имеют одинаковые частоты и сдвинуты по фазе друг относительно друга на $\pi/2$. Однако, при их формировании, за счет аппаратных нестабильностей возможно возникновение амплитудных и фазовых погрешностей, которые приводят к разбалансу квадратур. Эти неточности вызывают дополнительные ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут значительно ухудшить помехоустойчивость приема [6–9].

Целью данной работы является исследование влияния амплитудных и фазовых погрешностей формирования квадратурных колебаний (разбаланса квадратур) в приемнике на помехоустойчивость приема сигналов КАМ.

1. Методика анализа помехоустойчивости приема сигналов КАМ

Структурная схема когерентного приемника сигналов КАМ, реализующая алгоритм приема по максимуму правдоподобия, представлена на рис. 1.

Сигнал КАМ на тактовом интервале, равном длительности канального символа несущего информацию об информационных битах, может принимать одно из M возможных значений:

$$s_i(t) = A_{cp}(I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t), \quad (1)$$

$$t \in (0, T_s], i = 0, 1, \dots, M-1,$$

где $A_{cp} = \sqrt{2E_{ср}/T_s}$ – средняя амплитуда сигнала; $E_{ср} = kE_{бср}$ – энергия канального символа, средняя по

всем информационным комбинациям; $E_{бср}$ – средняя энергия, приходящаяся на один бит информации; I_i и Q_i – коэффициенты, определяющие амплитуды квадратурных компонент сигнала; ω_0 – несущая частота.

Корреляционный прием сигнала (1) в присутствии белого гауссовского шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью мощности N_0 и параметрами

$$\langle n(t) \rangle = 0; \langle n(t_1)n(t_2) \rangle = \frac{N_0}{2} \delta(t_2 - t_1)$$

предполагает вычисление интегралов свертки:

$$J_i = \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_0^{T_s} x(t)s_{oni}(t)dt, \quad (2)$$

где

$$x(t) = s_i(t) + n(t)$$

и в идеальном случае $s_{oni}(t) = A_{oni}(I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t)$.

Блок выбора максимума в результате сравнения вычисленных интегралов (с учетом порога) принимает решение по максимуму правдоподобия в пользу того или иного канального символа.

Общую вероятность ошибочного приема канального символа можно определить следующим образом

$$P_{es} = 1 - \prod_{i=0}^{M-1} p_i(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m, \quad (3)$$

где $p_i(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m$ – вероятность того, что выходное значение m -го коррелятора приемника больше выходного значения любого другого i -го коррелятора.

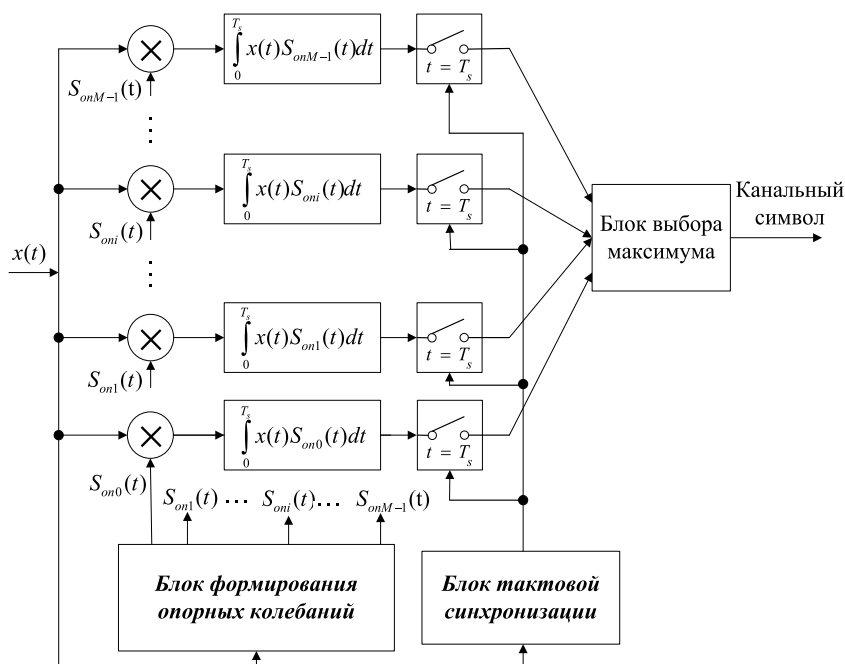


Рис. 1. Структурная схема когерентного приемника КАМ сигналов.

латора при условии, что передавался m -й символ;
 $\delta_{mi} = \frac{E_{sm} - E_{si}}{N_0} = \frac{E_{scp}}{N_0} [(I_m^2 + Q_m^2) - (I_i^2 + Q_i^2)]$ – порог принятия решения, определяемый полуразностью энергий сравниваемых канальных символов.

Вероятность битовой ошибки P_{eb} (BER) при достаточно большом отношении сигнал/шум с учетом кодирования Грея можно найти по формуле [10]:

$$P_{eb} = P_{es} / \log_2 M. \quad (4)$$

Возникновение амплитудного и фазового разбалансов квадратур вносит определенную коррекцию в статистические параметры распределений на выходах всех корреляторов и, соответственно, влияет на величины вероятностей символьной и битовой ошибки.

Принимая во внимание линейность операций, проводимых над сигналами в схеме приемника, распределения случайных процессов $J_i(2)$ можно считать нормальными и, следовательно, для описания этих распределений достаточно рассчитать средние значения, их линейные комбинации m_{mi} и дисперсии D_{mi} . Это позволит определить вероятности

$$p_i(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m = 1 - \Phi\left(\frac{m_{mi}}{\sqrt{D_{mi}}}\right), \quad (5)$$

$$\text{где } \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

2. Вывод формул и результаты расчетов

Рассмотрим влияние амплитудного и фазового разбалансов квадратур, возникающих в блоке формирования опорных колебаний.

А. Влияние амплитудного разбаланса квадратур

При наличии амплитудного разбаланса квадратур опорные сигналы в схеме когерентного приемника будут отличаться от идеальных (2). Учет этот факт введением коэффициента амплитудного разбаланса a :

$$s_{oni}(t) = I_i \cos \omega_0 t - a Q_i \sin \omega_0 t, i = 0, 1, \dots, M - 1.$$

Вычислим средние значения и дисперсии (в качестве примера расчет показан для сигнала с индексом «0»):

$$\begin{aligned} m_0 &= \langle J_0 \rangle = \frac{2A_{он}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - \\ &- a Q_0 \sin \omega_0 t) dt = \frac{2A_{он}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle s_0(t) + n(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - \\ &- a Q_0 \sin \omega_0 t) dt = \frac{A_{cp} A_{он}}{N_0} I_0^2 T_s + \\ &+ \frac{A_{cp} A_{он}}{N_0} a Q_0^2 T_s = \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0^2 + a^2 Q_0^2). \end{aligned}$$

Здесь и далее для простоты записей принято $A_{cp} = A_{он}$.

$$\begin{aligned} m_i &= \langle J_i \rangle = \frac{2A_{он}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle (I_i \cos \omega_0 t - a Q_i \sin \omega_0 t) dt = \\ &= \frac{A_{cp} A_{он}}{N_0} I_0 I_i T_s + \frac{A_{cp} A_{он}}{N_0} a Q_0 Q_i T_s = \\ &= \frac{2E_{scp}}{N_0} I_0 I_i + \frac{2E_{scp}}{N_0} a Q_0 Q_i = \\ &= \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0 I_i + a Q_0 Q_i). \end{aligned}$$

$$m_0 - m_i = \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0(I_0 - I_i) + a Q_0(Q_0 - Q_i)).$$

$$\begin{aligned} D_0 &= \langle J_0^2 \rangle - \langle J_0 \rangle^2 = \langle J_0^2 \rangle - m_0^2 = \\ &= \frac{4A_{он}^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle x(t_1)x(t_2) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t_1 - a Q_0 \sin \omega_0 t_1) \times \\ &\times (I_0 \cos \omega_0 t_2 - a Q_0 \sin \omega_0 t_2) dt_1 dt_2 - m_0^2 = \\ &= m_0^2 + \frac{4A_{он}^2}{N_0^2} \frac{N_0}{2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} (I_0 \cos \omega_0 t_1 - a Q_0 \sin \omega_0 t_1) \times \\ &\times (I_0 \cos \omega_0 t_2 - a Q_0 \sin \omega_0 t_2) dt_1 dt_2 - m_0^2 = \\ &= \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0^2 + a^2 Q_0^2). \end{aligned}$$

$$D_i = \langle J_i^2 \rangle - \langle J_i \rangle^2 = \langle J_i^2 \rangle - m_i^2 = \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_i^2 + a^2 Q_i^2).$$

$$\begin{aligned} M_{0i} &= \frac{4A_{он}^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle x(t_1)x(t_2) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t_1 - a Q_0 \sin \omega_0 t_1) \times \\ &\times (I_i \cos \omega_0 t_2 - a Q_i \sin \omega_0 t_2) dt_1 dt_2 - m_0 m_i = \\ &= \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0 I_i + a^2 Q_0 Q_i). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_0 + D_i - 2M_{0i} &= \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_0^2 + a^2 Q_0^2) + \frac{2E_{scp}}{N_0} (I_i^2 + a^2 Q_i^2) - \\ &- \frac{4E_{scp}}{N_0} (I_0 I_i + a^2 Q_0 Q_i) = \frac{2E_{scp}}{N_0} ((I_0 - I_i)^2 + a^2 (Q_0 - Q_i)^2). \end{aligned}$$

Подставив полученные выражения в (3)–(5), получим зависимости вероятности битовой ошибки BER от параметров: коэффициента амплитудного разбаланса a и отношения сигнал/шум $SNR = E_b/N_0$ (дБ). Заметим, что при вычислениях был проведен перебор всех возможных состояний сигнала КАМ и учтена нормировка по средней энергии. Для 16 КАМ в зависимости от выбора сигнальной точки использованы корректирующие коэффициенты [11] $1/\sqrt{10}$ и $3/\sqrt{10}$, для

32КАМ – $1/\sqrt{20}$, $3/\sqrt{20}$ и $5/\sqrt{20}$ для 64 КАМ – $1/\sqrt{42}$, $3/\sqrt{42}$, $5/\sqrt{42}$, и $7/\sqrt{42}$.

Соответствующие зависимости для $M = 4, 16, 32, 64$ приведены на рис. 2 и 3.

Полученные результаты позволяют утверждать, что амплитудный разбаланс квадратур в широком диапазоне значений не сказывается на помехоустойчивости приема сигналов 4 КАМ. При $M = 16, 32$ и 64 отклонение амплитуды одного из опорных квадратурных колебаний от номинального значения $a = 1$ приводит к резкому снижению помехоустойчивости. Допустимым отклонением можно считать величину 5%, при этом значение BER при SNR = 13 дБ возрастает в 2 раза, а соответствующий энергетический проигрыш в отношении сигнал/шум составляет от 0.2 до 0.5 дБ. Следует также заметить, что отклонение амплитуды квадратуры от номинального значения в большую сторону сказывается менее заметно, чем отклонение в меньшую сторону.

Б. Влияние фазового разбаланса квадратур

При наличии фазового разбаланса опорный сигнал в одной из квадратур будет иметь некоторый дополнительный фазовый сдвиг φ :

$$s_{\text{oni}}(t) = I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin(\omega_0 t + \varphi), i = 0, 1, \dots, M-1.$$

Вычислим средние значения и дисперсии:

$$m_0 = \langle J_0 \rangle = \frac{2A_{\text{он}}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - Q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)) dt = \frac{2A_{\text{он}}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle s_0(t) + n(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - Q_0 \sin(\omega_0 t + \varphi)) dt = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0^2 + Q_0^2 \cos \varphi - I_0 Q_0 \sin \varphi).$$

$$m_i = \langle J_i \rangle = \frac{2A_{\text{он}}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin(\omega_0 t + \varphi)) dt = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0 I_i + Q_0 Q_i \cos \varphi - I_0 Q_i \sin \varphi).$$

$$m_0 - m_i = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0(I_0 - I_i) + Q_0(Q_0 - Q_i) \cos \varphi - I_0(Q_0 - Q_i) \sin \varphi).$$

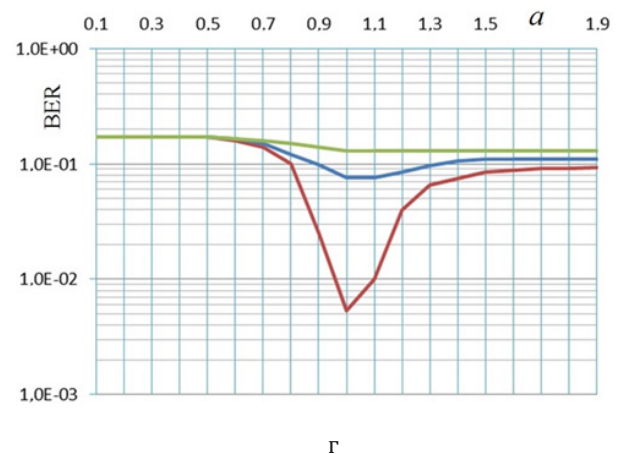
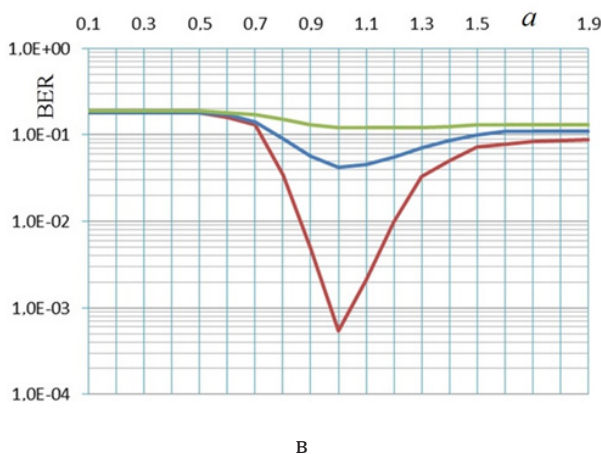
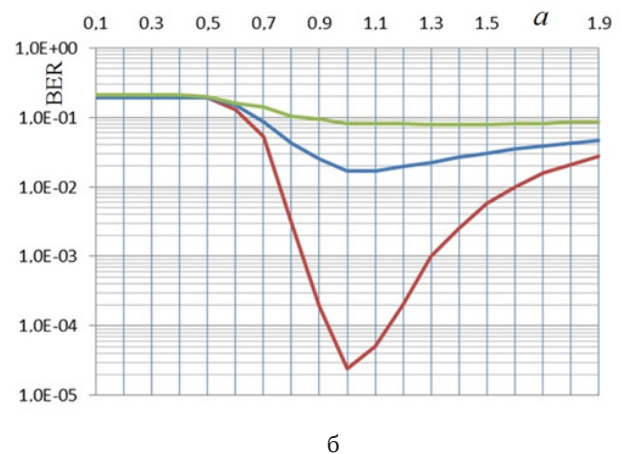
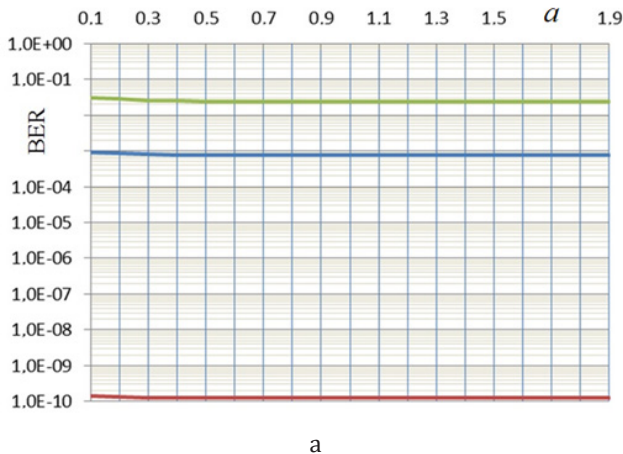


Рис. 2. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от коэффициента амплитудного разбаланса a : а – 4 КАМ; б – 16 КАМ; в – 32 КАМ; г – 64 КАМ.

— SNR = 13 дБ, — SNR = 7 дБ, — SNR = 3 дБ

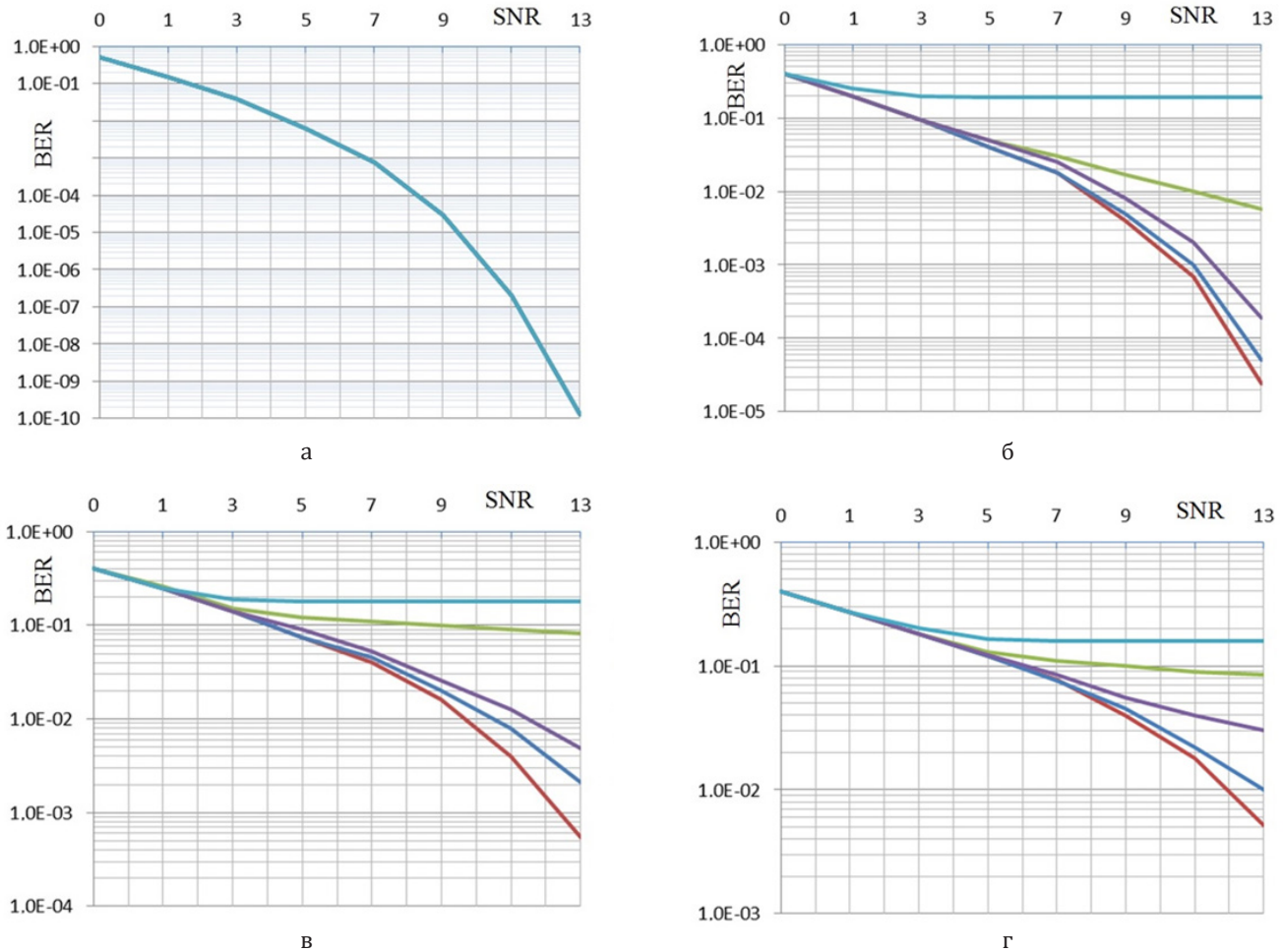


Рис. 3. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR при наличии амплитудного разбаланса квадратур: а – 4 КАМ; б – 16 КАМ; в – 32 КАМ; г – 64 КАМ.

— $a = 1$, — $a = 1.1$, — $a = 1.5$, — $a = 0.9$ — $a = 0.5$

$$D_0 + D_i - 2M_{0i} = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0}(I_0^2 + Q_0^2) + \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0}(I_i^2 + Q_i^2) - \frac{4E_{\text{ср}}}{N_0}(I_0I_i + Q_0Q_i) = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0}((I_0 - I_i)^2 + (Q_0 - Q_i)^2).$$

Подставив полученные выражения в (3)–(5), получим зависимости вероятности битовой ошибки BER от параметров: фазового сдвига и отношения сигнал/шум $\text{SNR} = E_b/N_0$ (дБ). При вычислениях, как и ранее, проведен перебор всех возможных состояний сигнала КАМ и учтена нормировка по средней энергии.

Соответствующие зависимости для $M = 4, 16, 32, 64$ приведены на рис. 4 и 5.

Видно, что фазовый разбаланс квадратур сильно влияет на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. Так фазовая погрешность в 0.05 рад (3 градуса) эквивалентна при $\text{BER} = 10^{-3}$ ухудшению отношения сигнал/шум 0.25 дБ для 4 КАМ, 0.5 дБ для 16 КАМ, 0.6 дБ для 32 КАМ и

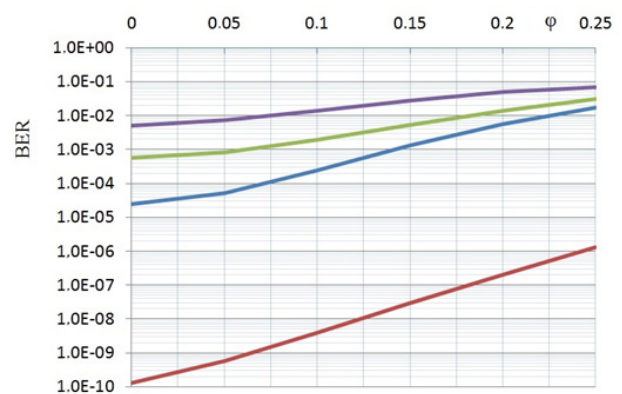


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от величины фазового разбаланса квадратур ϕ .

— $M = 4$, — $M = 16$,
— $M = 32$, — $M = 64$

около 1 дБ для 64 КАМ. При большей фазовой погрешности энергетические проигрыши многократно возрастают, особенно при больших M .

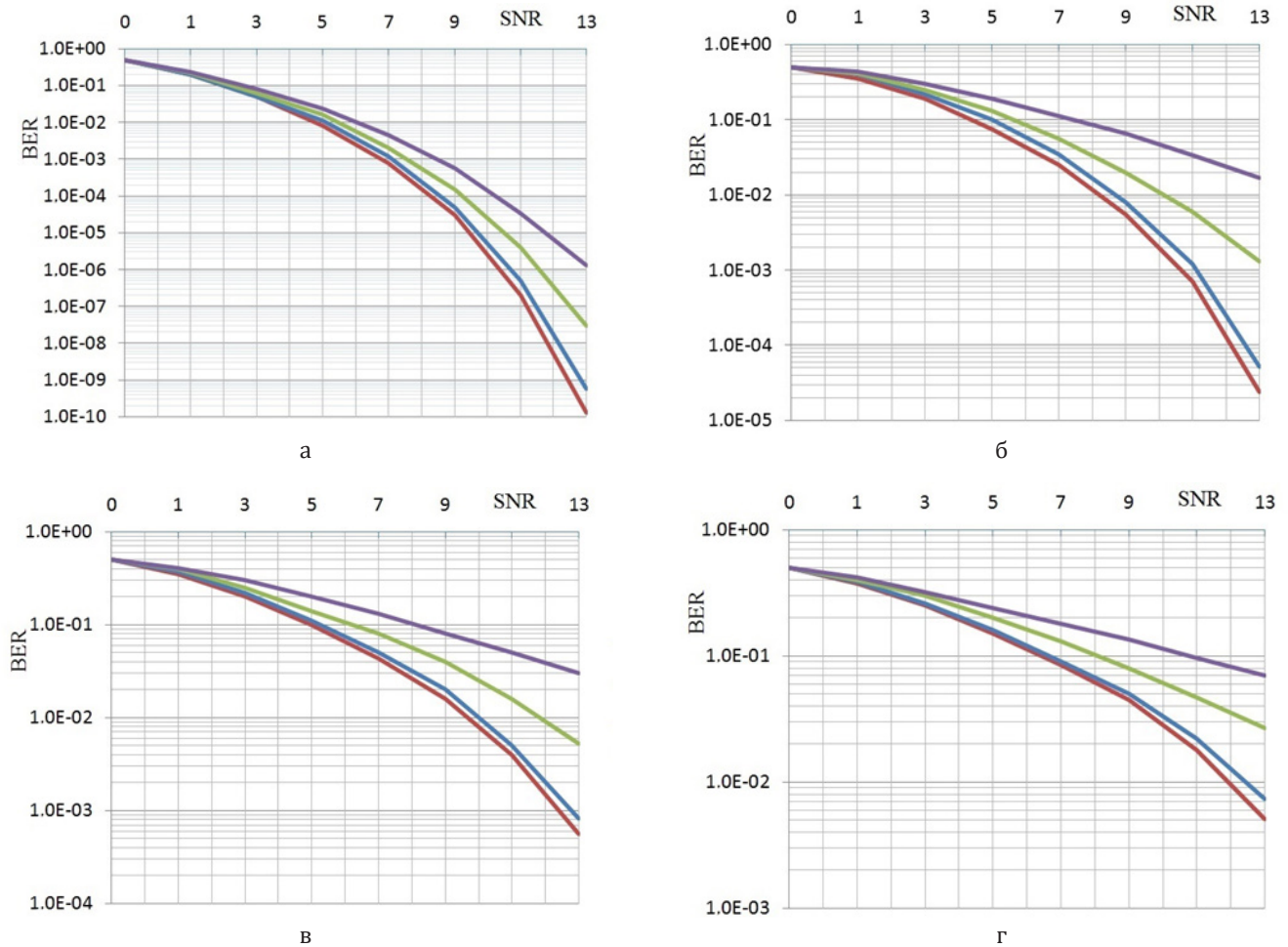


Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR при наличии фазового разбаланса квадратур: а – 4 КАМ; б – 16 КАМ; в – 32 КАМ; г – 64 КАМ.

— $\varphi = 0$, — $\varphi = 0.05$, — $\varphi = 0.15$, — $\varphi = 0.25$

Закключение

Исследование влияния амплитудного и фазового разбалансов квадратур при когерентном приеме сигналов КАМ позволяет сделать следующие выводы:

1. Амплитудный разбаланс квадратур при $M \geq 16$ ведет к существенному снижению помехоустойчивости приема сигналов КАМ. Допустимым отклонением амплитуды в этом случае можно считать величину 5%. При $M = 4$ амплитудный разбаланс в широком диапазоне значений практически не сказывается на помехоустойчивости.

2. Фазовый разбаланс квадратур сильно влияет на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. С увеличением позиционности сигналов это влияние также усиливается. Если для 4 КАМ и

16 КАМ можно считать допустимой фазовую погрешность в 0.05 рад (3 градуса), то 64 КАМ эта погрешность уже приводит к существенным энергетическим потерям (около 1 дБ). При большей фазовой погрешности энергетические проигрыши многократно возрастают, особенно при больших M .

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-1, March 2015. 115 p. [Электронный ресурс]
URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf
2. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-2, March 2015. 183 p.
3. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications Part II: S2-Extensions (DVB-S2X). (Optional). March 2014. [Электронный ресурс]
URL: https://www.dvb.org/resources/public/standards/a83-2_dvb-s2x_den302307-2.pdf
4. DVB. [Электронный ресурс]
URL: <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>
5. Koen Willems. DVB-S2X demystified. [Электронный ресурс].
URL: http://www.newtec.eu/frontend/files/userfiles/files/DIALOG/Whitepaper%20DVB_S2X.pdf
6. Артеменко А.А., Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Влияние неточности оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок в М-КАМ системах передачи данных. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2007;2:81–87.
7. Пастухов А.С., Иванов Ю.А., Малышев С.И. Оценка вероятности битовых ошибок в системах связи 4G. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2009;5(4):28–34.
8. Мирошникова Н.Е. Влияние ошибок синхронизации на прием цифровых сигналов. *T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт*. 2013;9:112–114.
9. Куликов Г.В., Ван Зунг Н. Влияние погрешностей синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов М-ФМ. *Российский технологический журнал*. 2019;7(5):47–61.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
10. Проakis Дж. Цифровая связь. Пер. с англ., под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с. ISBN 5-256-01434-X
11. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2018;11.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>

Об авторах:

Куликов Геннадий Валентинович, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru.

Лелюх Андрей Александрович, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

References

1. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-1, March 2015, 115 p.
URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf
2. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-2, March 2015, 183 p.
3. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications Part II: S2-Extensions (DVB-S2X) – (Optional). March 2014.
URL: https://www.dvb.org/resources/public/standards/a83-2_dvb-s2x_den302307-2.pdf
4. DVB. URL: <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>
5. Koen Willems. DVB-S2X demystified.
URL: http://www.newtec.eu/frontend/files/userfiles/files/DIALOG/Whitepaper%20DVB_S2X.pdf
6. Artemenko A.A., Maltsev A.A., Rubtsov A.E. Effect of the carrier-phase estimation error on the bit-error rate in M-QAM data transmission systems. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2007;2:81–87 (in Russ.).
7. Pastukhov A.S., Ivanov Yu.A., Malyshev S.I. Bit error probability estimation in 4G communication systems. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy = Electrical and Data processing Facilities and systems*. 2009;5(4):28–34 (in Russ.).
8. Miroshnikova N.E. Phase and timing synchronization error on digital receiver properties. *T-Comm: Telekommunikatsii i Transport = T-Comm: Telecommunications and Transportation*. 2013;9:112–114 (in Russ.).
9. Kulikov G.V., Van Dung N. Influence of synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of M-PSK signals. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(5):47–61 (in Russ.).
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
10. Proakis J. Digital communications. 5th ed. McGraw-Hill Comp.; 2008. 1150 p.
11. Kulikov G.V., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Interference immunity of reception of signals with quadrature amplitude shift keying in the presence of harmonic interference. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2018;11 (in Russ.).
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>

About the authors:

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru.

Andrey A. Lelyukh, Postgraduate Student of the Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 19.02.2020; получена после рецензирования: 12.04.2020; принята к опубликованию: 12.06.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-38-47>



УДК 681.2.0821.083:535.2:543.063

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Метрологические исследования характеристик многослойных поверхностных покрытий с использованием синхротронного излучения

А.С. Сигов¹,
О.А. Минаева^{1,2, @},
С.И. Аневский²,
А.М. Лебедев³,
Р.В. Минаев²

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений
ФГУП «ВНИИОФИ», Москва 119361, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва 123182, Россия

@Автор для переписки, e-mail: minaeva_o@mirea.ru

Исследования характеристик многослойных поверхностных наноструктур с использованием источников синхротронного излучения играют важную роль в развитии метрологического обеспечения нанoeлектроники. Синхротронное излучение характеризуется интенсивным, рассчитываемым континуумом в широком спектральном диапазоне. Исследования проводились на электронных накопительных кольцах «Сибирь-1» (НИЦ «Курчатовский институт», Москва) и MLS (РТВ, Берлин) с низкой энергией электронов в широком диапазоне длин волн, включающем видимое излучение, ближний, вакуумный и экстремальный ультрафиолет, мягкий рентген, для исключения влияния жесткого рентгеновского излучения. В основу методов определения характеристик радиометров, фотодиодов, фильтров и многослойных зеркал положено использование зависимости абсолютных значений спектральных энергетических характеристик синхротронного излучения от энергии и числа ускоренных электронов. Наибольшее внимание при проведении метрологических исследований с использованием синхротронного излучения уделялось определению абсолютной спектральной чувствительности кремниевых фотодиодов с многослойными фильтрами для интегральных радиометров, спектральных коэффициентов пропускания поверхностных слоев фотодиодов в области экстремального ультрафиолета и спектрального отражения суперрешеток.

Измерения характеристик фотодиодов и фильтров на источнике синхротронного излучения проводились с использованием монохроматора и эталонного детектора. Использование канала синхротронного излучения позволяет проводить исследования спектрального коэффициента пропускания тонких пленок и многослойных структур, сформированных в режиме *in situ*. Для формирования многослойных наноструктур непосредственно на приемной поверхности фотоприемников применяется модуль ионно-плазменного напыления. Оптическая схема канала предусматривает возможность использования монохроматоров скользящего падения для диапазона энергий фотонов от 25 до 100 эВ и нормального падения для диапазона энергий фотонов от 4 до 25 эВ. При энергии фотонов 40 эВ абсолютная спектральная чувствительность составила 70 мА/Вт для фотодиода с нанесенным поверхностным многослойным фильтром. Для разработки экспериментальной методики измерений спектрального коэффициента отражения многослойных зеркал и создания стандартных образцов исследовалась система Mo/Si. Компьютерное моделирование многослойных покрытий позволяет произвести расчет оптических характеристик суперрешеток в области экстремального ультрафиолета. Полученные результаты измерений спектрального коэффициента отражения многослойного покрытия в области энергий фотонов 65–100 эВ свидетельствуют о резонансном характере отражения с максимумом на энергии 83.5 эВ и энергетической ширине на полувысоте около 6.5 эВ. Рабочая длина волны отражающего зеркала соответствует расчетной, что подтверждает эффективность принятой модели.

Ключевые слова: многослойные поверхностные наноструктуры, синхротронное излучение, электронные накопительные кольца, ближний, вакуумный и экстремальный ультрафиолет, радиометры, фотодиоды, фильтры, многослойные зеркала, спектральная плотность энергетической освещенности, суперрешетки

Для цитирования: Сигов А.С., Минаева О.А., Аневский С.И., Лебедев А.М., Минаев Р.В. Метрологические исследования характеристик многослойных поверхностных покрытий с использованием синхротронного излучения. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):38–47. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-38-47>

RESEARCH ARTICLE

Metrological studies of the characteristics of multilayer surface coatings using synchrotron radiation

Alexander S. Sigov¹,
Olga A. Minaeva^{1,2, @},
Sergei I. Anevsky²,
Alexey M. Lebedev³,
Roman V. Minaev²

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow 119361, Russia

³Kurchatov Institute, Moscow 123182, Russia

@Corresponding author, e-mail: minaeva_o@mirea.ru

The investigations of multilayer surface nanostructures characteristics was performed with synchrotron radiation sources, characterized by an intensive, calculated continuum. It plays an important role in nanoelectronics metrological base. The main research were carried out at electron storage rings «Siberia-1» (Kurchatov Institute) and MLS (PTB, Berlin) with low electron energy, in a wide wavelength range, including visible range, AUV, VU, EUV and to exclude the X-ray radiation influence. The methods of the radiometers, photodiodes, filters and multilayer mirrors characteristics measurements are based on the synchrotron radiation absolute spectral characteristics and

accelerated electrons number variation. The metrological investigations with synchrotron radiation was concentrated on:

- absolute spectral responsivity of silicon photodiodes with multilayer filters for integral radiometers applications;
- spectral transmittances of surface layers of photodiodes in the extreme ultraviolet region;
- spectral reflectance coefficient of superlattice.

The characteristics of photodiodes and filters on a synchrotron radiation source are measured using a monochromator and a reference detector. The use of a synchrotron radiation channel makes it possible to study the spectral transmittance of thin films and multilayer structures formed in the *in situ* mode. To form multilayer nanostructures directly on the receiving surface of photodetectors, an ion-plasma sputtering module is used. The optical scheme of the channel provides for the possibility of using monochromators of grazing incidence for the range of photon energies from 25 to 100 eV and normal incidence for the range of photon energies from 4 to 25 eV. At a photon energy of 40 eV, the absolute spectral sensitivity was 70 mA / W for a photodiode with a surface multilayer filter applied. To develop an experimental technique for measuring the spectral reflection coefficient of multilayer mirrors, and to create standard samples, the Mo/Si system was studied. Computer modeling of multi-layer coatings allows us to calculate the optical characteristics of superlattices in the extreme ultraviolet region. The obtained results of measurements of the spectral reflection coefficient of a multilayer coating in the photon energy range of 65–100 eV indicate a resonance reflection character with a maximum at an energy of 83.5 eV and an energy width at a half-height of about 6.5 eV. The working wave-length of the reflecting mirror corresponds to the calculated one, which confirms the effectiveness of the adopted model.

Keywords: multilayer surface nanostructures, synchrotron radiation, electron storage rings, AUV, VUV and EUV, radiometers, photodiodes, filters and multilayer mirrors, spectral irradiance, superlattice

For citation: Sigov A.S., Minaeva O.A., Anevsky S.I., Lebedev A.M., Minaev R.V. Metrological studies of the characteristics of multilayer surface coatings using synchrotron radiation. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):38–47 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-1-38-47>

Проведение исследований характеристик многослойных поверхностных нанопокрывтий с использованием источников синхротронного излучения является важной составляющей технологических процессов в области метрологического обеспечения нанoeлектроники. Использование синхротронного излучения, спектральные энергетические характеристики которого рассчитываются с высокой точностью, составляет основу метрологического обеспечения при разработке и исследованиях новых материалов, наноразмерных структур и композитов с уникальными функциональными свойствами для отечественной компонентной базы микроэлектроники, оптики, оптоэлектроники и других направлений. Использование синхротронного излучения позволяет создать средства аттестации и сертификации ключевых изделий промышленности для формирования единой системы контроля качества продукции.

Синхротронное излучение характеризуется интенсивным, точно рассчитываемым перестраиваемым континуумом в широком спектральном диапазоне от рентгеновского и экстремального УФ излучения до терагерцового с яркостной температурой

от нескольких тысяч до десятков миллионов Кельвинов. Синхротронное излучение, генерация которого происходит в сверхвысоком вакууме и не сопровождается плазменной или газовой струей, используется для определения спектральной плотности силы излучения, спектральной плотности энергетической яркости, пространственного распределения энергетической яркости излучателей, абсолютной спектральной чувствительности фотодиодов и фоторезистов, спектральных коэффициентов пропускания и отражения многослойных суперрешеток для микро- и нанoeлектроники. В мире насчитывается более семидесяти источников синхротронного излучения, используемых для проведения работ по радиометрии и диагностике параметров многослойных наноструктур в областях вакуумного, экстремального ультрафиолетового и рентгеновского излучений. В изделиях микро- и нанoeлектроники используются однослойные и многослойные поверхностные структуры на различных подложках, в том числе интерференционные фильтры, рентгеновские зеркала, суперрешетки и тонкие пленки. Качество изделий определяется однородностью слоев и междуслойных

границ, а также чистотой поверхности подложки. Современные методы нанолитографии позволяют обеспечить структуры с размером 30 нм при использовании излучения с длиной волны 13.5 нм или 7.0 нм. В области экстремального ультрафиолета увеличиваются технологические проблемы и возрастает необходимость оперативного контроля и мониторинга характеристик фильтров, зеркал и фоторезистов в режиме *in situ* в процессе формирования тонкопленочных структур.

Быстрое развитие УФ-спектрометрики с использованием синхротронного излучения связано, в первую очередь, с качественным изменением парка средств измерений, появлением новых высокостабильных приемников с поверхностными наноструктурами и радиометров, имеющих высокую чувствительность при энергии фотонов до 100 кэВ. Применение суперрешеток позволяет повысить эффективность отражающей оптики и снизить влияние рассеянного излучения. Важной задачей метрологического обеспечения при использовании синхротронного излучения является создание высокостабильных стандартных образцов состава и свойств материалов, эффективных многослойных покрытий для фильтров, приемников и зеркал, используемых в области экстремального ультрафиолета [1–3].

Наибольшее внимание при проведении метрологических исследований с использованием синхротронного излучения уделялось определению:

- абсолютной спектральной чувствительности кремниевых фотодиодов с многослойными фильтрами для интегральных радиометров;
- спектральных коэффициентов пропускания поверхностных слоев фотодиодов в области экстремального ультрафиолета;
- спектрального коэффициента отражения суперрешеток.

Исследования проводились на электронных накопительных кольцах «Сибирь-1» (НИЦ «Курчатовский институт», Москва), MLS и BESSY-II (PTB, Берлин). Планируется проведение метрологических работ на накопительном кольце «Сибирь-2». В основу методов определения характеристик радиометров, фотодиодов, фильтров и многослойных зеркал положено использование зависимости абсолютных значений спектральных энергетических характеристик синхротронного излучения от энергии и числа ускоренных электронов.

Спектральная плотность энергетической освещенности синхротронного излучения в соответствии с уравнением Швингера [4] рассчитывается по формуле:

$$E(\gamma, \lambda) = \frac{27Ne^2c}{32\pi^3R^3L^2} (\lambda_c/\lambda)^4 \gamma^8 \left[1 + (\gamma\Psi)^2 \right]^2 \times \left\{ K_{2/3}^2(\xi) + K_{1/3}^2(\xi)(\gamma\Psi)^2 / \left[1 + (\gamma\Psi)^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

где $E(\gamma, \lambda)$ – спектральная плотность энергетической освещенности синхротронного излучения; λ – длина волны; Ψ – угол отклонения от плоскости орбиты; N – число электронов; γ – релятивистский фактор – отношение энергии ускоренного электрона к энергии покоя электрона $E_0 = 0.511$ МэВ; e – заряд электрона; R – радиус орбиты электрона; c – скорость света; L – расстояние от излучающей точки орбиты до приемной поверхности; $\lambda_c = (4/3)\pi R\gamma^3$ – критическая длина волны; $K_{1/3}, K_{2/3}$ – функции Макдональда;

$$\xi = [\lambda_c/(2\lambda)] \left[1 + (\gamma\Psi)^2 \right]^{3/2}.$$

Расчет спектральной плотности энергетической освещенности синхротронного излучения в зависимости от параметров источника позволяет использовать как спектральный, так и интегральный отклик приемника излучения для анализа характеристик и оптимизации структуры радиометров УФ-излучения. Применения электронных накопительных колец «Сибирь-1» и MLS с низкой энергией электронов, соответственно 450 МэВ и 650 МэВ, связаны с возможностью параллельной работы в широком диапазоне длин волн, включающем видимое излучение, ближний, вакуумный и экстремальный ультрафиолет, а также мягкий рентген, при исключении влияния жесткого рентгеновского излучения и снижения противоречий по требованиям пользователей к пучку синхротронного излучения. При этом стабильность энергетических характеристик синхротронного излучения, нормированных на ток пучка, рассчитанных для любого электронного накопительного кольца, позволяет с высокой точностью исследовать стабильность и воспроизводимость характеристик радиометров при изменении энергии электронов в широком динамическом диапазоне, как с использованием монохроматоров скользящего и нормального падения, так и на белом некохроматическом пучке.

Основные параметры источников синхротронного излучения приведены в таблице.

Сигнал интегрального радиометра I [А/Вт] от источника синхротронного излучения в пределах малого угла отклонения от плоскости электронной орбиты определяется спектральной плотностью энергетической освещенности синхротронного излучения $E(\gamma, \lambda)$, рассчитанной в соответствии с выражением (1), а также абсолютной спектральной чувствительностью приемника излучения $S(\lambda)$ и спектральным коэффициентом пропускания фильтра $\tau(\lambda)$:

$$I = Q \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \tau(\lambda) E(\gamma, \lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где Q – площадь приемника излучения; $\lambda_{\max}, \lambda_{\min}$ – границы спектрального диапазона абсолютной спектральной чувствительности интегрального радиометра.

Основные параметры источников синхротронного излучения

Параметры	Сибирь-1	MLS	Сибирь-2	BESSY-II
Энергия электронов	450.0 МэВ	630.0 МэВ	2.5 ГэВ	1.7 ГэВ
Энергия инжекции	75–80 МэВ	105 МэВ	450 МэВ	50 МэВ
Индукция магнитного поля	1.5Т	1.38 Т	1.7Т	1.5 Т
Ток электронного пучка	200 мА	200 мА	300 мА	400 мА
Осевой размер электронного сгустка	3мм	1.5 мм	2.0 мм	2.0 мм
Расстояние от излучающей области орбиты до фотоприемника	14 м	22 м	18 м	37 м
Горизонтальный эмиттенс	860 нм-рад	100 нм-рад	76 нм-рад	5 нм-рад
Длина орбиты	8.7 м	48 м	124.1 м	240 м
Критическая длина волны	6.13 нм	3.4 нм	1.8 нм	0.6 нм

Для определения абсолютной спектральной чувствительности используется зависимость сигнала интегрального радиометра от энергии электронов. При увеличении энергии электронов за счет увеличения тока поворотных магнитов и индукции магнитного поля спектр синхротронного излучения сдвигается в коротковолновую область. Область спектральной чувствительности интегрального радиометра разделяется на спектральные интервалы с минимальным шагом, соответствующим ступенчатому увеличению энергии электронов.

Начальный релятивистский фактор электронов γ_1 выбирается так, чтобы длина волны максимума распределения спектральной плотности энергетической освещенности $\lambda_{\max}$ соответствовала длинноволновой границе области спектральной чувствительности интегрального радиометра:

$$\lambda_{\max} = 0.42 \lambda_c = 1.76 R \gamma^{-3}. \quad (3)$$

Для оценки значения абсолютной спектральной чувствительности $\tau(\lambda_1)S_1(\lambda_1)$ радиометра в интервале длин волн $\Delta\lambda_1$ со спектральным корректирующим фильтром используется выражение:

$$\tau_1 S_1 = i_1 / Q \int_{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1}^{\lambda_{\max}} E(\gamma_1, \lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Интегральное значение энергетической освещенности по интервалу $\Delta\lambda_1$ рассчитывается в соответствии с выражением (1) с использованием специальных компьютерных программ. Новое увеличение энергии электронов сдвигает спектр синхротронного излучения в коротковолновую область на спектральный интервал $\Delta\lambda_2$ и сигнал радиометра увеличивается в соответствии с выражениями:

$$i_2 = \tau_2 S_2 \int_{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}^{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1} E(\gamma_2, \lambda) d\lambda + \tau_1 S_1 \int_{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1}^{\lambda_{\max}} E(\gamma_2, \lambda) d\lambda \quad (5)$$

или

$$i_2 = \tau_2 S_2 \int_{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}^{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1} E(\gamma_2, \lambda) d\lambda + i_1 \int_{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1}^{\lambda_{\max}} E(\gamma_2, \lambda) d\lambda / \int_{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1}^{\lambda_{\max}} E(\gamma_1, \lambda) d\lambda. \quad (6)$$

Для оценки значения абсолютной спектральной чувствительности радиометра в интервале длин волн $\Delta\lambda_2$ используется выражение:

$$\tau_2 S_2 = [i_2 - i_1 \int_{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1}^{\lambda_{\max}} E(\gamma_2, \lambda) d\lambda / \int_{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1}^{\lambda_{\max}} E(\gamma_1, \lambda) d\lambda] / Q \int_{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}^{\lambda_{\max} - \Delta\lambda_1} E(\gamma_2, \lambda) d\lambda. \quad (7)$$

Пошаговое увеличение энергии без изменения юстировки радиометра позволяет оценить абсолютную спектральную чувствительность радиометра для всей рабочей спектральной области. Для определения абсолютной спектральной чувствительности фотодиодов используется набор фильтров с заранее измеренными значениями спектрального коэффициента пропускания.

Использование описанной методики позволяет определить точность спектральной коррекции интегральных радиометров для диапазонов УФ-А, УФ-В и УФ-С и по известной абсолютной спектральной чувствительности фотодиода определить также значения спектральных коэффициентов пропускания фильтров и спектральных коэффициентов отражения многослойного зеркал. Преимуществом метода является простота реализации, позволяющая исследовать комплекты образцов с использованием набора стандартных образцов.

Высокоточное измерение характеристик фотодиодов и фильтров на источнике синхротронного излучения проводится по классической схеме с исполь-

зованием монохроматоров и эталонного приемника излучения [5–7].

Использование канала синхротронного излучения позволяет проводить исследования спектрального коэффициента пропускания тонких пленок и многослойных структур, сформированных в режиме *in situ*. Для формирования многослойных наноструктур непосредственно на приемной поверхности фотоприемников применяется модуль ионно-плазменного напыления. Оптическая схема канала предусматривает возможность использования монохроматоров скользящего падения для диапазона энергий фотонов от 25 до 100 эВ и нормального падения для диапазона энергий фотонов от 4 до 25 эВ при спектральном разрешении не хуже 10^{-2} . В схеме скользящего падения поток синхротронного излучения, отражаясь от плоского зеркала скользящего падения, заполняет плоскую дифракционную решетку и монохроматическое излучение после выходной щели фокусируется тороидальным зеркалом на исследуемом объекте. После монохроматора поток синхротронного излучения фокусируется выходным зеркалом и поступает в камеру образцов. За выходной щелью устанавливается кассета со сменными фильтрами, в которую установлены исследуемые пленочные фильтры, а также фильтры для коррекции высших порядков дифракции или калибровки монохроматора по длине волны края поглощения.

Для определения абсолютной спектральной чувствительности фотоприемников с многослойными пленками и спектрального коэффициента отражения многослойных зеркал и масок предусмотрена возможность установки радиометра, а также рефлектометра-поляриметра в вакуумной камере. В схеме нормального падения поток синхротронного излучения заполняет вогнутую сферическую дифракционную решетку, и монохроматическое излучение после выходной щели фокусируется тороидальным зеркалом на исследуемом объекте.

Проведенные исследования спектрального коэффициента пропускания монохроматора в области энергий 25–100 эВ и оценки относительного вклада вторых порядков дифракции в общую интенсивность излучения на выходе монохроматора показали, что спад в интенсивности излучения наблюдается в области энергий фотонов свыше 90 эВ. При энергиях фотонов ниже 50 эВ необходимо учитывать вклад вторых порядков дифракции. Энергетическое разрешение составляет менее 0.5 эВ в области энергий 50–100 эВ.

Одной из наиболее важных задач микро- и нанoeлектроники является формирование селективных фильтров непосредственно на приемной поверхности кремниевых фотодиодов, используемых в широком диапазоне энергий фотонов от 1.12 эВ до 100 кэВ,

а также создание высокостабильных стандартных образцов состава и свойств материалов и аттестованных методик измерений спектрального коэффициента пропускания в спектральном диапазоне от 10 до 40 нм. Фотодиоды с селективными фильтрами на поверхности обладают высоким квантовым выходом, стабильностью спектральной чувствительности, радиационной стойкостью, зонной однородностью, что позволяет обеспечить стабильные метрологические характеристики УФ-радиометров, используемых в экстремальном, вакуумном и ближнем ультрафиолете. Нестабильность абсолютной спектральной чувствительности кремниевых фотодиодов возникает под воздействием потока УФ-излучения вследствие деградации спектрального коэффициента пропускания окисной пленки на поверхности кремния. Создание тонкого слоя SiO_2 толщиной несколько нанометров исключает поверхностную рекомбинацию носителей, что обеспечивает стопроцентный внутренний квантовый выход фотодиодов. Для повышения радиационной стойкости при высоких уровнях экспозиции на поверхности фотодиодов формируются нанослои из силицида металлов, что позволяет регистрировать полные потоки синхротронного излучения электронных накопительных колец. При полном сборе носителей внешний квантовый выход фотодиодов рассчитывается с учетом спектрального коэффициента отражения фотодиода, что позволяет реализовать принцип самокалибровки и использовать трап-детекторы для определения абсолютных значений спектральной плотности потока УФ-излучения [8–11].

В национальном метрологическом институте РТВ (г. Берлин) используются кремниевые фотодиоды AXUV в качестве эталонных приемников с неопределенностью при самокалибровке абсолютной спектральной чувствительности, не превышающей 4%. Производство эталонных фотодиодов в режиме самокалибровки открывает возможности для использования фотодиодов с поверхностными наноструктурами для абсолютной радиометрии не только в нанoeлектронике, но и в космической технике, УФ-локации плазменных объектов в медицине при ранней диагностике онкологических заболеваний и др.

Для обеспечения высокой стабильности абсолютной спектральной чувствительности при воздействии интенсивного потока УФ-излучения используется метод формирования азотосодержащего слоя. Включение в интерфейс азота защищает от проникновения примесей, и радиационная стойкость диодов возрастает на несколько порядков. Однако, пассивирующее окно вызывает поверхностную рекомбинацию при получении большой дозы ионизирующего излучения, что приводит к снижению квантового выхода [12, 13]. Результаты исследований стабиль-

ности фотодиодов с использованием синхротронного излучения электронных накопительных колец «Сибирь-1» и MLS показали, что при суммарной энергетической экспозиции 500 МДж/м^2 в течение нескольких часов изменение абсолютной спектральной чувствительности при нормировании сигнала фотодиода на ток электронного пучка не превышало десятых долей процента. Сканирование поверхности фотодиода пучком синхротронного излучения на выходе монохроматора позволяет определить пространственную однородность относительной чувствительности образцов фотодиодов для оценки погрешности, возникающей при формировании рабочей области эталонного фотодиода. Нанесение защитной пленки на поверхность эталонного фотодиода позволяет снизить зонную неоднородность чувствительности, что отвечает требованиям при компарировании абсолютной спектральной чувствительности радиометров для области экстремального ультрафиолета. Температурная зависимость абсолютной спектральной чувствительности фотодиодов вызвана увеличением квантового выхода за счет уменьшения ширины запрещенной зоны с повышением температуры. Использование модуля ионно-плазменного напыления позволяет формировать защитные фильтры на поверхности фотодиодов. При разработке экспериментальной методики измерений абсолютной спектральной чувствительности фотодиодов в диапазонах длин волн от 10 до 40 нм и от 40 до 200 нм на электронном накопительном кольце «Сибирь-1» использовались монохроматоры скользящего и нормального падения и эталонный самокалибрующийся фотодиод AXUV. Измерения абсолютной спектральной чувствительности фотодиодов проводились в одном экспериментальном цикле при одной энергии электронов с последовательным перемещением исследуемого и самокалибрующегося фотодиода в поток монохроматического излучения. Фотодиоды устанавливались на прецизионном манипуляторе, имеющем четыре степени свободы. Позиционирование фотодиодов на пучке синхротронного излучения проводилось по нулевому порядку спектра излучения с точностью установки 0.01 мм. Сравнение абсолютной спектральной чувствительности УФ самокалибрующегося фотодиода AXUV и исследуемого кремниевого фотодиода с нанесенным многослойным защитным покрытием проводились при токах накопителя 50–150 мА и мощности излучения на выходе монохроматора 109–1010 фотонов в секунду. Сигнал фотодиодов составил порядка 10–50 пА с учетом уровня рассеянного излучения. Линейность выходных сигналов фотодиодов контролировалась по результатам измерений зависимости сигналов от тока источника синхротронного излучения.

При измерении зависимости выходного сигнала

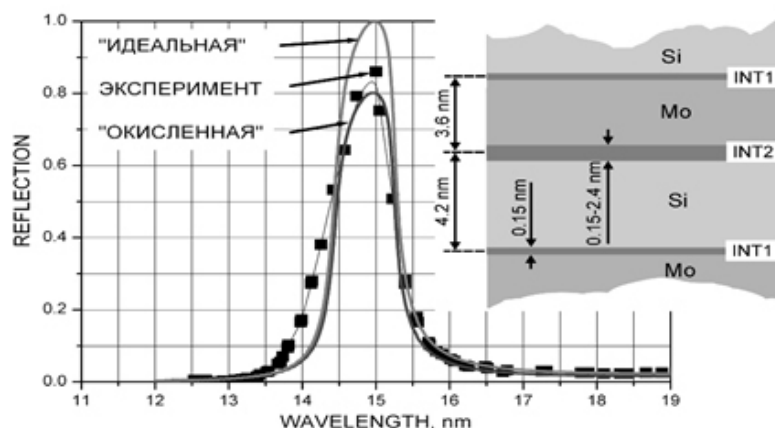
фотодиода от энергии фотонов в диапазоне 20–50 эВ для фотодиода AXUV сигнал изменялся в пределах от 35 до 50 пА, при энергии фотонов 10–20 эВ сигнал монотонно уменьшался до 10 пА. При энергии фотонов 40 эВ абсолютная спектральная чувствительность составила 100 мА/Вт для AXUV и 70 мА/Вт – для фотодиода с нанесенным поверхностным многослойным фильтром. С использованием монохроматора нормального падения были измерены значения абсолютной спектральной чувствительности фотодиодов ФДП, составившие около 0.7 относительно чувствительности AXUV для энергий фотонов 3–6 эВ. Таким образом, абсолютная спектральная чувствительность фотодиодов с нанесенным защитным покрытием оказалась сравнимой с чувствительностью AXUV.

Контроль качества оптических элементов для области экстремального ультрафиолета, в первую очередь, высокоотражающих зеркал на основе многослойных покрытий с чередующимися слоями материалов с существенно различающимися оптическими характеристикам – суперрешеток требует высокоточных измерений спектрального коэффициента отражения [14–17]. Для разработки экспериментальной методики измерений спектрального коэффициента отражения многослойных зеркал и создания стандартных образцов исследовалась система Mo/Si.

Компьютерное моделирование многослойных покрытий позволяет произвести расчет оптических характеристик суперрешеток в области от 10 до 30 нм с использованием базы данных свойств материалов, в частности, программного пакета TFCalc от Software Spectra, Inc.

Структура многослойного зеркала для области экстремального УФ представлена на рисунке. Расчеты и оптимизация проводились с учетом наличия выраженных зон межслоевого интерфейса – INT1 и INT2. Толщины интерфейсов INT1 и INT2 в общем случае неравны, что соответствует структуре реального многослойного зеркала, связанной с технологическим процессом послойного атомарного осаждения и формированием кристаллической структуры в слоях молибдена. Максимум отражения был оптимизирован на длину волны 15 нм при количестве бислоев 125 и нормальном падении излучения. Расчетные параметры решетки «идеального» ($\text{INT1} = \text{INT2} = 0$) зеркала Mo/Si составляют 3.6/4.2 нм. Зависимость спектрального коэффициента отражения (REFLECTION) от длины волны показана на рисунке.

Рассматривались два механизма формирования межслоевого интерфейса: перемешивание, стимулированное внедрением осаждаемых атомов, и химическая реакция между материалами слоев. Расчеты проводились с учетом толщины INT1 на границе Mo-Si 0.15 нм, а значение INT2 (граница Si-Mo) ва-



Спектральный коэффициент отражения многослойного покрытия Mo/Si.

рировалось в диапазоне 0.15–2.4 нм, принимая во внимание высокую диффузионную активность атомов Mo. Образующийся интерфейс замещает собой часть материала слоев, уменьшая их фактическую толщину. Анализ показывает, что увеличение интерфейса INT2 начинает заметно сказываться, снижая максимальный коэффициент отражения на 2%, при толщине 1.2 нм, при этом форма зависимости спектрального коэффициента отражения от длины волны и положение максимума не изменяются. При замещении двухкомпонентной смеси интерфейсов силицидом покрытие ведет себя аналогичным образом с незначительным смещением максимума спектрального коэффициента отражения в длинноволновую область. При неизменном периоде интерфейсные включения лишь снижают максимум коэффициента отражения за счет увеличения поглощения внутри системы [16, 18, 19].

Суперрешетка Mo/Si изготавливалась вакуумно-плазменным нанесением для получения многослойных материалов путем послойного покрытия закрепленных подложек. Для распыления Mo и Si использовались магнетроны с диаметром дисковой мишени 50 мм, работающие на постоянном токе. Толщина формируемого слоя определяется скоростью вращения держателя подложки и производительностью магнетрона. Для очистки и ионного ассистирования использовался ионный источник, обеспечивающий плотность ионного тока на подложке на уровне 1 мА/см². Средняя энергия в режиме очистки – 250 эВ, в режиме ассистирования – 90 эВ. В качестве подложки для суперрешетки использовался монокристаллический кремний с ориентацией (100) и исходной шероховатостью $\sigma = 0.15$ нм.

Спектральный коэффициент отражения полученной суперрешетки исследовался на источнике синхротронного излучения «Сибирь-1». Результаты расчетов спектрального коэффициента отражения многослойного покрытия Mo/Si с учетом окисления верхнего бислоя до диоксидов представлены на ри-

сунке («ИДЕАЛЬНАЯ»). Число фотонов измерялось на выходе монохроматора, при этом исследуемый образец помещался за выходной щелью монохроматора, а отраженный пучок направлялся в фотодиод. Держатель образцов размещался на прецизионном манипуляторе для перемещения и юстировки положения фотодиода и образца внутри вакуумной камеры.

Полученные результаты измерений спектрального коэффициента отражения многослойного покрытия в области энергий фотонов 65–100 эВ свидетельствуют о резонансном характере отражения с максимумом на энергии 83.5 эВ и энергетической ширине на полувысоте около 6.5 эВ. При смещении энергии фотонов от максимума в обе стороны на 6.3 эВ коэффициент отражения уменьшался на порядок.

Рабочая длина волны отражающего зеркала соответствует расчетной, что подтверждает правильность принятой модели. Значение спектрального коэффициента отражения в максимуме составляет $70 \pm 5\%$, что близко к расчетной и подтверждает эффективность используемой модели. Увеличение толщины индивидуального слоя, периода или интерфейса приводит к смещению пика отражения в длинноволновую область и увеличению его ширины на полувысоте с шагом 0.25 нм на 0.6 нм. Уменьшение толщины смещает пик в область коротких длин волн и приводит к уменьшению ширины на полувысоте более чем в два раза на фоне общего изменения картины спектра, увеличивая неравномерность и несимметрию зависимости спектрального коэффициента отражения от длины волны. Изменение любой совокупности периодов из приведенных выше на 0.6 нм приводит к смещению максимума коэффициента отражения пропорционально на ~ 1 нм вдоль шкалы длин волн. При совокупном варьировании периода в пределах ± 1.2 нм максимальный коэффициент отражения остается на уровне $70 \pm 5\%$, кроме случая уменьшения слоев и Mo и Si на 0.6 нм – $R_{\max} \sim 25\%$. Физическое увеличение периода за счет изменения

размеров слоев чистых материалов тождественно сохранению толщины, соответствующей идеальной системе, с одновременным увеличением доли межграничной составляющей прослойки.

Использование уникальных свойств источников синхротронного излучения как первичных спектрометрических эталонов, открывает широкие возможности для метрологических исследований средств измерений на основе фотодиодов, фильтров и зеркал с поверхностными наноструктурами, включая радиометры и стандартные образцы состава, и свойств материалов, в области ближнего, вакуумного и экстремального ультрафиолета для микро- и наноэлектроники и других перспективных направлений наукоемких технологий.

Результаты проведенных исследований характеристик фотодиодов с нанесенными защитными поверхностными наноструктурами показали высокую

стабильность и радиационную стойкость чувствительности, а также возможность контроля характеристик многослойных наноструктур с использованием синхротронного излучения в режиме *in situ*.

Использование синхротронного излучения для определения характеристик многослойных фильтров и зеркал показало высокую эффективность методов расчета структур и формирования многослойных напылений для выделения рабочих спектральных интервалов в области экстремального ультрафиолета.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

The authors declare no conflicts of interest.

Литература / References

1. Chkhalo N.I., Gusev S.A., Nechay A.N., Pariev D.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., et al. High-reflection Mo/Be/Si multilayers for EUV lithography. *Optic. Lett.* 2017;42(240):5070–5073. <https://doi.org/10.1364/OL.42.005070>
2. Akhsakhalyan A.D., Kluev E.B., Lopatin A.Y., Luchin V.I., Nechay A.N., Pestov A.E. et al. Current status and development prospects for multilayer X-ray optics at the Institute for Physics of Microstructures Russian Academy of Sciences. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques (J SURF INVEST-X-RAY+)*. 2017;11(1):1–19. <https://doi.org/10.1134/S1027451017010049>
3. Gottwald A., Scholze F. Advanced silicon radiation detectors in the vacuum ultraviolet and the extreme ultraviolet spectral range. In: Smart sensors and MEMs. Intelligent devices and microsystems for industrial applications, 2nd edition. (Eds.). S. Nihtianov, A. Luque. 2018. P. 151–170. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102055-5.00007-3>
4. Schwihys J. On the Classical Radiation of Accelerated Electrons. *Phys. Rev.* 1949;75(12):1912–1925. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.75.1912>
5. Anevsky S., Ivanov V., Kuznetsov V., Minaeva O., et al. Primary UV-radiation detector standards. *Metrologia*. 2003;40(1):S25–S29. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/1/003>

6. Scholze F., Tümmeler J., Ulm G. High-accuracy radiometry in the EUV range at PTB soft x-ray beamline. *Metrologia*. 2003;40(1):S224–S228. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/1/352>
7. Scholze F., Brandt G., Mueller P., Meyer B., Scholz F., Tümmeler J., Vogel K., Ulm G. High-accuracy detector calibration for EUV metrology at PTB. In: Emerging Lithographic Technologies VI. (Ed.) R.L. Engelstad. Proc. SPIE 4688. 2002. P. 680–689. <https://doi.org/10.1117/12.472342>
8. Gottwald A., Kroth U., Kalinina E., Zabrodskii V. Optical properties of a Cr/4H-SiC photodetector in the spectral range from ultraviolet to extreme ultraviolet. *Appl. Opt.* 2018;57(28):8431–8436. <https://doi.org/10.1364/AO.57.008431>
9. Coric M., Saxena N., Pflüger M., Müller-Buschbaum P., Krumrey M., Herzig E.M. Resonant Grazing-Incidence Small-Angle X-ray Scattering at the Sulfur K-Edge for Material-Specific Investigation of Thin-Film Nanostructures. *J. Phys. Chem. Lett.* 2018;9(11):3081–3086. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.8b01111>
10. Gottwald A., Wiese K., Siefke T., Richter M. Validation of thin film TiO₂ optical constants by reflectometry and ellipsometry in the VUV spectral range. *Meas. Sci. Technol.* 2019;30(4):045201. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab0359>
11. Collon M.J., Vacanti G., Barrière N.M., Landgraf B., et al. Silicon pore optics mirror module production and testing. In: Proc. SPIE. 2019;11180:1118023. <https://doi.org/10.1117/12.2535994>

12. Collon M.J., Vacanti G., Barrière N.M., Landgraf B., Günther R., Vervest M., Voruz L., et al. Status of the silicon pore optics technology. In: Proc. SPIE. 2019;11119:111190L. <https://doi.org/10.1117/12.2530696>
13. Hönicke P., Detlefs B., Nolot E., Kayser Y., Mühle U., Pollakowski B., Beckhoff B. Reference-free grazing incidence X-ray fluorescence and reflectometry as a methodology for independent validation of X-ray reflectometry on ultrathin layer stacks and a depth-dependent characterization. *J. Vac. Sci. Technol.* 2019;37:041502. <https://doi.org/10.1116/1.5094891>
14. Nechay A.N., Chkhalo N.I., Drozdov M.N., Garakhin S.A., Pariev D.E., Polkovnikov V.N., Salashchenko N.N., Svechnikov M.V., Vainer Y.A., Meltchakov E., Delmotte F. Study of oxidation processes in Mo/Be multilayers. *AIP Advances*. 2018;8(7):075202. <https://doi.org/10.1063/1.5007008>
15. Hönicke P., Holfelder I., Kolbe M., Lubeck J., Pollakowski B., Unterumsberger R., Weser J., Beckhoff B. Determination of SiO₂ and C layers on a monocrystalline silicon sphere by reference-free x-ray fluorescence analysis. *Metrologia*. 2017;54(4):481–486. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/aa765f/meta>
16. Haase A., V. Soltwisch V., Braun S., Laubis C., Scholze F. Interface morphology of Mo/Si multilayer systems with varying Mo layer thickness studied by EUV diffuse scattering. *Opt. Express*. 2017;25(13):15441–15445. <https://doi.org/10.1364/OE.25.015441>
17. Svechnikov M., Pariev D., Nechay A., Salashchenko N., Chkhalo N., Vainer Y., Gaman D. Extended model for the reconstruction of periodic multilayers from extreme ultraviolet and X-ray reflectivity data. *J. App. Crystallography*. 2017;50(5):1428–1440. <https://doi.org/10.1107/S1600576717012286>
18. Garakhin S.A., Zabrodin I.G., Zuev S.Y., Kas'kov I.A., Lopatin A.Y., Nechay A.N., et al. Laboratory reflectometer for the investigation of optical elements in a wavelength range of 5–50 nm: description and testing results. *Quantum Electron.* 2017;47(4):385–392. <https://doi.org/10.1070/QEL16300>
19. Collon M.J., Vacanti G., Barrière N.M., Landgraf B., et al. Silicon Pore Optics Mirror Module Production and Testing. In: Proc. SPIE. 2018;10699:106990Y. <https://doi.org/10.1117/12.2314479>

Об авторах:

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID L-4103-2017; Scopus Author ID: 35557510600. https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Минаева Ольга Александровна, доктор технических наук, и.о. заведующего кафедрой Метрологии и стандартизации Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); начальник лаборатории, ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений «ВНИИОФИ» (119361, Россия, Москва, ул. Озерная, д. 46). Scopus Author ID 6603019847

Аневский Сергей Иосифович, доктор технических наук, начальник лаборатории ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений «ВНИИОФИ» (119361, Россия, Москва, ул. Озерная, д. 46).

Минаев Роман Владимирович, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отделения ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений «ВНИИОФИ» (119361, Россия, Москва, ул. Озерная, д. 46). Scopus Author ID 22235214600

Лебедев Алексей Михайлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). Scopus Author ID 55415462900.

About the authors:

Alexander S. Sigov, Academician of RAS, President, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID L-4103-2017; Scopus Author ID: 35557510600. https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Olga A. Minaeva, Dr. Sci. (Engineering), Head of the Department of Metrology and Standardization, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia); Head of Laboratory, The All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements Federal State Unitary Enterprise (VNIIOFI). (46, Ozernaya ul., Moscow 119361, Russia). Scopus Author ID 6603019847

Sergei I. Anevsky, Dr. Sci. (Engineering), Head of Laboratory, The All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements Federal State Unitary Enterprise (VNIIOFI). (46, Ozernaya ul., Moscow 119361, Russia).

Roman V. Minaev, Cand. Sci. (Engineering), Head of Research Department, The All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements Federal State Unitary Enterprise (VNIIOFI). (46, Ozernaya ul., Moscow 119361, Russia). Scopus Author ID 22235214600

Alexey M. Lebedev, Cand. Sci. (Phys.-Mat.), Senior Researcher, National Research Center «Kurchatov Institute» (1, Akademika Kurchatova pl., Moscow 123182, Russia). Scopus Author ID 55415462900.

Поступила: 07. 11.2020; получена после рецензирования: 16.11.2020; принята к опубликованию: 30.11.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-48-57>



УДК 620.1.08

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

LPKF-LDS-технология производства трехмерных схем на пластиках

**В.С. Иванов[@],
Д.А. Гладкий,
Д.С. Воруничев**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: Ivanovmirea1@yandex.ru

Рассмотрена перспективная технология производства трехмерных схем на пластиках, преимуществами которой являются расположение элементов под углом, точное позиционирование компонентов, корпусирование кристалла. Описаны сферы ее текущего применения и перспективы дальнейшего развития в радиоэлектронной отрасли. Проведен анализ возможностей и ограничений. Показано, что ключевым компонентом технологии является правильный выбор термопласта с подходящими характеристиками применительно к объекту назначения с учетом стойкости к внешним воздействующим факторам. Проведен анализ международной и отечественной нормативной базы по термопластам, позволивший определить ключевые характеристики для 3D-MID-технологии и проводить сравнение механических, тепловых и других свойств. Предложена классификация термопластов по ключевым характеристикам для принятия решения при выборе материалов с учетом применения в радиоэлектронной отрасли с использованием технологии 3D-MID, которая в настоящий момент либо отсутствует, либо представлена не в полном объеме. Исследованы методы испытания материалов, такие как измерение твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу, для применения в технологии производства трехмерных схем на пластиках и обеспечения качества изготовления радиотехнических изделий, позволяющие подтвердить соответствие ключевых параметров материалов. Рассмотрен порядок построения технологического процесса с применением одной из самых распространенных технологий – LPKF-LDS-технологии производства трехмерных схем на пластиках. Технология LPKF-LDS в составе линии 3D-MID планируется к использованию в новой лаборатории «Трехмерные схемы на пластиках и гибких носителях» на кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем МИРЭА – Российского технологического университета.

Ключевые слова: 3D-MID, MID-изделия, прямое лазерное структурирование, технология «LPKF-LDS», трехмерные схемы на пластиках, термопласты, методы испытаний термопластов

Для цитирования: Иванов В.С., Гладкий Д.А., Воруничев Д.С. LPKF-LDS технология производства трехмерных схем на пластиках. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):48–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-48-57>

RESEARCH ARTICLE

LPKF-LDS technology for the production of three-dimensional schemes on plastics

Vyacheslav S. Ivanov[@],
Dmitry A. Gladky,
Dmitry S. Vorunichev

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author, e-mail: Ivanovmirea1@yandex.ru

A promising technology for the production of three-dimensional circuits on plastics, the scope of its current application and prospects for its further development in the radio-electronic industry are considered. The analysis of current opportunities and limitations is carried out. It is shown that the key component of the technology is the correct choice of thermoplastics with suitable characteristics for the intended object, taking into account the resistance to external factors. An analysis of the international and domestic regulatory framework for thermoplastics was conducted. This allowed to determine the key characteristics for 3D-MID-technology and to make a comparison. A classification is proposed on the basis of the key characteristics of thermoplastics for making a decision when choosing materials on the market, taking into account the application in the radio-electronic industry using 3D-MID technology, which is currently either absent or not fully represented. Methods of testing materials for use in the production technology of three-dimensional circuits on plastics and ensuring the quality of manufacturing of radio engineering products, allowing to confirm the compliance of key parameters of materials are studied. The article considers the order of the build process with the application of the LPKF-LDS technology production of three-dimensional circuits on plastics, which allows building a sequence of processes with particular implementation as an example. The considered LPKF-LDS technology as part of the 3D-MID line is planned in the new laboratory “Three-dimensional circuits on plastics and flexible media” at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Engineering and Telecommunications Systems of MIREA – Russian Technological University.

Keywords: 3D-MID, MID-products, direct laser structuring, LPKF-LDS technology, three-dimensional schemes on plastics, thermoplastics, test methods for thermoplastics

For citation: Ivanov V.S., Vorunichev D.S., Gladky D.A. LPKF-LDS technology for the production of three-dimensional schemes on plastics. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):48–57 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-48-57>

Введение

MID-изделие (литое монтажное основание) представляет собой отлитую под давлением деталь из термопласта со структурированной схемой проводников. Свобода выбора геометрической формы MID-изделий говорит об их большом потенциале.

Уже сейчас MID-изделия встроены в мобильные телефоны в качестве антенн, в современные автомобили – в качестве всевозможных кнопок переключения на панели и руле автомобиля. Наручные электронные часы, выпускаемые мировыми лидерами по производству телефонов, радиочастотные метки, позволяющие считывать информацию о местонахождении

объекта, также имеют в своем корпусе MID-изделия. В таких отраслях, как медицина и безопасность, MID-изделия применяются в небольшом количестве, однако повышение теплоустойчивости MID-оснований и миниатюризация изделий говорит о том, что в этих и других новых отраслях MID-изделия будут применяться в больших количествах.

Детали, изготовленные по 3D-MID-технологии, уменьшают массогабаритные параметры изделия, а также упрощают его конструкцию. Несомненно, данная технология – это технология не только настоящего, но и будущего. Сейчас невозможно представить мобильный телефон или автомобиль без встроенного в него MID-изделия, хотя в начале XXI века такого практически не было. Объем продаж MID-изделий в начале нулевых был чуть больше 10 млн евро, сейчас же эта сумма перевалила за 200 млн евро в год. Это значит, что совсем скоро MID-изделия придут в те отрасли промышленности, в которых ранее их невозможно было представить.

Основой создания радиоэлектронного изделия с использованием 3D-MID-технологии и одновременно ключевым компонентом является термопласт. На сегодняшний день на мировом и отечественном рынках представлено большое количество термопластов с различными характеристиками и ценой. При этом отсутствует, либо представлена в неполном объеме классификация по основным характеристикам, по которым было бы возможно принимать решение о применимости данного термопласта для создания радиотехнических изделий различного назначения с использованием 3D-MID-технологии. Стоит отметить, что сама технология 3D-MID имеет различные вариации, позволяющие строить необходимые технологические процессы на основе поставленных задач и может быть применима как для бытовых изделий, где отсутствуют специальные требования по эксплуатации, так и при создании изделий с повышенными требованиями к условиям эксплуатации. Это еще более подчеркивает необходимость исследования и классификации термопластов в зависимости от класса решаемых задач.

Для обеспечения качества изготовления радиотехнических изделий на основе технологии производства трехмерных схем на пластике не менее важной задачей является проведение необходимых испытаний материалов, например, на твердость. Для этого необходимо правильно выбрать метод и методику испытаний с применением испытательного оборудования и средств измерений. После выбора подходящего материала, позволяющего решить поставленные задачи по устойчивости к внешним воздействующим факторам, и проведения выбранной процедуры испытаний можно смоделировать технологический процесс изготовления изделия с

применением 3D-MID-технологии, соблюдая необходимую последовательность технологических операций.

Цель работы – исследование текущих возможностей технологии производства трехмерных схем на пластике, анализ требований отечественных и международных стандартов, разработка оптимальных критериев выбора материала основания и методов его испытаний.

1. Классификация термопластов по характеристикам для 3D-MID

Многие страны мира производят различные марки полиамидов, экспортируют их и реализуют на внутреннем. Российские производители отправляют на экспорт 70% всего производства: около 37% поставляется в Китай, 16% – в Индию, 10% – в Турцию, 7% – в Германию. В связи с тем, что в России выпускают, как правило, полиамиды марок ПА6, ПА66, многие виды полиамидов закупают за границей, так как продукция из данных полимеров востребована и пользуется спросом. Проведем сравнительный обзор мировых производителей полиамида с анализом характеристик материала в соответствии с ГОСТ 10589-2016¹, принятым Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации.

Изучение рынка автомобильной промышленности показало [1], что широкое применение в данной отрасли получил полиамид ПА 610. По значению показателя текучести расплава и модуля упругости он превосходит практически все термопласты, а сочетание небольшого водопоглощения с хорошими прочностными свойствами и тепло-, морозостойкостью делает возможным использование ПА-610 в ответственных деталях антифрикционного назначения. Однако его применение ограничено высокой стоимостью. Из ПА-610 методом литья под давлением изготавливают вкладыши и втулки опорных тяг рулевой трапеции, ручки фиксаторов шарнира, вкладыши и рычаги управления коробкой передач, фильтр топливного насоса, зубчатые передачи, уплотнительные устройства, муфты, подшипники скольжения, лопасти винтов, стойкие к действию щелочей, масел, а также антифрикционные покрытия металлов и другие втулки и вкладыши.

Справочные показатели литьевого полиамида по ГОСТ 10589-2016 представлены в табл. 1.

¹ГОСТ 10589-2016 Полиамид 610 литьевой. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с. [GOST 10589-2016 Poliamid 610 lit'evoi. Tekhnicheskie usloviya (Polyamide 610 injection molding. Technical conditions). Moscow: Standardinform; 2017. 16 p. (in Russ.)].

Анализ международного рынка производства РА-610 показал, что одну из лидирующих позиций занимает французская компания Arkema. В табл. 2 приведена спецификация полиамида этой компании под названием «Rilsan Sesno F».

Сравнив характеристики данного полиамида с требованиями ГОСТ 10589-2016, можно прийти к выводу, что почти все они соответствуют ГОСТу, однако температура изгиба под нагрузкой 1.80 МПа составляет 60 °С, что на 5 °С меньше нормы по

Таблица 1. Показатели литьевого полиамида по ГОСТ 10589-2016

Наименование показателя	Норма	Метод испытания
Плотность, г/см	1.09–1.11	ГОСТ 15139
Сопротивление удару по Шарпи на образцах типа 2 без надреза	Не разрушается	ГОСТ 4647
Твердость при вдавливании шарика, МПа	100–150	ГОСТ 4670
Модуль упругости, МПа - при изгибе - при растяжении	1.6×10^3 – 1.7×10^3 1.5×10^3 – 1.7×10^3	ГОСТ 9550
Прочность при растяжении, МПа	50.0–60.0	ГОСТ 11262
Предел текучести при растяжении, МПа	70.0–90.0	Там же
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	100	Там же
Предел прочности при срезе, МПа	40–50	ГОСТ 17302
Удельное объемное сопротивление, Ом·см, не менее	$1-10^{14}$	ГОСТ 6433.2
Удельное поверхностное сопротивление (после пребывания в воде при температуре (20 ± 2) °С в течение 24 ч), Ом	5×10^{12} – 1×10^{13}	ГОСТ 6433.2
Диэлектрическая проницаемость при частоте 106 Гц	4–5	ГОСТ 22372
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 106 Гц, не более	0.06	Там же
Температура изгиба под нагрузкой, °С, не менее, при напряжении 1.80 МПа 0.45 МПа	65 160	ГОСТ 12021
Температура размягчения по Вика, °С	200–220	ГОСТ 15088
Теплостойкость по Мартенсу, °С	55–60	ГОСТ 21341
Коэффициент трения по стали	0.26–0.32	ГОСТ 11629
Средний коэффициент линейного теплового расширения в интервале температур от 20 до 200 °С, С-1	11.7×10^{-5}	ГОСТ 15173
Теплопроводность в интервале температур от 20 до 150 °С, Вт/м·К	0.20–0.19	ГОСТ 23630.2
Показатель текучести расплава при температуре 235 °С, нагрузке 21,19 Н, г/10 мин	4.0–7.0	ГОСТ 11645

Таблица 2. Спецификация РА-610 компании Arkema

Параметры	Сух./Влажн.	Единица измерения	Стандарт
Механические свойства			
Модуль упругости при растяжении	2000/–	МПа	ISO 527-1/-2
Ударная прочность по Шарпи, +23 °С	N/–	кДж/м²	ISO 179/1eU
Ударная прочность по Шарпи, –30 °С	N/–	кДж/м²	ISO 179/1eU
Ударная прочность по Шарпи с надрезом, +23 °С	8/–	кДж/м²	ISO 179/1eA
Ударная прочность по Шарпи с надрезом, –30 °С	6/–	кДж/м²	ISO 179/1eA
Тепловые свойства			
Температура плавления, 10 °С/min	222/*	°С	ISO 11357-1/-3
Температура изгиба под нагрузкой 1.80 МПа	60/*	°С	ISO 75-1/-2
Другие свойства			
Модуль упругости при растяжении	2000/–	МПа	ISO 527-1/-2
Плотность	1080/–	кг/м³	ISO 1183

Примечание: N – разрушения не произошло; «–» – результат отсутствует; * – испытание неосуществимо

межгосударственному стандарту. Полиамид данной компании нашел широкое применение в автомобильной промышленности.

Одной из крупнейших компаний в мире по производству полиамида ПА-610 является компания DuPont (США). Этот полиамид может выдерживать высокие температурные нагрузки, а его специальные модификации, обладающие высокой ударной прочностью, представлены в табл. 3.

Анализ параметров из этой спецификации позволяет утверждать, что:

- значение плотности составляет 1080 кг/м³ при диапазоне 1090–1100 кг/м³, указанном в стандарте;
- температура изгиба под нагрузкой 1.80 МПа составляет 54 °С, что на 11 °С меньше, чем в стандарте.

Остальные характеристики лежат в допустимых пределах.

При растяжении и увеличении температуры модуль упругости снижается (рис. 1).

Данный полиамид обладает отличной текучестью, коротким циклом литья, изделия из него легко извлекаются из пресс-формы. Основное применение он нашел в автомобильной промышленности.

Аналитический обзор рынка производителей полиамида в Европе показал, что компания Solvay engineering plastics (Бельгия) является одной из крупнейших на континенте и одной из самых перспективных. Свойства полиамида данной компании, обладающего высокой ударопрочностью при низкой температуре, приведены в табл. 4. Он предназначен для автомобильной промышленности, где необходимо долгосрочное высокотемпературное использование.

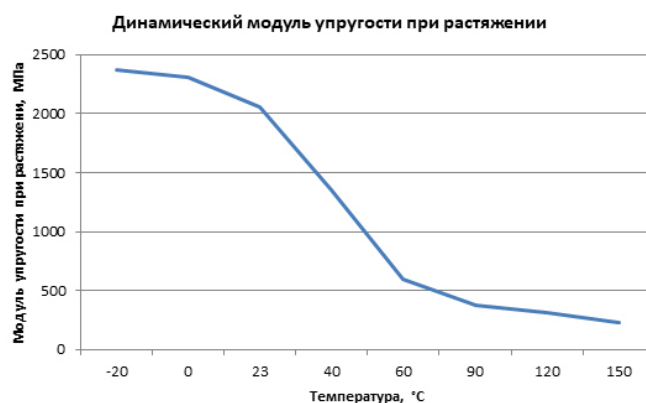


Рис. 1. Динамический модуль упругости ПА-610 при увеличении температуры.

Анализ параметров из этой спецификации позволяет утверждать, что:

- водопоглощение при насыщении составляет 3.1% при норме 3.3%;
- значение плотности составляет 1050 кг/м³ при диапазоне 1090–1100 кг/м³, указанном в стандарте;

На основе проведенного анализа полиамида, входящего в состав продукции трех мировых компаний по производству полиамида можно прийти к выводу, что производители соблюдают не все технические требования, однако их продукция имеет широкий спрос на рынке в промышленности. Такие важные показатели, как температура плавления, соблюдены в соответствии со стандартом, и это значит, что использование материалов допустимо при высоких температурах.

Таблица 3. Спецификация PA-610 компании DuPont

Параметры	Сух./Влажн.	Единица измерения	Стандарт
Реологические свойства			
Усадка при литье, продольная	1.2/*	%	ISO 294-4, 2577
Усадка при литье, поперечная	1.2/*	%	ISO 294-4, 2577
Механические свойства			
Модуль упругости при растяжении	2300/1200	МПа	ISO 527-1/-2
Ударная прочность по Шарпи, +23 °С	N/–	кДж/м ²	ISO 179/1eU
Ударная прочность по Шарпи с надрезом, +23 °С	5.6/–	кДж/м ²	ISO 179/1eA
Тепловые свойства			
Температура плавления, 10 °C/min	225/*	°C	ISO 11357-1/-3
Температура изгиба под нагрузкой 1.80 МПа	54/*	°C	ISO 75-1/-2
Температура изгиба под нагрузкой 0.45 МПа	151/*	°C	ISO 75-1/-2
Другие свойства			
Водопоглощение	3.3/*	%	Сим. по ISO 62
Поглощение влаги	1.4/*	%	Сим. по ISO 62
Плотность	1080/–	кг/м ³	ISO 1183
Специфические свойства материала			
Показатель вязкости	170/*	см ³ /г	ISO 307, 1157, 1628

Примечание: N – разрушения не произошло; «–» – результат отсутствует; * – испытание неосуществимо

Таблица 4. Спецификация PA-610 компании Solvay engineering plastics

Параметры	Сух./Влажн.	Единица измерения	Стандарт
Реологические свойства			
Усадка при литье, продольная	2.4/ *	%	ISO 294-4, 2577
Усадка при литье, поперечная	2.3/ *	%	ISO 294-4, 2577
Механические свойства			
Модуль упругости при растяжении	890/830	МПа	ISO 527-1 /-2
Напряжение при 50% удлинении	50/41	МПа	ISO 527-1/-2
Удлинение в точке разрыва	>50/>50	%	ISO 527-1/-2
Ударная прочность по Шарпи, +23 °С	N/N	кДж/м²	ISO 179/1eU
Ударная прочность по Шарпи, –30 °С	N/N	кДж/м²	ISO 179/1eU
Ударная прочность по Шарпи с надрезом, +23 °С	25/55	кДж/м²	ISO 179/1eA
Ударная прочность по Шарпи с надрезом, –30 °С	4/3.5	кДж/м²	ISO 179 /1eA
Тепловые свойства			
Температура плавления, 10 °С/min	215/ *	°С	ISO 11357-1 / -3
Толщина испытываемого образца	1.6/ *	мм	IEC 60695-11-10
Другие свойства			
Водопоглощение	3.1/ *	%	Сим. по ISO 62
Поглощение влаги	0.5/ *	%	Сим. по ISO 62
Плотность	1050/–	кг/м³	ISO 1183

Примечание: N – разрушения не произошло; «–» – результат отсутствует; * – испытание неосуществимо

2. Методы испытаний термопластов

Ключевой компонент в технологиях 3D-MID – пластик, на который наносится металлическое покрытие. При выборе пластика для изготовления основания изделия 3D-MID необходимо руководствоваться важными для этой технологии требованиями. В первую очередь, это возможность металлизации и пайки.

Пирамида пластмасс представляет собой широко распространенный способ графического представления различий между тремя основными подгруппами термопластичных материалов (рис. 2):

- стандартные термопласты;
- промышленные термопласты (конструкционные);
- высококачественные пластмассы (суперконструкционные).

Основным условием выбора полимера является то, чтобы добавка, содержащая оксид металла, была равномерно распределена и достаточно сконцентрирована в термопласте. В настоящее время почти все ведущие производители предлагают LDS версии своих термопластов. Выбрать можно из аморфных и частично кристаллических полимеров от стандартной до высокой температуры термопласта. К ним относятся многочисленные типы материалов, которые могут быть использованы для бессвинцовой пайки [2].

Рассмотрим несколько примеров материалов.

Росан – термопластичный полиэфир на основе полибутилентерефталата (PBT) и полиэтилентереф-

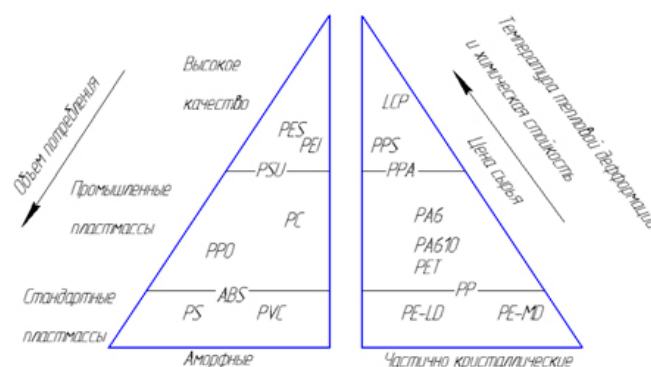


Рис. 2. Пирамида пластмасс.

талата (PET), разработанный компанией Lanxess (Германия). Он обладает высокой устойчивостью к тепловым изменениям, а также хорошей прочностью и твердостью. Кроме того, он имеет высокую абразивную стойкость, надежную химическую стойкость, хорошие электроизоляционные и диэлектрические свойства.

РА6 является частично ароматическим полиамидом на основе материала Utramid от компании BASF AG (Германия). Материал отличается высокой устойчивостью к тепловым искажениям и хорошими механическими свойствами. Кратковременная термостойкость может быть увеличена до 400 °С с помощью сшиваемого варианта этого материала.

LCP (жидкокристаллический полимер) на основе материала Vestra от компании Ticona GmbH (Германия) обладает низкой вязкостью расплава и очень высокой устойчивостью к тепловым искажениям.

PS/ABS (поликарбонат/акрилонитрил/бутадиен/стирол) от компании DSM (Нидерланды) также имеет очень хорошие поверхностные и механические свойства [2]. Изначально пластмассы LDS были черного цвета из-за цвета черных добавок LDS. Теперь это ограничение снято, пластмассовые подразделения компаний SABIC (Саудовская Аравия) и Mitsubishi Engineering Plastics (MEP) (Япония) недавно представили LDS-материалы, которые можно адаптировать практически под любой цвет, который необходим заказчику [3].

Методы определения твердости полиамидов

Широко известным и используемым является испытание твердости по Бринеллю, заключающееся во вдавливании с усилием P , стального шарика диаметром D в поверхность изделия в течение некоторого времени (рис. 3). В результате этого на поверхности остается отпечаток определенного диаметра d [2].

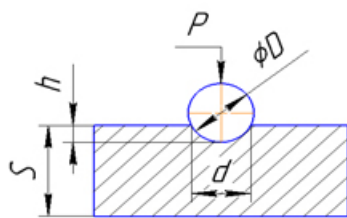


Рис. 3. Схема измерения твердости по Бринеллю.

Твердость определяется делением приложенной к шарiku нагрузки на площадь отпечатка:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (1)$$

Измерение твердости по методу Роквелла заключается во вдавливании алмазного конуса в испытуемый материал под действием двух сил: предварительной P_0 равной 10 кгс, и основной P_1 равной 90 кгс (рис. 4). Общая нагрузка на конус в момент нагружения равна $P = P_0 + P_1$.

После снятия основной нагрузки твердость рассчитывают по глубине отпечатка $h - h_0$ (разность глу-

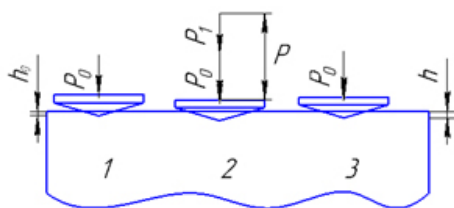


Рис. 4. Схема измерения твердости по Роквеллу.

бин внедрения конуса после снятия основной нагрузки и до ее приложения):

$$HR = 100 - \frac{h - h_0}{0.002}. \quad (2)$$

Измерение твердости по Виккерсу происходит с помощью алмаза в форме пирамиды с квадратным основанием. Его вдавливают в поверхность с испытательной нагрузкой $F = 100, 300$ или 600 Н в течение 40 сек (рис. 5).

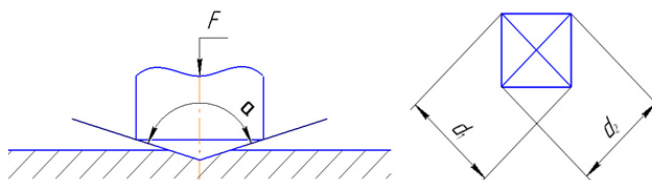


Рис. 5. Схема измерения твердости по Виккерсу.

После снятия нагрузки измеряется длина диагонали отпечатка и рассчитывается число твердости по Виккерсу:

$$HV = (0.189/d_1^2)F. \quad (3)$$

3. Технологический процесс LPKF-LDS

LPKF-LDS – перспективный метод создания электронных схем на трехмерных литых пластмассовых деталях разработанный компанией LPKF Laser & Electronics AG (Германия). Процесс получения такой схемы, особенно на трехмерных деталях, значительно проще, чем при использовании стандартной технологии. При этом отпадает необходимость в использовании предварительной химической обработки поверхности (например, травления), что повышает экологические аспекты технологии производства.

Данный процесс состоит из четырех последовательных этапов:

- литье под давлением;
- лазерное структурирование;
- металлизация;
- отделка поверхности.

Виды пластмасс, представленные в предыдущей главе, полностью подходят для использования методом литья под давлением. Прямое лазерное структурирование основано на удалении вещества с поверхности пластика лазерным импульсом и одновременно активации добавки, необходимой для металлизации (рис. 6). Поверхность пластика становится шероховатой, что обеспечивает надежное сцепление между пластмассой и металлизующим слоем.

Следующей стадией является процесс металлизации. Металлизация происходит в химических стаканах вместимостью 5 литров. Сначала образец пластмассу подвергают тщательной очистке в ультразвуковой ванне (рис. 7).

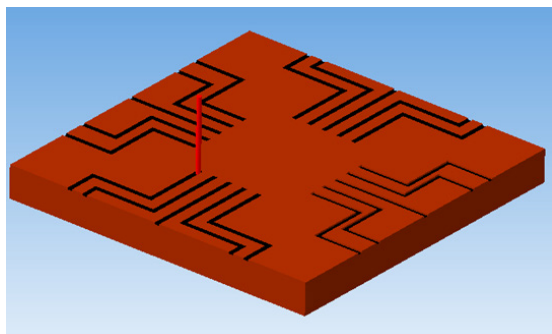


Рис. 6. Лазерное структурирование.

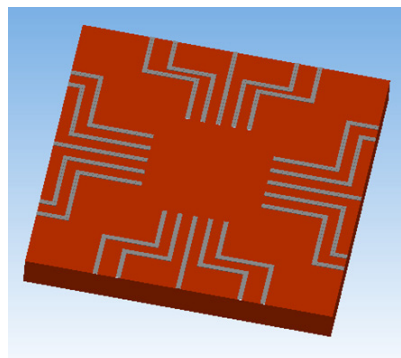


Рис. 9. Никелевая металлизация.

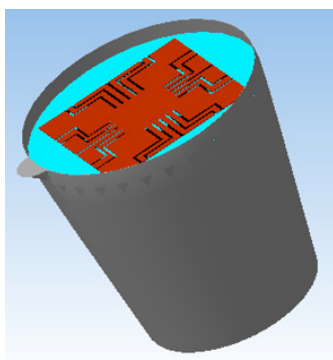


Рис. 7. Очистка пластмассы в ультразвуковой ванне.

После очистки пластмассу погружают в медную ванну (рис. 8). Время выдерживания зависит от активности медной ванны и необходимой толщины меднения. Структурированные лазером участки поверхности меняют черный цвет на цвет меди.

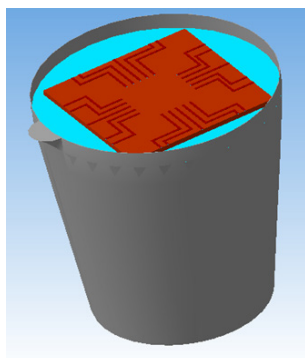


Рис. 8. Меднение пластмассы.

Затем образец погружается в травильный раствор и подвергается затравке в палладиевой ванне, после чего наступает стадия никелевой металлизации (рис. 9).

Завершается процесс металлизации нанесением очень тонкого слоя золотого покрытия (рис. 10). Между всеми стадиями необходима тщательная промывка деионизированной водой.

Завершающим этапом процесса LPKF-LDS является монтаж компонентов. Монтаж на контактные поверхности основания происходит с помощью паяльной пасты или электропроводящего клея (рис. 11).

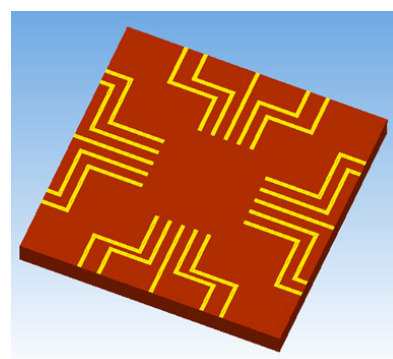


Рис. 10. Нанесение тонкого слоя золотого покрытия.

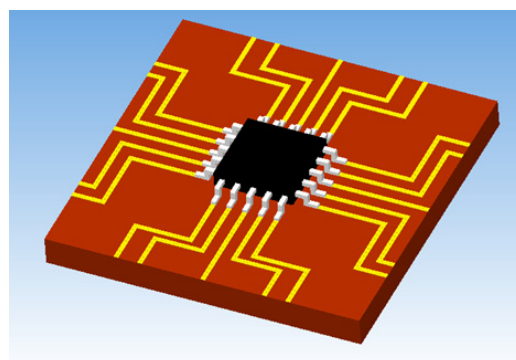


Рис. 11. Монтаж компонентов на основание.

После установки компонентов необходимо провести их выравнивание с тем, чтобы сориентировать нормаль компонента под прямым углом к рабочей поверхности основания. Неровное соединение может привести к вытеканию некоторого количества пасты и к некачественному спаю (рис. 12) [4].

3D-MID-изделия, полученные по данной технологии, находят широкое применение в устройствах связи, в первую очередь – в мобильных телефонах, и в автомобильной промышленности (рис. 13) [5, 6]. В настоящий момент на кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем МИРЭА – Российского технологического университета создается лаборатория «Трехмерные схемы на пластиках и гибких носителях», которая будет осна-

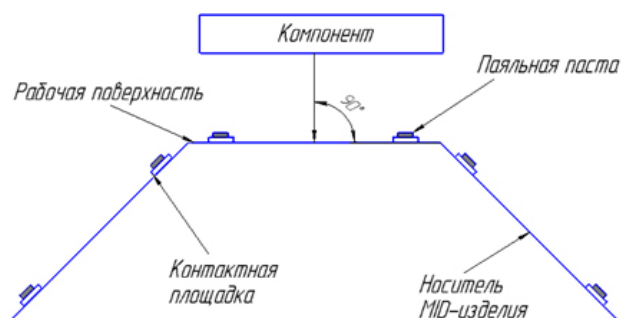


Рис. 12. Монтаж электронных компонентов на рабочую поверхность.

шена линией 3D-MID для использования в учебном процессе и для проведения исследований технологии и ее оптимизации.

Заключение

Авторами был проведен анализ современного состояния и перспектив развития технологии производства трехмерных схем на пластиках [7–10]. В результате проведенного анализа литературных данных были определены необходимые ключевые характеристики базового материала для использования в технологии 3D-MID. Сравнение характеристик проводилось с учетом требований, которые предъявляются современной международной и отечествен-



Рис. 13. 3D-MID-изделия в автомобильной промышленности и устройствах связи [6].

ной нормативной базой. Определены ключевые характеристики, которые могут быть рекомендованы и учтены при принятии решения по выбору конкретного материала. Проведен анализ существующих методов испытания базового материала, необходимых для обеспечения качества производства, показан типовой технологический процесс на примере LPKF-LDS-технологии.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Франке. Й. 3D-MID. Материалы, технологии, свойства: пер. с англ. яз.; под ред. И.А. Волкова. СПб.: ЦОП «Профессия», 2014. 336 с. ISBN: 978-5-91884-062-7
2. Волков И.А. Технология 3D-MID. Новые возможности прототипирования изделий. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2013;3(125):170–175.
3. Франке Й. 3D-MID сегодня и завтра. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2014;7:125–129.
4. Симицкий А.Е., Лицин К.В. 3D MID технология производства трехмерных схем на пластиках. *Наука и производство Урала*. 2016;12:52–54.
5. Шейкин М. Первая Российская конференция 3D-MID. Обзор основных тем. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2013;8:138–147.
6. Группа компаний Остек [электронный ресурс]. URL: <https://ostec-group.ru/>
7. Xu Y., Wu X., Guo X., Kong B., Zhang M., Qian X., Mi S., Sun W. The Boom in 3D-Printed Sensor Technology. *Sensors*. 2017;17(5):1166. <https://doi.org/10.3390/s17051166>
8. Hirt E., Ruzicka K. 3D-MID for Space. In: 2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). 2018. <https://doi.org/10.1109/ESTC.2018.8546449>

References

1. Franke Y. 3D-MID. *Materialy, tekhnologii, svoistva*: per. s angl. yaz.; pod red. I.A. Volkova (3D-MID. Materials, technologies, properties: trans. from Engl.; (Ed.) I.A. Volkov. Sankt Peterburg: Professiya; 2014. 336 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-91884-062-7
2. Volkov I.A. 3D-MID Technology. New Products Prototyping Capabilities. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2013;3(125):170–175 (in Russ.).
3. Franke J. 3D-MID Today and Tomorrow. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2014;7:125–129 (in Russ.).
4. Simidotskii A.E., Litsin K.V. 3D MID technology of three-dimensional circuits on plastics. *Nauka i proizvodstvo Urala = Science and Production of the Urals*. 2016;12:52–54 (in Russ.).
5. Sheikin M. The First Russian 3D-MID Conference. Main Topics Review. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*. 2013;8:138–147 (in Russ.).
6. Ostec Corporate Group. URL: <https://ostec-group.ru/>
7. Xu Y., Wu X., Guo X., Kong B., Zhang M., Qian X., Mi S., Sun W. The Boom in 3D-Printed Sensor Technology. *Sensors*. 2017;17(5):1166. <https://doi.org/10.3390/s17051166>

9. LPKF LDS: Laser Direct Structuring for 3D Moulded Interconnect Devices, Feb 2019.

URL: <https://www.lpkf.com/en/industries-technologies/electronics-manufacturing/3D-MIDs-with-laser-direct-structuring-lds/>

10. Kamotesov S., Lombard P., Sernet V., Allard B. et al. Omnidirectional inductive wire-less charging of a 3D receiver cube inside a box. In: Proc. 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). 2018.

<https://doi.org/10.1109/WPT.2018.8639240>

8. Hirt E., Ruzicka K. 3D-MID for Space. In: 2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). 2018.

<https://doi.org/10.1109/ESTC.2018.8546449>

9. LPKF LDS: Laser Direct Structuring for 3D Moulded Interconnect Devices, Feb 2019.

URL: <https://www.lpkf.com/en/industries-technologies/electronics-manufacturing/3D-MIDs-with-laser-direct-structuring-lds/>

10. Kamotesov S., Lombard P., Sernet V., Allard B. et al. Omnidirectional inductive wire-less charging of a 3D receiver cube inside a box. In: Proc. 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). 2018.

<https://doi.org/10.1109/WPT.2018.8639240>

Об авторах:

Иванов Вячеслав Сергеевич, ассистент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: Ivanovmirea1@yandex.ru.

Гладкий Дмитрий Александрович, ассистент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Воруничев Дмитрий Сергеевич, старший преподаватель кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Vyacheslav S. Ivanov, Assistant, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). E-mail: Ivanovmirea1@yandex.ru.

Dmitry A. Gladky, Assistant, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia).

Dmitry S. Vorunichev, Senior Lecturer, Department of Design and Production of Radio-Electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia).

Поступила: 19.06.2020; получена после рецензирования: 13.08.2020; принята к опубликованию: 25.09.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-58-72>



УДК 004.94

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Адаптивная система визуализации электромагнитного поля рассеяния летательных аппаратов

З.М. Курбанисмаилов,

А.Т. Тарланов[@],

Е.Д. Матяш,

Е.С. Карбова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: lev.brave@gmail.com

Космическая отрасль всегда занималась созданием уникального оборудования, в том числе и контрольного. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) таких систем осуществляется на всех этапах жизненного цикла летательного аппарата (ЛА), начиная от его разработки, включая стендовые испытания и этапы эксплуатации. Цифровая техника обладает потенциально высокой помехоустойчивостью, но любая современная техническая система в совокупности содержит набор датчиков, линий связи, приемных антенн, чувствительных к воздействию внешних мешающих сигналов, распространяющихся как по проводам, так и по эфиру. Отсюда очевидна актуальность обеспечения ЭМС интегрированных технических систем, выполняющих функции измерения, обработки данных и формирования управляющих воздействий, как цифровых, так и аналоговых. Электромагнитная совместимость сложной технической системы воздушного или космического летательного аппарата с другими его системами является обязательным условием их устойчивого функционирования. Авиакосмическая техника, в которой из-за плотной компоновки тесно сопряжены процедуры высокочувствительных измерений и мощные управляющие воздействия, требует решения проблемы ЭМС. В работе показана необходимость эффективной технологии контроля электромагнитного излучения, создаваемого в окружающем пространстве как отдельными подсистемами, так и всем объектом в целом. Решены задачи анимации во времени, отображения количественных величин, пространственной визуализации. Рассматривается методика визуализации 3D электромагнитного поля в пространстве и во времени. Показано, что существующие методы визуализации не позволяют решить поставленные задачи. Предложена система картографирования поля излучения в ограниченной зоне наблюдения по заданной расчетной 3D-сетке и его визуализации.

Ключевые слова: электромагнитное поле, напряженность, визуализация, интерполяция, плоскость, анимация, индукция, магнитное поле, объект исследования

Для цитирования: Курбанисмаилов З.М., Тарланов А.Т., Матяш Е.Д., Карбова Е.С. Адаптивная система визуализации электромагнитного поля рассеяния летательных аппаратов. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):58–72. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-58-72>

RESEARCH ARTICLE

Adaptive system for visualization of the electromagnetic scattering field of aircraft

**Zaur M. Kurbanismailov,
Arslan T. Tarlanov@,
Ekaterina D. Matyash,
Elena S. Karbova**

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
@Corresponding author, e-mail: lev.brave@gmail.com

The space industry has always set ambitious tasks to create unique equipment, including control equipment. Ensuring electromagnetic compatibility (EMC) of such systems is carried out at all stages of the life cycle of an aircraft (AC), starting from its development, including testing and stages of operation. Digital technology is characterized by high noise immunity. However, any modern technical system in the aggregate contains sensors, communication lines and receiving antennas sensitive to the effects of external interfering signals that propagate both through wires and over the air. Hence, the relevance of ensuring the EMC of integrated technical systems that perform the functions of measurement, data processing and the formation of control actions, both digital and analog, is obvious. The electromagnetic compatibility of a sophisticated aircraft or spaceship technical system with other systems is a prerequisite for their sustainable operation. Aerospace technology, where both highly sensitive measurements and energetic control effects are closely combined in the dense layout of an aircraft, requires a solution to the EMC problem. This paper shows the need for effective technology to control the electromagnetic radiation created in the surrounding space, both by subsystems of aircraft and by the whole object. A method for visualizing 3D electromagnetic field both in space and in time is considered.

Keywords: electromagnetic field, visualization, interpolation, plane, animation, induction, magnetic field, object of study

For citation: Kurbanismailov Z.M., Tarlanov A.T., Matyash E.D., Karbova E.S. Adaptive system for visualization of the electromagnetic scattering field of aircraft. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):58–72 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-1-58-72>

Введение

Электронные устройства на современном этапе развития стали неотъемлемой частью жизни человека и любой технической системы, обладающей интерактивными свойствами и требующей определенных условий для устойчивого функционирования. Одним из таких обязательных условий является электромаг-

нитная совместимость (ЭМС) [1] всей системы и её подсистем друг с другом и с другими системами, не менее сложными и чувствительными.

Цифровая техника обладает потенциально высокой помехоустойчивостью, но любая современная техническая система в совокупности содержит набор датчиков, линий связи, приемных антенн, чувствительных к воздействию внешних мешающих сигнала.

лов, распространяющихся как по проводам, так и по эфиру. Отсюда очевидна актуальность обеспечения ЭМС интегрированных технических систем, выполняющих функции измерения, обработки данных и формирования управляющих воздействий, как цифровых, так и аналоговых.

Одним из примеров, где требуется решение данной проблемы, является авиакосмическая техника, в которой из-за плотной компоновки воздушного или космического летательного аппарата (ЛА) тесно сопряжены процедуры высокочувствительных измерений и мощные управляющие воздействия, которые не могут не влиять друг на друга. Космическая отрасль всегда ставила амбициозные задачи по созданию уникального оборудования, в том числе и контрольного. Обеспечение ЭМС таких систем осуществляется на всех этапах жизненного цикла ЛА, начиная от его разработки, включая стендовые испытания и этапы эксплуатации.

Инструментами обеспечения ЭМС [2] являются экранирование, разнесение воздействий по времени и по частоте, минимизация перекрестного влияния конструктивными и схемотехническими методами с объективной визуализацией контроля результатов таких мероприятий. Для количественной оценки ЭМС объекта необходима эффективная технология контроля электромагнитного излучения, создаваемого в окружающем пространстве как отдельными подсистемами, так и всем объектом в целом. Такая информация, привязанная к координатной системе объекта, позволит анализировать вклады различных подсистем в общее поле рассеяния, локализовать источники такого излучения, а также предлагать шаги по минимизации их влияния. Методика должна позволять оценивать с достаточной точностью как магнитное, так и электрическое поля, создаваемые системами объекта на различном удалении с точной привязкой результата измерения к системе координат объекта. Одним из важных элементов такой технологии является визуализация результатов в наглядном и простом виде, но в то же время с достаточной точностью.

Существующие методы визуализации [3] не позволяют решить задачи выбора плоскости наблюдения в трехмерном пространстве, а также организовать наглядную 3D-визуализацию результатов пространственного распределения поля рассеяния вокруг объекта.

Целью данной работы является формулирование предложений по визуализации пространственного распределения физических полей в различных областях исследования.

В работе предложена система оценки внешнего электромагнитного излучения объекта авиационной или космической техники, построенная на картогра-

фировании поля излучения во внешнем пространстве в ограниченной зоне наблюдения по заданной расчетной 3D-сетке [4], вводе результатов измерения в программный продукт системы и их визуализация как на выбранной плоскости произвольной ориентации и положения в зоне наблюдения, так и в виде трехмерных изображений. Предложен алгоритм количественной визуализации результатов измерения как в виде изменяющейся яркости маркеров в точках измерений, так и в виде заданной априори цветовой шкалы. Решены задачи анимации во времени, отображения количественных величин, пространственной визуализации. Полученное решение позволяет сократить объем измерений путем адаптивной интерполяции результатов с оперативным регулированием шага расчетной сетки. Намечены перспективные области применения.

Определение визуализации

Под процедурой визуализации будем понимать метод представления информации в визуальном виде, то есть в виде, пригодном для изучения его человеком с помощью зрения [5]. Всем известна визуализация магнитного поля с помощью железных опилок либо визуализация потоков жидкости или газа путем введения в них контрастных веществ – дыма в газ, пузырьков в жидкость, либо визуализация внутренних органов человека с помощью отраженных акустических волн – ультразвуковое исследование (УЗИ). Визуализация электромагнитного поля рассеяния в поставленной задаче подразумевает дискретизацию данного поля путем задания характеризующих значений в точках трехмерной расчетной сетки, имеющей для определенности, кубическую форму. Используя такую сетчатую структуру с численными значениями в точках сетки, наблюдатель получит представление как о пространственном распределении исследуемого поля, так и о его количественных значениях.

Обзор методов визуализации экспериментальных данных

Визуальное представление результатов расчетов или измерений всегда представляло интерес как конечная фаза любого исследования, отвечающая на вопрос о величине и характере измеряемой или рассчитываемой величины. Осциллографы [6] еще в совсем недавнем прошлом являлись средством для визуализации измеряемых величин длительностью до единиц секунд. Для визуализации и регистрации длительных процессов (до единиц часов) были созданы многоканальные шлейфовые осциллографы [7], записывающие процесс на рулоны фоточувствительной бумаги. Также широко применялись самописцы [8],

тоже использовавшие бумагу, но уже с «чернильной» записью. Визуализация быстрых и длительных процессов в широком динамическом диапазоне с одновременной регистрацией информации стала возможна лишь в результате появления компьютеров с развитым программным обеспечением.

Популярные вычислительные пакеты MATLAB и MathCad имеют развитые средства визуализации результатов расчета, как в виде 3D-пространственных построений, так и многоканальных зависимостей от времени. Однако данные пакеты являются офлайн приложениями, и их согласование с системами реального времени вызывает ряд трудностей, непредусмотренных данными вычислительными средствами.

Современные компьютерные программы визуализации [9–11] представлены такими универсальными продуктами, как например, Google Data Studio, Power BI, Tableau, ChartBlocks, Plotly, Infogram, DataDeck и многими другими аналогичными. Данные продукты широко применяются в бизнес-аналитике, логистике и позволяют давать наглядный вид расчетным данным в виде чартов, диаграмм, функциональных графиков и отчетов. Особое внимание здесь уделяется порядку расстановки информации, созданию зрительных образов, как показано на рис. 1, что помогает аналитику или руководителю принимать правильные управленческие решения путем выявления трендов и вычисления статистических оценок по имеющейся информации.

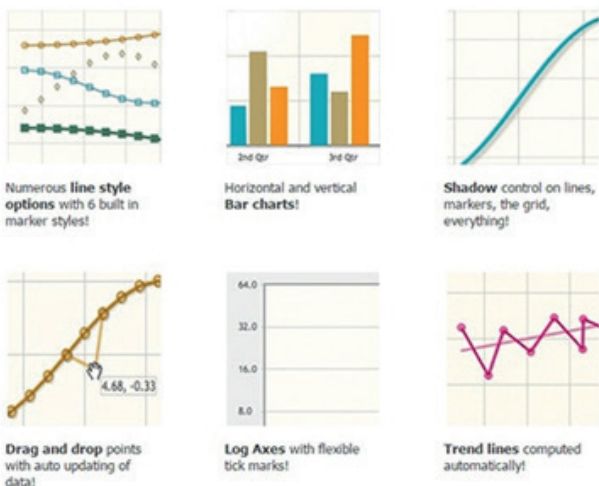


Рис. 1. Некоторые стандартные инструменты визуализации информации в бизнесе.

Однако в научных задачах данные программные продукты имеют ограниченное применение, так как не позволяют осуществлять пространственную 3D-визуализацию, работают в режиме офлайн, не имея связи с внешним интерфейсом, и тем более не отображают 3D-процессы в реальном времени. Кроме того, разработчики перечисленных аналогов не

дают, как правило, SDK (Software Development Kit) к своим продуктам, что ограничивает возможности их применения.

Выявление проблемы

Таким образом, анализ показал, что для исследования и наглядного представления данных о внешних электромагнитных полях, создаваемых бортовыми системами современного ЛА, воздушного либо космического, необходимо создать средство визуализации результатов измерений, соответствующее следующим выявленным требованиям:

1. Представление данных должно производиться в пределах расчетной сетки с априори заданным объемом и шагом по трем координатам;
2. Визуализацию необходимо проводить в реальном времени с установленным периодом смены информационного кадра и сохранением предыдущих кадров;
3. Информация должна представляться на выбранной плоскости произвольной ориентации в выделенной зоне наблюдения либо в виде 3D-конфигурации, отражающей пространственное распределение исследуемого поля;
4. Создаваемый программный продукт должен иметь аппаратно-программный интерфейс с внешней системой аналоговых измерений, привязанной к системе координат исследуемого объекта.

1. Методология создания программного продукта

Определение количества и положения узлов расчетной сетки

Авторами работы предложено использовать равноудаленное положение узлов расчетной сетки в пространстве зоны наблюдения кубической формы, что позволяет приписывать расчетные или измеренные значения индукций и напряженностей контролируемых полей [12–15] конкретным точкам пространства, окружающего исследуемый объект. Координаты расположения узлов контрольной сетки являются параметрами, позволяющими количественно контролировать и привязывать напряженность электромагнитного поля к системе координат объекта. В объем зоны наблюдения вписывается трехмерная сетка из контрольных точек, находящихся в узлах. Количество точек по одной стороне контролируемого объема указывается целочисленным натуральным числом, что позволяет легко изменять на программном уровне размер и детализацию рассматриваемой системы визуализации.

Количество точек РРС, располагающихся на произвольно выбранной плоскости сечения объема наблюдения, как показано на рис. 2, определяется по формуле:

$$PPC = R^2, \quad (1)$$

где R – количество расчетных точек по одной из осей выбранной плоскости.

Итоговое количество точек в указанном объеме можно рассчитать по формуле:

$$PC = R^3. \quad (2)$$

Нумерация расчетных точек начинается с нижнего левого заднего края объема с прямоугольной декартовой системой координат, то есть при $X < 0$, $Y < 0$, $Z < 0$ и продолжается сначала по оси X , затем по осям Y и Z с шагом PS [м], вычисляемым по формуле:

$$PS = V/(R-1), \quad (3)$$

где V – длина стороны рассчитываемого куба [м].

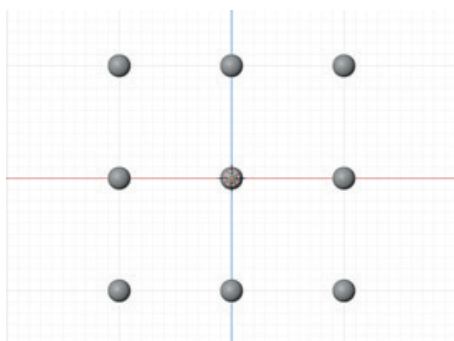


Рис. 2. Расчетные точки на плоскости (вид спереди).

Положение каждой расчетной точки по осям X , Y и Z можно вычислить по формулам:

$$PX = MOD(I, R) \cdot PS - V/2, \quad (4)$$

$$PY = MOD(I/R, R) \cdot PS - V/2, \quad (5)$$

$$PZ = I/PPC \cdot PS - V/2, \quad (6)$$

где MOD – результат деления с остатком первого аргумента на второй; I – индекс (номер) расчетной точки.

Данная методика одинаково хорошо работает как в правосторонней, так и в левосторонней системе координат [16], однако в данной работе будем использовать традиционную левостороннюю систему. Используя формулы (1)–(6), можно сгенерировать трехмерный куб расчетных точек, как показано на рис. 3, который и позволит привязать результаты измерений к конкретной системе координат объекта наблюдения.

Нумерация точек кубической расчетной сетки с разрешением 3 точки на сторону показана на рис. 4. Чтобы увидеть разницу влияния разрешения на конечное визуальное представление, покажем сетку,

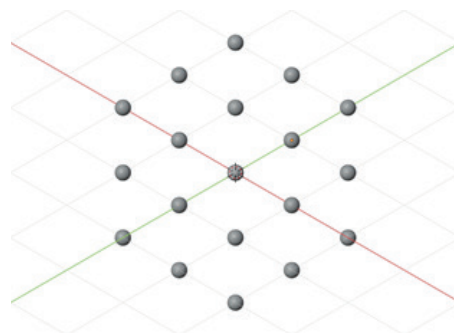


Рис. 3. Куб расчетной сетки, вписанный в зону наблюдения полей рассеяния, в данном случае – с разрешением 3 точки на сторону куба.

содержащую по 7 точек на каждую сторону (рис. 5). Измерения в узлах расчетной сетки с описанными выше координатами позволяют сформировать массив данных, отражающих поле рассеяния объекта в момент наблюдения. Размер массива вычисляется по формуле (2), а разрешение и длину стороны кубической зоны наблюдения легко контролировать, меняя параметр R или V , соответственно.

Приведенные выше формулы позволяют подбирать длину стороны и разрешение зоны наблюдения, необходимые для решения задач в зависимости от габаритов объекта наблюдения. При этом каждому узлу расчетной сетки приписывается значение моду-

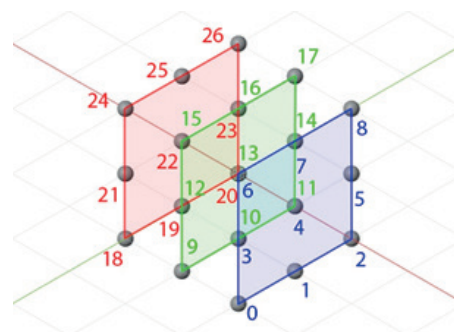


Рис. 4. Индексация (нумерация) расчетных точек зоны наблюдения.

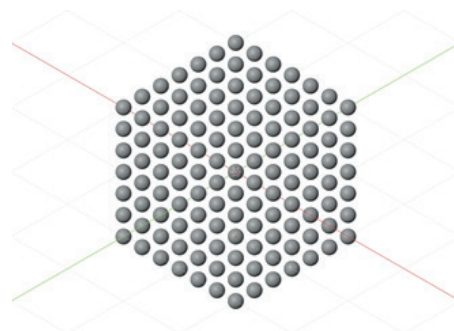


Рис. 5. Кубическая расчетная сетка с разрешением 7 точек на сторону.

ля вектора напряженности измеряемого поля рассеяния и его направление в этой точке, поступающие от измерительной системы.

Пример реализации качественной картины поля с помощью черно-белой шкалы напряженности наблюдаемого поля показан на рис. 6. Здесь темным точкам соответствует слабая напряженность поля, белым – сильная, то есть шкала напряженности пропорциональна яркости маркера и распространяется от черного цвета к белому. Визуализация такой черно-белой карты дает возможность получить качественное представление о напряженности электрического или магнитного полей [13] в зоне наблюдения, что может быть весьма полезным на первых оценочных этапах исследования.

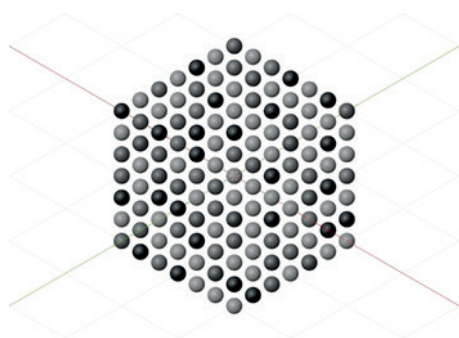


Рис. 6. Точечное представление напряженности поля с пропорциональным регулированием яркости маркеров в узлах сетки.

Дальнейшая обработка представленных результатов позволяет, в том числе, интерполировать значения напряженности в узлах сетки на произвольные промежуточные точки в пространстве между узлами. При этом интерполяцию можно проводить на поверхности условной плоскости, произвольно расположенной по отношению к детерминированным осям системы координат, что позволяет осуществлять детальную визуализацию в выбираемых направлениях.

Определение точек, включающих в себя расчетный пиксель

Для описания геометрической плоскости необходимы как минимум три формирующих ее точки. Такая плоскость используется в компьютерной графике для представления мешей. Меш – это набор точек в пространстве и их связей друг с другом, формирующих некоторое количество плоскостей, иногда со смежными ребрами. Меш относится к категории векторной графики, что делает необходимой его растеризацию перед выводом на дисплей. Растеризация [17] – это процесс конвертации данных из объемного представления в двумерное изображение на выбранной плоскости, состоящее из отдель-

ных пикселей. Координаты каждого пикселя плоскости рассчитываются из координат ближайших узлов фиксированной расчетной сетки, описанной выше. Такой пиксель будем называть расчетным пикселем. Расчетный пиксель хранит информацию о своем цвете (величине индукции) и позиции в трехмерном пространстве расчетной сетки. Эта информация используется для определения соседних индексов смещения расчетных точек, между которыми оказался данный пиксель. Для вычисления меньшего индекса смещения используется формула:

$$RL = FLOOR((PP + V/2)/PS), \quad (7)$$

где $FLOOR$ – функция округления вниз до ближайшего целого; PP – позиция по конкретной оси расчетного пикселя в пространстве.

В качестве параметра PP необходимо подставлять позицию пикселя по каждой из осей, определяя индекс смещения по этой оси, относительно которого расчетный пиксель находится правее, выше или глубже, в зависимости от подставленной оси. Индекс, полученный из (7), может выйти за границу рассчитываемого объема. Поэтому, чтобы этого не произошло, ограничим значения индексов смещения максимальным порогом (границей куба):

$$IRL = MIN(RL, R - 1), \quad (8)$$

$$IRH = MIN(RL + 1, R - 1), \quad (9)$$

где MIN – функция нахождения минимума между двумя параметрами; RL – меньший индекс смещения без учета выхода за границы.

Формулы (7)–(9) определяют индексы смещения расчетных точек по горизонтали (ось X), вертикали (ось Y) и глубине (ось Z), внутри или на поверхности которых находится расчетный пиксель. Это необходимо для билинейной интерполяции значения расчетного пикселя между окружающими его расчетными точками в пространстве зоны наблюдения.

Интерполяция пикселя в пределах элемента сетки

На следующем этапе необходимо рассчитать позицию пикселя относительно окружающих его восьми расчетных точек ближайших узлов сетки. Для этого сначала вычисляем позицию пикселя относительно координат любой первой из окружающих расчетных точек узлов. В данной методике для этого выбрана левая нижняя задняя расчетная точка ($I1$) из восьми окружающих, как показано на рис. 7. На рисунке условный расчетный пиксель (красная точка) находится в геометрическом центре расчетных точек и координаты его отсчитываются (черная

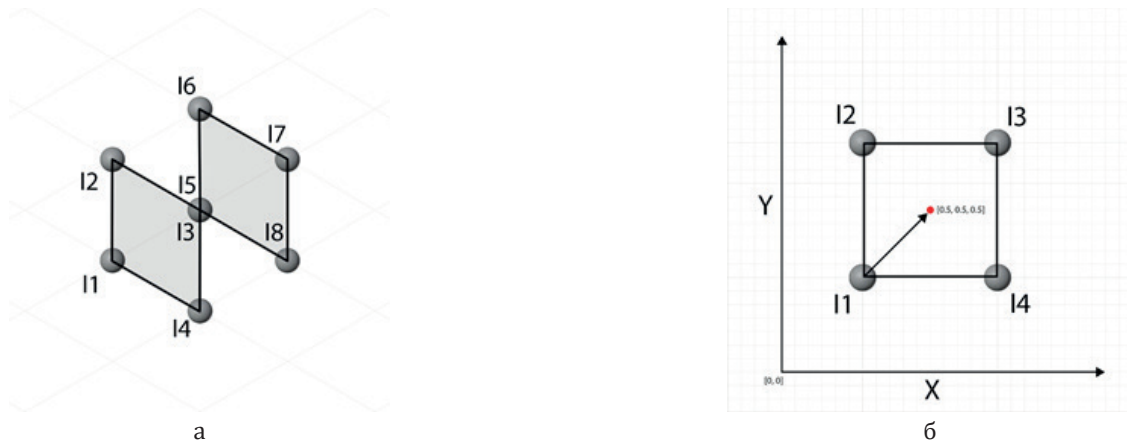


Рис. 7. Относительная позиция расчетного пикселя:
а – перспектива и б – вид сбоку.

стрелка) от начальной расчетной точки узла $I1$. Для вычисления нормализованной позиции координаты пикселя делятся на расстояние между точками – шаг сетки.

Исходя из условной равноудаленности расчетного пикселя от узлов сетки, его нормализованными координатами в данном случае будут $[0.5, 0.5, 0.5]$, которые вычислены по следующей формуле:

$$NP = (WP - I1) / PS, \quad (10)$$

где WP – вектор, представляющий позицию расчетного пикселя в пространстве.

Полученные таким образом нормализованные координаты рассматриваемого пикселя отражают его близость к узлам расчетной сетки. Чем меньше значение нормализованной координаты по выбранной оси координат, тем ближе расчетный пиксель к расчетной точке $I1$, чем больше – тем ближе к соседней точке по этой же оси.

Преобразование индексов смещений в индекс расчетных точек

Для преобразования нормализованных, как показано выше, индексов смещений пикселя в пределах элемента сетки в реальные координаты расчетной сетки предложено использовать следующую формулу:

$$I(HI, VI, DI, R) = HI + VI \cdot R + R^2 \cdot DI, \quad (11)$$

где HI – индекс смещения по горизонтали; VI – индекс смещения по вертикали; DI – индекс смещения по глубине.

Данную формулу необходимо применить столько раз, сколько узлов окружают рассматриваемый пиксель, а именно $n = 8$, каждый раз подставляя в нее координаты соответствующего узла:

$$\begin{aligned} I1 &= I(HL, VL, DL, R); I2 = I(HL, VH, DL, R); \\ I3 &= I(HH, VH, DL, R); I4 = I(HH, VL, DL, R); \\ I5 &= I(HL, VL, DH, R); I6 = I(HL, VH, DH, R); \\ I7 &= I(HH, VH, DH, R); I8 = I(HH, VL, DH, R); \end{aligned}$$

где HL и HH – меньшее и большее значение индекса по горизонтали, VL и VH – меньшее и большее значение индекса смещения по вертикали, DL и DH – меньшее и большее значение индекса смещения по глубине.

Билинейная интерполяция между расчетными точками

Имея нормализованные координаты пикселя в пределах элемента расчетной сетки, как показано выше, выполним интерполяцию координат [18] между узлами сетки, расположенными напротив друг друга, а затем – между полученными результатами. Такой способ интерполяции принято называть билинейным. При этом мы помним, что каждому пикселю приписан поступающий от измерительной системы вектор напряженности электрического поля либо вектор индукции магнитного поля, в зависимости от вида измерений, по которым в данный момент времени ведется визуализация. При этом подразумевается, что измерительная система выполняет векторные измерения исследуемых электромагнитных полей.

Каждый вектор описывается величиной модуля, не зависящего от ориентации, и направлением, задаваемым, как правило, соотношением ортогональных компонент вектора. Сначала необходимо интерполировать значения модулей рассматриваемых векторов по значениям нормализованных координат, вычисленных в соответствии с (11). Формула интерполяции между двумя значениями выглядит следующим образом:

$$LI(F, T, P) = F + (T - F) \cdot P, \quad (12)$$

где F – начальное значение, T – конечное значение, P – относительное смещение от F к T .

Данная формула работает и в отношении ортогональных компонент векторов путем применения ее к отдельным их сопоставленным компонентам:

$$\begin{aligned} LIV = (LI(V1X, V2X, P), LI(V1Y, V2Y, P), \\ LI(V1Z, V2Z, P)), \end{aligned} \quad (13)$$

где $V1X$, $V1Y$ и $V1Z$ – значения компонент первого вектора; $V2X$, $V2Y$ и $V2Z$ – значения компонент второго вектора; P – относительное смещение от первого вектора ко второму.

Длина вектора вычисляется по формуле:

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (14)$$

где X , Y и Z – компоненты измеренного вектора по осям координат.

Так как имеется 8 узлов окружающего элемента расчетной сетки, то сначала выполним интерполяцию по вертикальной оси между $I1$ и $I2$, используя значение нормализованной координаты Y расчетного пикселя как показатель интерполяции. Затем повторяем тот же прием между $I4$ и $I3$, а результаты интерполируем между собой по значению нормализованной координаты X пикселя, как показано на рис. 8.

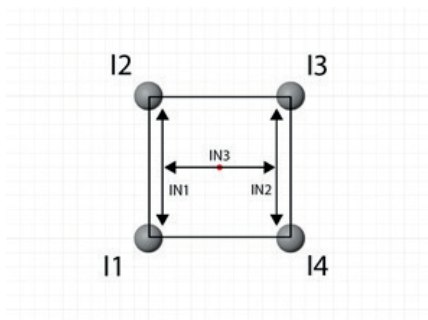


Рис. 8. Билинейная интерполяция между расчетными точками.

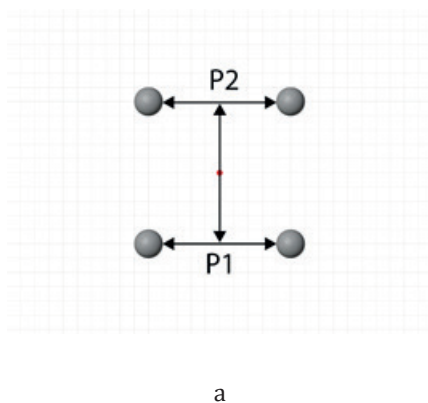


Рис. 9. Интерполяция промежуточных расчетных точек, лежащих на плоскостях ($P1$ и $P2$): а – вид сверху, б – перспектива.

Результатом данной операции окажется вектор напряженности электрического или индукции магнитного поля в точке, расположенной прямо на плоскости, формируемой расчетными точками $I1$, $I2$, $I3$ и $I4$. Такую же билинейную интерполяцию необходимо проделать с точками $I5$, $I6$, $I7$ и $I8$. Полученные результаты для обеих плоскостей интерполируем между собой по значению нормализованной координаты оси Z -пикселя, как показано на рис. 9.

Таким образом, вычисляется итоговый вектор напряженности электрического или индукции магнитного поля [12–15] в координатах пикселя. По вычисленным значениям можно задать яркость отображаемого пикселя в диапазоне от черного до белого на выбранной плоскости, произвольно пересекающей заданный объем зоны наблюдения, как показано на рис. 10.

Видно, что яркость пикселей отражает измеряемые модульные значения [12, 13], а смежные области также билинейно интерполируются для наглядности переходов.

Созданный программный продукт позволяет выбирать произвольное положение контрольной плоскости, на которой проводится визуализация результатов измерений полученных в ходе расчетов ЭМС, как показано на рис. 11.

Из рисунка видно, что контрольная плоскость визуализации образуется интерполяцией соседних плоскостей узлов. Высокая градиентность фона на плоскости визуализации обусловлена малым числом узлов сетки на выбранном интервале зоны наблюдения. Увеличение данного числа даже до $n = 10$ позволяет получить более плавное распределение измеряемого и интерполируемого изображения поля, как показано на рис. 12.

Здесь темные участки соответствуют меньшим значениям модуля измеряемого вектора, светлые – большим. Произвольное перемещение, вращение и масштабирование плоскости визуализации в пределах объема наблюдения не сказывается на точности интерполяции и представления измеряемых значений, поступающих от измерительной системы.

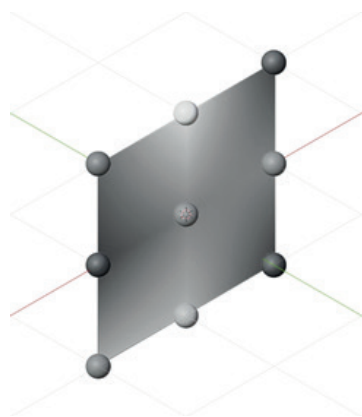


Рис. 10. Выбранная плоскость отображения модульных значений измеряемых величин по результатам интерполяции.

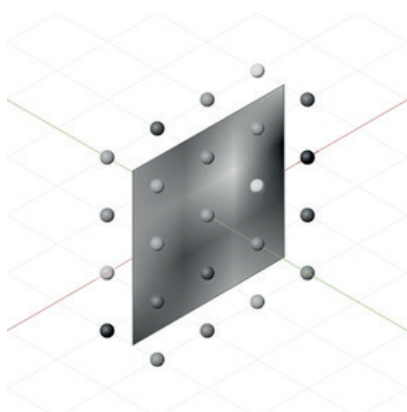


Рис. 11. Плоскость визуализации, расположенная между двумя плоскостями узлов расчетной сетки.

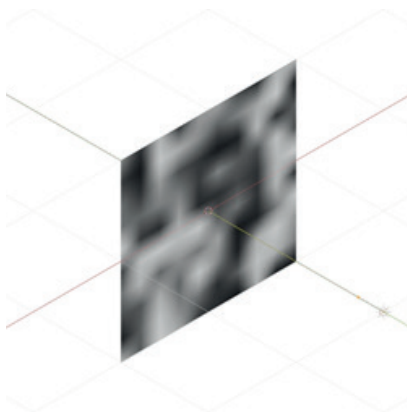


Рис. 12. Визуализируемая алгоритмом плоскость при более высоком разрешении (узлы сетки скрыты для наглядности).

Анимация визуализации во времени

Для анимации работы визуализации результатов модульных и векторных измерений во времени предусмотрена возможность периодической замены массива данных, поступающего от измерительной системы, что осуществляется через задаваемый интервал времени. Так как исследования ЭМС объекта в основном осуществляются в стационарном режиме, то интервалы времени замены массивов устанавли-

ваются в диапазоне единиц секунд, что позволяет проводить исследования долговременной стабильности наблюдаемого излучения объекта. Однако, созданный программный продукт не имеет теоретических ограничений для сокращения, при необходимости, интервала времени наблюдения до малых долей секунды.

Объемная визуализация результатов измерений полей рассеяния

Для объемной 3D-визуализации предложено создавать серию разных плоскостей формирующих кубы разных объемов, центры которых расположены в геометрическом центре рассчитываемой трехмерной сцены. Размеры кубов имеют положительное фиксированное приращение, такое, что объем максимального по размеру куба совпадает с объемом рассчитываемой трехмерной сцены. К примеру, в случае если количество кубов $N = 10$, а длина стороны сцены $SV = 50$ [м], приращение размера будет рассчитываться по формуле $INC = SV/N$.

Плоскости формирующие кубы должны иметь прозрачность, рассчитываемую по формуле $PT = 100 - 100/N$, это позволит наблюдать расчетные значения вглубь сцены, как показано на рис. 13.

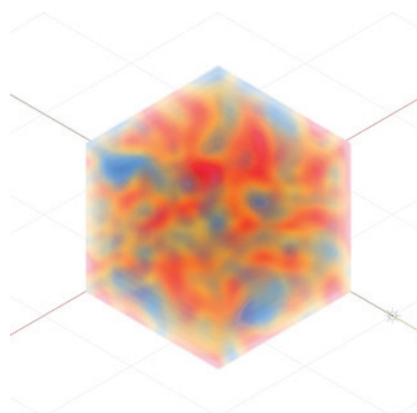


Рис. 13. Визуализация измеряемых значений в объеме зоны наблюдения.

Предложенный механизм позволяет также понять, как выглядит распределение электромагнитных полей внутри трехмерной сцены при изменении координат внешней точки наблюдения.

Цветовая карта визуализации

Созданный программный продукт позволяет отображать масштаб величины измеряемой напряженности или индукции не только яркостью маркера, но и его цветом. Для этого предложена цветовая маркировка результата интерполяции по формуле (14) в соответствии со шкалой, показанной на рис. 14.



Рис. 14. Карта соответствия цветов и измеряемых значений.

Карта подстраивается (обладает адаптивностью) под результирующие значения, где минимальному измеряемому значению соответствует ее крайний левый пиксель, а максимальному – крайний правый пиксель.

Границы шкалы измеряемых величин устанавливаются в начальном диалоге совместно с объемом зоны наблюдения и шагом расчетной сетки. По заданным граничным значениям предложено следующее выражение для вычисления относительной координаты CPX пикселя на приведенной выше шкале – карте соответствия цветов:

$$CPX = (L - MIV) / (MAV - MIV), \quad (15)$$

где L – длина вектора напряженности в расчетном пикселе; MIV – минимальное значение среди всех расчетных точек; MAV – максимальное значение среди всех расчетных точек.

Для непосредственного извлечения цвета предложено использовать следующее выражение:

$$TEX = FLOOR(ABS(MOD(CPX, 1)) \cdot W), \quad (16)$$

где $FLOOR$ – функция округления вниз до ближайшего целого; ABS – функция, извлекающая абсолютное значение; MOD – функция деления с остатком первого аргумента на второй; W – ширина текстуры в пикселях.

Данная функция извлекает цвет пикселя из указанной выше карты цветов, который и является выходным параметром алгоритма цветовой визуализации, результаты которого показаны на рис. 15. Из рисунка видно, что малым значениям измеренных величин (темные сферы) соответствуют более холодные цвета на выбранной плоскости визуализации, большим значениям (светлые сферы) – более теплые.

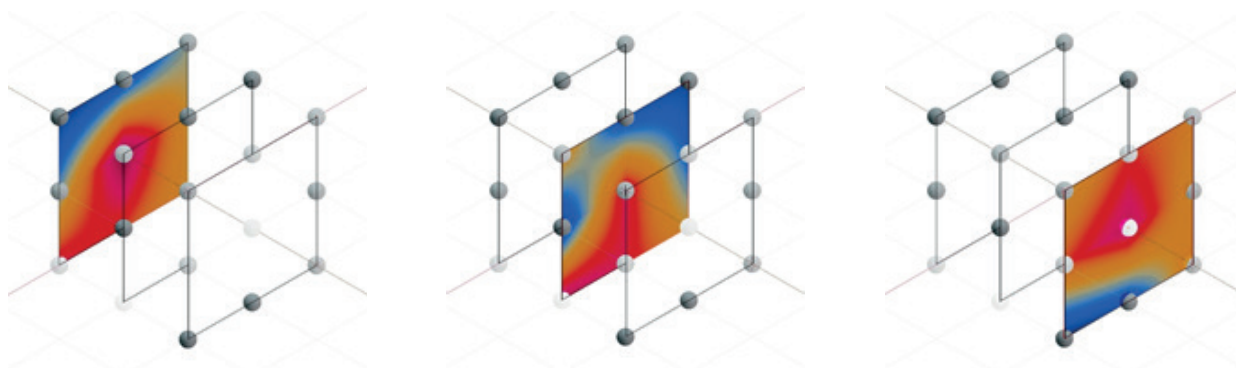


Рис. 15. Цветовая визуализация модульных измерений.

Как и в предыдущих случаях, плоскость визуализации может находиться произвольно между узлами расчетной сетки, что не влияет на корректное отображение цвета маркера в соответствии с выбранной шкалой. Более детализированная картина распределения модулей измеренных значений показана на рис. 16, что достигнуто путем уменьшения шага расчетной сетки.

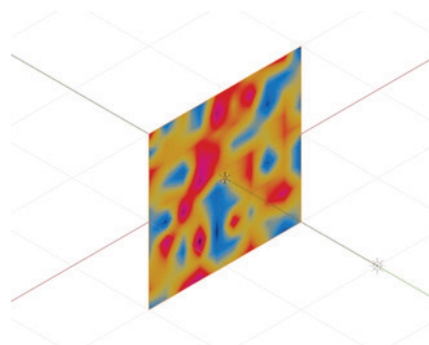


Рис. 16. Детализированная визуализация модульных измерений.

К предложенному методу цветовой визуализации также применимы все описанные выше алгоритмы анимации во времени, объемного представления либо интерполяции при произвольном положении выбранной плоскости визуализации.

2. Полученные результаты

Описание полученного продукта

Система визуализации входит в состав системы картографирования электромагнитного излучения исследуемого объекта, структурная схема которой показана на рис. 17.

В качестве позиционера выступает линейный манипулятор, который предназначен для установки измерительного датчика в точку пространства зоны наблюдения с координатами, заданными в расчетной сетке путем начального диалога с программным

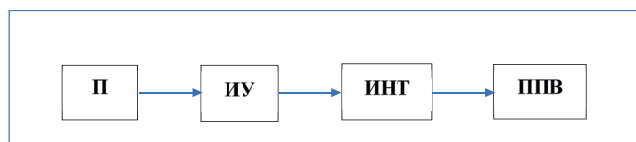


Рис. 17. Структурная схема системы картографирования полей рассеяния летательного аппарата:

П – позиционер линейный, ИУ – измерительное устройство, ИНТ – интерфейс между измерительным устройством и программным продуктом, ППВ – описанное в данной работе программное приложение «Визуализация».

продуктом визуализации. Конкретно на начальном этапе измерительный датчик можно передвигать на заданные расстояния по неким линейным направляющим элементам – рейкам, сориентированным вдоль осей заданной системы координат объекта исследования. Измерительное устройство – векторный магнитометр для измерения магнитного поля рассеяния [19] или измерительный конденсатор для измерения напряженности электрического поля [20]. Интерфейс построен на базе устройства PC1716 [21], осуществляющего мультиплицирование (многократное дублирование) измерительных каналов, аналого-цифровое преобразование и перенос информации в программную среду на языке C++.

Сравнительный анализ полученных методик визуализации

В рамках выполненной работы предложено несколько способов визуализации поля, отличающихся производительностью и информативностью.

Точечная визуализация. На рис. 18 показан пример точечной визуализации электромагнитного поля, как самой простой реализации данной методики. Она более производительна, однако менее информативна. Исследователь не видит значения, находящиеся между двумя вычисленными точками. Такую визуализацию еще сложнее понять, когда она накладывается на изображение исследуемого электронного устройства.

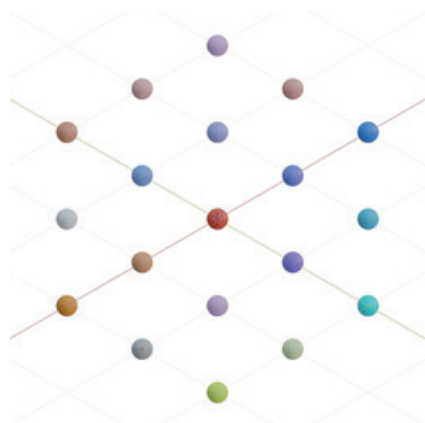


Рис. 18. Точечная визуализация.

Кубическая визуализация. Кубическая визуализация электромагнитного поля показана на рис. 19. В этом случае вместо точек используются кубы, стороны которых равны расстоянию между рассчитанными точками. Поверхность куба имеет прозрачность, зависящую от величины измеренной индукции поля. При таком подходе исследователь видит резкие переходы между двумя вычисленными значениями, а под некоторыми углами обзора могут наблюдаться артефакты. При большом разрешении (числе точек) рассчитываемого объема может заметно снизиться количество обрабатываемых кадров в секунду, что в некоторых случаях может оказаться критическим. Изменение положения кубов в пространстве приводит к некорректной визуализации. Данная методика менее производительна, чем точечная.

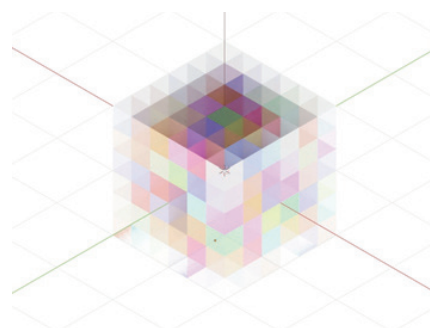


Рис. 19. Кубическая визуализация.

Сферическая визуализация. Методика, иллюстрируемая рис. 20, является продолжением кубической, однако вместо кубов предполагается использование сфер.

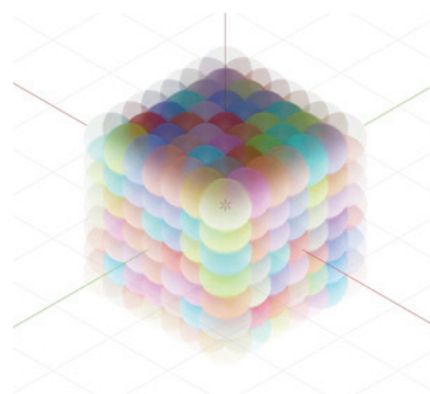


Рис. 20. Сферическая визуализация.

Размеры сфер задаются в несколько раз больше расстояния между рассчитанными точками. Это необходимо для того, чтобы сферы перекрывались друг другом. Поверхность сфер также имеет прозрачность, зависящую от напряженности поля в точке внутри сферы. Такая прозрачность позволяет цветам

сфер смешиваться, формируя более корректные значения на смежных переходах, чем в случае с кубами. Методика сферической визуализации является менее производительной, чем кубическая, но лишена некоторых его недостатков.

Плоскостная визуализация. В отличие от предыдущих способов, данная методика не связывает геометрическую форму с каждой точкой измерений. Вместо этого предлагается использовать плоскость, на поверхности которой происходит измерение напряженности электромагнитного поля, как показано на рис. 21.

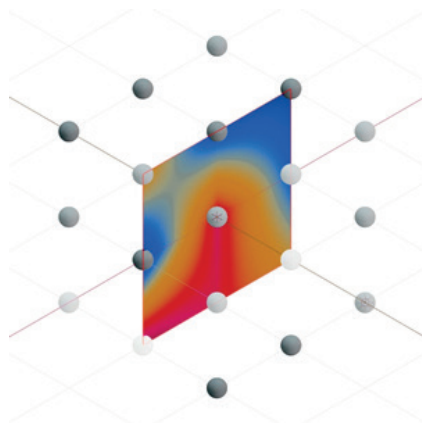


Рис. 21. Плоскостная визуализация.

Для нахождения характеристик поля между узлами сетки используется более точный способ – билинейная интерполяция. Такая методика лишена артефактов. Количество обрабатываемых в секунду кадров не зависит от разрешения рассчитываемого объема. Любая геометрическая трехмерная форма, состоящая из плоскостей, также легко может использоваться в данной методике. Помимо этого, методика поддерживает визуализацию нескольких плоскостей одновременно, что позволяет формировать визуализируемый объем, то есть объемную визуализацию.

Преимущества и перспективы применения предложенного решения

Новизна предложенного решения по сравнению с описанными выше аналогами состоит в следующем:

- предложение обеспечивает наглядность визуализации путем использования яркости и цвета маркеров;
- программный продукт предлагает пользователю выбор: визуализация на плоскости либо в 3D-пространстве;
- предложенная методика позволяет восстанавливать зависимость по минимальному числу точек, что сокращает число измерений.

Возможные применения предложенной системы картографирования могут состоять в различных подходах к анализу внешних полей, создаваемых объектом исследования авиакосмического назначения. Причем, исследуемые поля могут быть не только

электромагнитными, но и температурными, полями гравитации, расхода жидкости, скорости жидкости и другими.

Одно из перспективных применений – картографирование электромагнитного поля [22–24] в кабине пилота современного боевого самолета. На рис. 22 показана сетка картографирования кабины самолета, применяемая в зарубежных технологиях управления огнем истребителя.

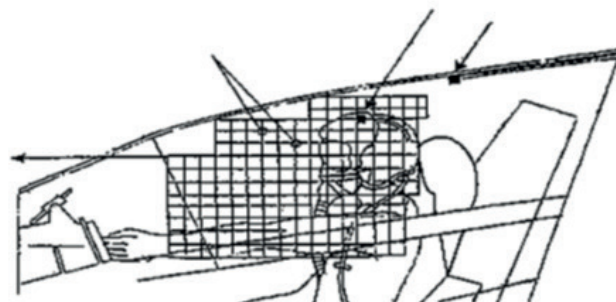


Рис. 22. Разделение рабочей зоны на дискретные ячейки.

Из рисунка видно, что кабина самолета разделена на кубические элементы со стороной в несколько сантиметров, что определяет требуемую точность позиционирования измерительного устройства и точность визуализации соответственно.

Заключение

В работе реализован алгоритм плоскостной и 3D-визуализации в пространстве и времени напряженности и/или индукции электромагнитного поля рассеяния, создаваемого ЛА в окружающем пространстве заданного объема. Получены формулы и правила для определения положения результатов измерений и их порядка представления в общем массиве.

Предложена формула определения индексов смещений координат точки измерения в пределах заданного элемента расчетной сетки. Рассмотрены варианты визуализации, реализован алгоритм билинейной интерполяции на примере вычисления вектора напряженности электрического поля рассеяния объекта исследования.

Для достижения необходимой наглядности объемной визуализации предложено сопоставление цветовой карты со значениями величин модулей или компонент векторов измеряемых векторов электромагнитного поля.

В рамках выполненной работы решены следующие конкретные задачи:

- реализована анимация результатов измерений во времени с задаваемым периодом обновления данных;
- выполнена интерполяция результатов измерений, которая позволяет по минимальному числу то-

чек наблюдения восстанавливать характер линейного или пространственного распределения поля в зоне наблюдения по заданным направлениям;

- предложен метод объемного отображения измеряемой информации;

- реализован алгоритм начального задания количества и положения точек в объеме зоны наблюдения, в которых необходимо получить информацию о полях рассеяния либо прямым считыванием из массива измеренной информации, либо интерполяцией;

- предложена цветовая карта – шкала измеряемых величин.

Перспективы применения полученного решения, на взгляд авторов, состоят в следующем:

- верификация математических моделей внешних электромагнитных 3D-полей, создаваемых подсистемами ЛА, путем сравнения результатов моделирования с измерениями при минимальном объеме измерений;

- стендовые испытания авиационной и космической техники;

- использование системы картографирования полей рассеяния силовых систем в ходе выполнения НИОКР по развитию авиационно-космической техники и технологий.

Авторы будут развивать полученные результаты в направлении дальнейшей автоматизации процес-

сов измерения, расширения начального диалога с программным продуктом и создания постоянно действующего прототипа системы для его демонстрации и совершенствования. В следующей работе авторы планируют описать результаты математического и физического моделирования предложенной технологии, для чего ведется выбор объекта и подготовка оборудования.

Финансовая поддержка

Научно-исследовательская работа, результаты которой изложены в статье, выполнена за счет средств Централизованного фонда по теме «Система расчета электромагнитной совместимости бортовой кабельной сети на техническом объекте» на основании протокола заседания экспертной комиссии конкурса по подведению итогов Всероссийского конкурса «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий» от 29 мая 2020 г., шифр: НИЧ ИЦМР 19/2020.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. https://portal.tpu.ru/SHARED/u/ULTRATONE/uchebnaya_rabota/Tab/Lecture.pdf
2. Тимиргазин Р.Ф. Электромагнитная совместимость: учебное пособие. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет; 2017. 48 с. URL: <http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2017/102.pdf>
3. Biuk-Aghai R.P., Pang P.C-I., Pang B. Map-like visualisations vs. treemaps: an experimental comparison. In: VINCI '17: Proceedings of the 10th International Symposium on Visual Information Communication and Interaction. 2017. P. 113–120. <https://doi.org/10.1145/3105971.3105976>
4. https://studme.org/179273/matematika_himiya_fizik/elementy_metoda_setok_primery_raznostnyh_shem
5. <https://wiki.org/Визуализация>
6. <https://skomplekt.com/harakteristiki-ostcillograf/>
7. Шнирман Г.Н. Аппаратурные наблюдения. Избранные труды. М.: Изд-во ОИФЗ РАН; 2003. 304 с. ISBN 5-201-11982-4.
8. <https://rusautomation.ru/bumazhnie-registratori-samopisci>
9. 7 сервисов для визуализации данных: не привлекая дизайнеров и программистов. URL: <https://netology.ru/blog/7-services-data-visualization>
10. 20 лучших инструментов для визуализации данных. URL: <https://freelance.today/poleznoe/20-luchshih-instrumentov-dlya-vizualizacii-dannyh.html>

References

1. https://portal.tpu.ru/SHARED/u/ULTRATONE/uchebnaya_rabota/Tab/Lecture.pdf
2. Timirgazin R.F. *Elektromagnitnaya sovmestimost': uchebnoe posobie* (Electromagnetic compatibility). Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University Publishing House; 2017. 48 p. (in Russ.). URL: <http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2017/102.pdf>
3. Biuk-Aghai R.P., Pang P.C-I., Pang B. Map-like visualisations vs. treemaps: an experimental comparison. In: VINCI'17: Proceedings of the 10th International Symposium on Visual Information Communication and Interaction. 2017. P. 113–120. <https://doi.org/10.1145/3105971.3105976>
4. https://studme.org/179273/matematika_himiya_fizik/elementy_metoda_setok_primery_raznostnyh_shem
5. <https://wiki.org/Visualization>
6. <https://skomplekt.com/harakteristiki-ostcillograf/>
7. Shnirman G.N. *Apparaturnye nablyudeniya. Izbrannyye Trudy* (Hardware observations. Selected Works). Moscow: Joint Institute of Earth Physics RAS Publishing House; 2003. 304 p. (in Russ.).
8. <https://rusautomation.ru/bumazhnie-registratori-samopisci>
9. 7 servisov dlya vizualizatsii dannykh: ne privlekaya dizainerov i programmistov (7 services for data visualization: without involving designers and programmers) URL: <https://netology.ru/blog/7-services-data-visualization>

11. Системы визуализации данных.
URL: <https://soware.ru/categories/data-visualization-systems>
12. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс физики: в 3-х т. Т. 2. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа; 1977. 375 с. ISBN 981-023917-3.
13. Калантаров П.Л., Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. М.: Госэнергоиздат; 1951. 464 с.
14. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики: в 3-х т. Т. 2. Электрические и электромагнитные явления. М.: Лань; 2009. 528 с. ISBN 978-5-8114-0664-7.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике: для научных работников и инженеров. М.: Наука; 1973. 832 с.
16. Трехмерная графика с нуля. Часть 2: растрезация.
URL: <https://habr.com/ru/post/342708/>
17. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука; 1989. 429 с. ISBN 5-02-013996-3.
18. Гусев Н.А., Ветошко П.М., Кузьмичев А.Н., Чепрунова Д.А., Самойлова Е.В., Звездин А.К., Коротаева А.А. Сверхчувствительный векторный магнитометр для картографических измерений в кардиографии. *Медицинская техника*. 2017;3(303):5–8.
19. Шелагин А.В. Измерение электрических и магнитных полей: Лаб. практикум. М.: МИФИ.
URL: https://mipt.ru/education/chair/physics/S_III/lab_el/Shelagin.pdf
20. https://www.advantech.ru/products/1-2mlkc9/pci-1716/mod_86ec4c4d-f497-45c5-81da-b8600c0eb36f
21. Raab F.H. Remote object position locator: pat. 4054881 US. Appl. № US05/680,471; Prior. 26.04.1976. Publ. 18.10.1977.
22. Raab F.H. Remote object position and orientation locator: pat. 4314251 US. Appl. № US06/062,140; Prior. 30.07.1979. Publ. 02.02.1982.
23. Egli W.H. et al. Helmetmounted sighting system: pat. 4287809 US. 1981.
24. Zimmer P., Cordonnier A. Method and apparatus for determining an orientation associated with a mobile system, especially a line of sight inside a helmet visor. pat. 5457641 US. Appl. № US08/311,435. Prior. 29.06.1990. Publ. 10.10.1995.
10. 20 *luchshikh instrumentov dlya vizualizatsii dannykh* (20 best tools for data visualization.).
URL: <https://freelance.today/poleznoe/20-luchshih-instrumentov-dlya-vizualizatsii-dannyh.html>,
11. *Sistemy vizualizatsii dannykh* (Data visualization systems).
URL: <https://soware.ru/categories/data-visualization-systems>
12. Detlaf A.A., Yavorskii B.M., Milkovskaya L.B. *Kurs fiziki: v 3 t. T. 2. Elektrichestvo i magnetizm* (Physics course: in 3 v. V. 2. Electricity and magnetism). Moscow: Vysshaya shkola; 1977. 375 p. (in Russ.). ISBN 981-023917-3.
13. Kalantarov P.L., Neiman L.R. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* (Theoretical foundations of electrical engineering). Moscow: Gosenergoizdat; 1951. 464 p. (in Russ.).
14. Frish S.E., Timoreva A.V. *Kurs obshchei fiziki: v 3 t. T. 2. Elektricheskoe i elektromagnitnye yavleniya* (General physics course: in 3 v. V. 2. Electrical and electromagnetic phenomena). Moscow: Lan'; 2009. 528 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8114-0664-7.
15. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike: dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Mathematical handbook: for scientists and engineers). Moscow: Nauka; 1973. 832 p. (in Russ.).
16. Trekhmernaya grafika s nulya. Chast' 2: rasterizatsiya (3D graphics from scratch. Part 2: rasterization).
URL: <https://habr.com/ru/post/342708/>
17. Samarskii A.A., Gulin A.V. *Chislennyye metody* (Numerical methods). Moscow: Nauka; 1989. 429 p. (in Russ.). ISBN 5-02-013996-3.
18. Gusev N.A., Vetoshko P.M., Kuz'michev A.N., Cheprunova D.A., Samoilova E.V., Zvezdin A.K., Korotaeva A.A. Ultra-sensitive vector magnetometer for magnetocardiographic. *Biomedical Engineering*. 2017;51(3):157–161.
<https://doi.org/10.1007/s10527-017-9705-8>
19. Shelagin A.V. *Izmerenie elektricheskikh i magnitnykh poлей: Laboratornyi praktikum* (Measurement of electric and magnetic fields). Moscow: MIFI. (in Russ.).
URL: https://mipt.ru/education/chair/physics/S_III/lab_el/Shelagin.pdf
20. https://www.advantech.ru/products/1-2mlkc9/pci-1716/mod_86ec4c4d-f497-45c5-81da-b8600c0eb36f
21. Raab F.H. Remote object position locator: pat. 4054881 US. Appl. № US05/680,471; Prior. 26.04.1976. Publ. 18.10.1977.
22. Raab F.H. Remote object position and orientation locator: pat. 4314251 US. Appl. № US06/062,140; Prior. 30.07.1979. Publ. 02.02.1982.
23. Egli W.H. et al. Helmet-mounted sighting system: pat. 4287809 US. 1981.
24. Zimmer P., Cordonnier A. Method and apparatus for determining an orientation associated with a mobile system, especially a line of sight inside a helmet visor. pat. 5457641 US. Appl. № US08/311,435. Prior. 29.06.1990. Publ. 10.10.1995.

Об авторах:

Курбанисмаилов Заур Магомедович, преподаватель кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <http://orcid.org/0000-0002-5388-049X>

Тарланов Арслан Тарланович, преподаватель кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lev.brave@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-7508-9682>

Матяш Екатерина Дмитриевна, преподаватель кафедры «Информатика» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <http://orcid.org/0000-0002-4305-8742>

Карбова Елена Сергеевна, ассистент кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <https://orcid.org/0000-0003-2933-9641>

About the authors:

Kurbanismailov Zaur Magomedovich, Lecturer, Department of Intelligent Information Security Systems of the Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0002-5388-049X>

Tarlanov Arslan Tarlanovich, Lecturer, Department of Intelligent Information Security Systems of the Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: lev.brave@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-7508-9682>

Matyash Ekaterina Dmitrievna, Lecturer, Department of Computer science of the Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0002-4305-8742>

Karbova Elena Sergeevna, Assistant, Department of Intelligent Information Security Systems of the Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <https://orcid.org/0000-0003-2933-9641>

Поступила: 23.10.2020; получена после рецензирования: 23.11.2020; принята к опубликованию: 30.11.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-73-78>



УДК 615.471

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Фантом для контроля процесса термоабляции

В.Н. Макаров[@],
Д.В. Шмелева,
Н.А. Боос

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: makarov_vn@bk.ru

Медицинское оборудование в силу своей специфики требует точной наладки и проверки. Поэтому перед непосредственным воздействием на организм человека оборудование испытывается на специализированных макетах ткани человека – фантомах. Физико-химические характеристики фантомов должны быть близки к характеристикам выбранной биологической ткани. В зависимости от поставленной задачи структура самого фантома и его свойства будут различны. Целью работы являлось создание фантома, наглядно демонстрирующего распределение теплового поля в объеме при нагреве с сохранением картины нагрева на протяжении нескольких часов. Исследования проводились на экспериментальном стенде, который состоит из установки для радиочастотной абляции тканей «МЕТАТОМ-3» с набором электродов, тепловизора, а также штатива для их фиксации. Для сравнения имитаторов биологической ткани использовались печень свиньи и картофель. Лучшие результаты были получены при воздействии на картофель. В месте нагрева происходило объемное изменение структуры растительной ткани, позволяющее оценивать эффекты термического воздействия. Размеры теплового поля были аналогичны полям, полученным на животной ткани. Получаемые картины теплового поля достоверны и сохраняются на протяжении нескольких часов. Эксперименты показали эффективность и статистическую достоверность такого фантома. Проведенные исследования различных одноэлектродных и многоэлектродных систем позволяют рекомендовать данный фантом для внедрения в процесс разработки радиочастотных и микроволновых систем абляции.

Ключевые слова: фантом, имитатор ткани, тепловое поле, медицинское оборудование, абляция, нагрев биоткани

Для цитирования: Макаров В.Н., Шмелева Д.В., Боос Н.А. Фантом для контроля процесса термоабляции. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):73–78. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-73-78>

RESEARCH ARTICLE

Phantom to control the thermal ablation process

Valeriy N. Makarov@,
Dina V. Shmeliova,
Nikita A. Boos

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

Medical equipment, due to its specificity, requires precise adjustment and testing. Therefore, before direct exposure to a human organism, the equipment is tested on specialized mock-ups of human tissue – phantoms. The physicochemical characteristics of phantoms should be close to the characteristics of the selected biological tissue. Depending on the task at hand, the design of the phantom itself and its properties will be different. The aim of this work is to create a phantom that clearly demonstrates the distribution of the thermal field in the volume during heating while maintaining the heating pattern for several hours. The studies were carried out on an experimental stand, which contained a device for radio frequency ablation of tissues “METATOM-3” with a set of electrodes, a thermal imager, and a tripod for fixing the electrodes. Animal tissue (pig liver) and plant tissue (potatoes) were used as biological tissue simulators. The most suitable imitator turned out to be potatoes, because the electrophysical parameters of potatoes are close to those of the human parenchymal organs. Thermal exposure of potatoes at 58–62°C leads to changes in the starch characteristics: the appearance of a fine-crystalline structure filled with water from the surrounding space is observed. As a result, volumetric changes in the structure of plant tissue appear at the place of heating, which makes it possible to evaluate the results of thermal exposure. To form a clearer thermogram, part of the potato is cut off. In general, potatoes have a narrow temperature range of reaction in the range of 58–62°C, which conveniently coincides with the temperature of cell death (60°C). The experiments carried out show the effectiveness of such a phantom. The obtained pictures of thermal field are reliable and persist for several hours. Experimental studies of various single-electrode and multi-electrode systems provide ground for recommending this phantom for the practice of developing radio-frequency and microwave ablation systems.

Keywords: phantom, tissue simulator, thermal field, medical equipment, ablation, heating of biological tissue

For citation: Makarov V.N., Shmeliova D.V., Boos N.A. Phantom to control the thermal ablation process. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):73–78 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-1-73-78>

Введение

Медицинское оборудование является отдельным классом приборного оборудования в силу своей специфической области применения. К нему предъявляются повышенные требования. Запрещается использование приборов без предварительных испытаний. Поэтому перед непосредственным воздействием на организм человека оборудование испытывается на специализированных макетах ткани человека – фантомах.

Физико-химические характеристики фантомов должны быть близки к характеристикам выбранной биологической ткани. В зависимости от поставлен-

ной задачи структура самого фантома и его свойства будут различны.

Методика проведения испытаний оборудования на фантомах биоткани применяется во многих областях. Каждый тип фантома соответствует специфической задаче, стоящей перед конкретным медицинским прибором. Так, например, фантомы, применяемые в ультразвуковой аппаратуре, обычно представляют собой многослойные структуры, состоящие из нескольких слоев гелеобразного материала [1]. Помимо этого, в их состав с целью имитации ослабления ультразвуковой волны могут быть добавлены мелкие стеклянные шарики, количество которых может быть изменено в зависимости от не-

обходимых требований. Также можно использовать более крупные стеклянные шарики, чтобы регулировать коэффициент обратного рассеяния ультразвука без значительного влияния на коэффициент ослабления излучаемых волн. Материал, имитирующий ткань мышцы, может иметь более мелкие стеклянные шарики и более высокую концентрацию гелеобразного материала, чем другие слои фантома. В работе [2] описан фантом ткани, состоящий из термически необратимого геля. В геле содержится два типа капель жидкости. Первый тип капель имеет средний диаметр частиц 0.5 мкм или менее, второй тип имеет средний диаметр частиц от 0.5 до 20 мкм. При ультразвуковом воздействии капли жидкости первого и второго типов переходят из жидкой фазы в газовую, что имитирует артефакты и пузырьки воздуха при реальной процедуре ультразвукового исследования (УЗИ). Примером использования высоких технологий при создании фантома биоткани может служить фантом для лазерного нагрева с использованием наночастиц в своем составе [3]. При нагреве меняются оптические свойства биоткани. Изменяя концентрацию рассеивающих частиц в фантоме, можно легко подобрать состав для любого типа биологической ткани. Преимуществом такого фантома является наглядная демонстрация процесса нагрева, создаваемого теплового поля и его температуры. К числу его недостатков можно отнести отсутствие реакции на температуру ниже пороговой, необходимой для начала изменения цвета чувствительного слоя.

Радиочастотная абляция (РЧА) и микроволновая абляция (МВА) относятся к методам термической деструкции. Принцип их действия основан на воздействии высокими температурами (60–130 °C). В связи с этим фантомы, создаваемые для испытания оборудования, должны соответствовать биологическим тканям, в первую очередь, своей реакцией на нагрев и распределение теплового поля. В широком смысле фантом для РЧА или МВА – это фантом, достоверно имитирующий последствия теплового воздействия. В качестве материала для него используются жидкие, гелеобразные [4, 5] и твердые [6] термоиндикаторные составы, которые реагируют на изменение температуры путем изменения окраски. Интерес представляет фантом для радиочастотной абляции, имеющий в своем составе жидкие кристаллы для индикации [7]. Фантом является трехслойной структурой. Первый слой состоит из прозрачного полиакриламидного геля. Второй состоит из термохромных жидких кристаллов, изменяющих цвет при термическом воздействии. Температурный диапазон реакции составляет от –30 до 120 °C. Третий слой эквивалентен по своему составу первому. Для исследования распределения теплового поля в предстательной железе при трансректальном воздействии был создан фантом, представля-

ющий собой желатиновую форму, обернутую в ткань свиного кишечника [8].

На практике в качестве фантомов для тепловой абляции чаще всего применяются части органов животных. Для увеличения достоверности ткани иногда размещаются в физрастворе. Преимуществом такой методики является крайне низкая стоимость необходимых материалов, однако важно учитывать, что конкретный образец ткани животного обладает своими специфическими свойствами. Использование таких тканей может привести к значительным изменениям результатов из-за неоднородности образцов и субъективной интерпретации результатов, т.е. может отсутствовать возможность получения статистически достоверного результата. Помимо этого, эффективность абляционной терапии с применением методов, использующих животные ткани может быть оценена только после разрезания, окрашивания и субъективного наблюдения. Все эти факторы могут усложнить тестирование новых абляционных устройств и методов.

К общим недостаткам указанных фантомов для абляции относится невозможность сохранения четкой картины нагрева в случае использования жидких фантомов и широкий температурный диапазон используемых реакций, не позволяющий четко определить минимальную границу некроза и ее положение в фантоме. В случае использования фантомов из животной ткани появляется проблема воспроизводимости полученных результатов из-за неравномерности структуры ткани.

Целью данной работы являлось создание фантома биоткани для отработки возможных конструкций многоэлектродных систем, позволяющих получить максимально возможный объем деструкции при минимальном времени нагрева.

Материалы и методы

Исследования проводились на экспериментальном стенде, в состав которого входили установка для радиочастотной абляции тканей «МЕТАТОМ-3» с набором электродов, тепловизор FLIR и штатив для их закрепления (рис. 1).

В качестве имитатора биообъектов использовались поролон, помещенный в физиологический раствор, свиная или говяжья печень и клубни картофеля.

Использование поролона в качестве имитатора позволяло исследовать в широких диапазоне значений влияние первичного импеданса на процесс нагрева. Однако для представления общей картины нагрева требовалось введение дополнительных термодатчиков по периметру нагреваемой области. Печень при ее нагреве позволяет получить объемную цветную картину теплового поля, но из-за «расплавания» поля на границе трудно установить получаемый объем коагуляции.



Рис. 1. Внешний вид испытательного стенда: а – фантом с введенной в него электродной системой; б – тепловизор, фиксирующий температуру на срезе картофеля; в – многофункциональная радиочастотная система «МЕТАТОМ-3» с ноутбуком, фиксирующим результаты измерений.

При работе с клубнями картофеля алгоритм испытаний заключался во введении активных игольчатых электродов в клубень и отслеживании распределения температуры и ее точных значений с помощью тепловизионного устройства контроля. При этом, в случае работы установки в монополярном режиме, к противоположной от активного электрода стороне прикладывался пассивный электрод, а в биполярном режиме пассивный электрод отсутствовал. Важно отметить, что испытания проводились с различными системами электродов – это могут быть как одиночные активные игольчатые электроды (в случае монополярной радиочастотной или микроволновой абляции), так и многоэлектродные системы с двумя и более электродами.

Результаты экспериментов

Наиболее подходящим имитатором биоткани оказался картофель, электрофизические параметры которого близки к параметрам паренхиматозных органов человека [9]. В месте нагрева происходило объемное изменение структуры растительной ткани, позволяющее оценивать эффекты термического воздействия (рис. 2).

Во время нагрева при температурах в интервале 58–62 °С в картофеле наблюдались изменения физико-химических характеристик крахмала [10], что приводило к появлению мелкокристаллической структуры, которая заполнялась водой из окружающего пространства. В результате в месте нагрева появляется объемное изменение структуры растительной ткани, позволяющее оценивать результаты термического воздействия.

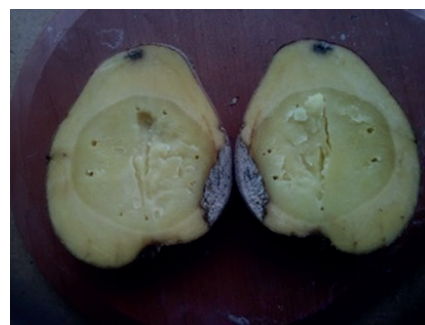


Рис. 2. Фотография среза картофеля после термического воздействия 8-ю электродами. Картина нагрева сохраняется в течение суток.

Картофель является удобным объектом для исследования тепловых полей, т.к. плотность, теплоемкость и теплопроводность его растительной ткани близки к параметрам печени человека. Сравнительные результаты нагрева печени и картофеля, полученные при одной и той же мощности, показаны на рис. 3. Как видно из рисунка, нагрев носит кольцевой характер, но картина получаемого теплового поля на картофеле более четко визуализирована. Воспроизводимость результатов нагрева на картофеле является весьма высокой в отличие от печени, где изменение места ввода электродов может привести к совершенно другой картине поля. Кроме того, на таком имитаторе легко получить послойную картину теплового нагрева, которая сохраняется длительное время. В дальнейших исследованиях предпочтение отдавалось имитаторам из картофеля в силу высокой однородности растительной массы по сравнению с печенью.

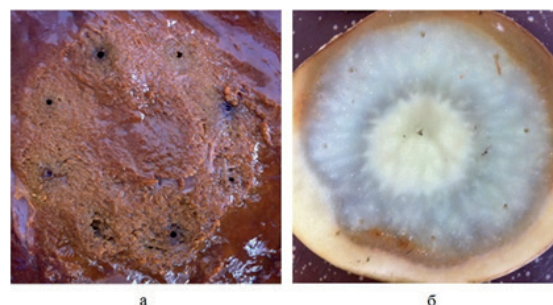


Рис. 3. Результаты сравнительных экспериментов по нагреву имитаторов однорядной системой из 8-ми электродов в биполярном режиме: а – животная ткань (печень свиньи) и б – растительная ткань (картофель).

В отличие от фантома животного происхождения (печень свиньи, рис. 3а), растительный фантом (рис. 3б) демонстрирует четкую картину границы теплового поля, позволяющую подбирать мощность и время нагрева.

Примеры использования фантома при исследовании характеристик нагрева различными системами приведены на рис. 4.

Так, при исследовании однорядных электродных систем с разным количеством электродов (4, 6, 8) на-

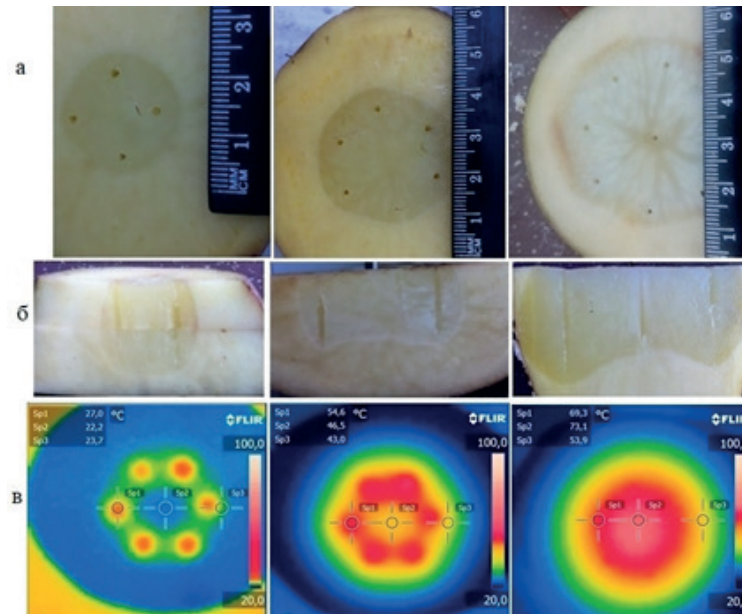


Рис. 4. Срезы картин нагрева, полученные с помощью растительного фантома:
а – горизонтальные, б – вертикальные; в – термограммы нагрева картофеля шестиэлектродной системой.

блюдалось увеличение размера теплового поля при сохранении одного и того же расстояния между электродами (рис. 4а). Одновременно с этим наблюдалось увеличение глубины нагрева (рис. 4б). Данный фантом позволяет также измерять температуру по сечению фантома. На рис. 4в показано изменение теплового поля во времени, позволяющее судить о равномерности нагрева шестиэлектродной системой.

Таким образом, фантом является эффективным средством при определении равномерности теплового нагрева, распределения теплового поля по вертикальным и горизонтальным сечениям и возможной оценки объема теплового поля и времени процедуры.

Заключение

Фантом из картофеля наглядно демонстрирует распределение теплового поля в объеме при нагреве, при этом картина нагрева сохраняется на протяжении нескольких часов. Он имеет низкую стоимость и прост в использовании. Совпадение свойств картофеля со свойствами паренхиматоз-

ных органов человека делают такой имитатор перспективной альтернативой для испытания оборудования локальной термодеструкции. Фантом был многократно испытан в экспериментах по подбору размеров активной части игольчатых электродов и возможных диаметров их введения в ткани. Использование картофеля в качестве фантома в дальнейшем позволит разрабатывать эффективные системы термического нагрева и осуществлять подбор параметров нагрева.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке РТУ МИРЭА – грант «Университетский», тема «НИЧ-Абляция».

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the research work.

The authors declare no conflicts of interest

Глоссарий / Glossarium

Фантом – имитатор биологической ткани / Phantom – biological tissue simulator.

Абляция – процесс нагрева биологической ткани до температуры гибели клетки (60 градусов) / Ablation – process of heating of biological tissue to a cell death temperature (60 degrees).

Радиочастотная абляция – тип абляции, при котором для нагрева биологических тканей используется высокочастотный ток / Radiofrequency ablation – type of ablation where high frequency current is used to heat biological tissue

Литература

1. Madsen E.L., D'Souza W.D., Frank G.R. Multi-imaging modality tissue mimicking materials for imaging phantoms: pat. 6635486-B2 US. Publ. 21.10.2003.

References

1. Madsen E.L., D'Souza W.D., Frank G.R. Multi-imaging modality tissue mimicking materials for imaging phantoms: pat. 6635486-B2 US. Publ. 21.10.2003.

2. Kawabata K.I. Phantom: pat. 8011826-B2 US. Publ. 06.09.2011.
3. Мохаммед А.Х.М., Усталков С.О., Сагайдачная Е.А., Кочубей В.И., Скапцов А.А. Создание и свойства фантомов биологической ткани, содержащих наночастицы. *Инженерный вестник Дона*. 2019;2(53). URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2019/5750>
4. Хитров Ю.А., Корепанова Е.А., Макаров В.Н. Термоиндикаторный состав: а.с. 1326910 СССР. Заявка № 3976413; заявл. 19.11.1985; опублик. 30.07.1987. Бюл. № 28.
5. Долгушин Б.И., Косырев В.Ю. Радиочастотная термоабляция опухолей, под ред. М.И. Давыдова. М.: Практическая медицина; 2015. 192 с. ISBN 978-5-98811-328-7.
6. Казакова С.М., Береславский С.И., Бажева Т.П., Задачная В.Г. Высокостабильное термоиндикаторное покрытие на температуру 100 ± 2 °C: а.с. 245403 СССР. Заявка № 1219554/18-10; заявл. 19.02.1968; опублик. 04.06.1969. Бюл. № 19.
7. Strunk A.R., Novichenok A. Thermochromic polyacrylamide tissue phantom and its use for evaluation of ablation therapies: pat. 20150168227 US. Publ. 17.07.2018.
8. Педонова З.Н., Белавская С.В., Лисицына Л.И., Потеряева Е.Л., Феофилов И.В. Исследование распределения физических полей в предстательной железе при трансректальном воздействии на примере фантома. *Биотехносфера*. 2016;5 (47):19–22.
9. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ электротермии. Саратов: Научная книга; 2011. 560 с. ISBN 978-5-9758-1360-2.
10. Церетели Г.И., Белопольская Т.В., Грунина Н.А., Вакуленко О.А. Реорганизация вторичных кристаллических структур крахмала при хранении и отжиге. *Вестник СПбГУ. Сер. 4: Физика, Химия*. 2012;2:40–49.

2. Kawabata K.I. Phantom: pat. 8011826-B2 US. Publ. 06.09.2011.
3. Mohammed A.H.M., Ustalkov S.O., Sagaidachnaya E.A., Kochubey V.I., Skaptsov A.A. The creation and properties of the biological tissue containing nanoparticles. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering J. of Don*. 2019;2(53) (in Russ). URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2019/5750>
4. Khitrov Yu.A., Korepanova E.A., Makarov V.N. Thermoinicator composition: pat. 1326910 USSR. Publ. 07.30.1987. (in Russ).
5. Dolgushin B.I., Kosyrev V.Yu. *Radiochastotnaya termoablyatsiya opukholei, pod red. M.I. Davydova* (Radiofrequency thermoablation of tumors. (Ed.) M.I. Davydov. Moscow: Prakticheskaya meditsina; 2015. 192 p. (in Russ). ISBN 978-5-98811-328-7.
6. Kazakova S.M., Bereslavskii S.I., Bazheva T.P., Zadayannaya V.G. Highly stable thermal indicator coating for a temperature of 100 ± 2 °C: pat. 245403 USSR. Publ. 04.06.1969. (in Russ).
7. Strunk A. R., Novichenok A. Thermochromic polyacrylamide tissue phantom and its use for evaluation of ablation therapies: pat. 20150168227 US. Publ. 17.07.2018.
8. Pedonova Z.N., Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Poteryaeva E.L., Feofilov I.V. Study of distribution of physical fields in the prostate gland with transrectal effect on the example of the phantom. *Biotechnosfera*. 2016;5(47):19–22 (in Russ).
9. Arkhangel'skii Yu.S. *Spravochnaya kniga po SVCh elektrotermii* (Reference book on microwave electrothermy). Saratov: Nauchnaya kniga; 2011. 560 p. (in Russ). ISBN 978-5-9758-1360-2.
10. Tsereteli G.I., Belopolskaya T.V., Grunina N.A., Vakulenko O.A. Reorganization of starch secondary structures at storage and annealing. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Ser. 4: Fizika, Khimiya = Vestnik St.Petersburg University. Ser. 4: Physics, Chemistry*. 2012;2:40–49 (in Russ).

Об авторах:

Макаров Валерий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Биокибернетические системы и технологии» Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: makarov_vn@bk.ru. <http://orcid.org/0000-0002-7550-4735>.

Шмелева Дина Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Биокибернетические системы и технологии» Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: shmeleva@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0003-3869-8806>. Scopus Author ID 6507238678

Боос Никита Александрович, лаборант Проблемной лаборатории молекулярной акустики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: 111lkmcb@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-4659-3759>.

About the authors:

Valeriy N. Makarov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Biocybernetics Systems and Technologies, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: makarov_vn@bk.ru. <http://orcid.org/0000-0002-7550-4735>.

Dina V. Shmeliova, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of the Department of Biocybernetics Systems and Technologies, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: shmeleva@mirea.ru. <http://orcid.org/0000-0003-3869-8806>. Scopus Author ID 6507238678

Nikita A. Boos, Laboratory Assistant of the Problem Laboratory of Molecular Acoustics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: 111lkmcb@mail.ru. <http://orcid.org/0000-0002-4659-3759>.

Поступила: 10.11.2020; получена после рецензирования: 27.11.2020; принята к опубликованию: 30.11.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-79-86>

УДК 533.9.082.5

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

О моделировании самофокусировки светового пучка в плазме при облучении мишеней мощным ультрафиолетовым лазером

И.Г. Лебо[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: lebo@mirea.ru

Методами математического моделирования изучаются особенности распространения светового пучка в плазме при облучении мишеней мощным ультрафиолетовым лазерным импульсом. В Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН в экспериментах на установке «ГАРПУН» (мощный KrF-лазер, который облучал двухслойные мишени, состоящие из алюминиевой фольги и слоя оргстекла) у дна кратера обнаружены каналы, вытянутые вдоль направления падения лазерного пучка. На основании анализа экспериментальных и расчетных данных было показано, что в плазме возможно развитие самофокусировки лазерного пучка. Это приводит к возникновению горячих пятен в окрестности критической плотности плазмы и генерации быстрых электронов. Поток этих электронов формирует каналы в оргстекле. Для описания эффекта самофокусировки развита физико-математическая модель и в РТУ МИРЭА создана программа «FOCUS». Проведены расчеты на заданных газодинамических профилях (линейный и экспоненциальный), и показано, что в условиях экспериментов на установке «ГАРПУН» (протяженная плазма ~ 1 мм, умеренная интенсивность излучения 10^{11} – 10^{12} (Вт/см²) × мкм²) может развиваться тепловая самофокусировка. Сделаны оценки параметров наиболее опасных возмущений интенсивности греющего лазера.

Интерес к результатам этих экспериментов и их математическому моделированию связан с исследованиями по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС). Несмотря на то, что в таких исследованиях в основном используются твердотельные лазеры на неодимовом стекле, газовые ультрафиолетовые эксимерные лазеры имеют определенные преимущества в качестве драйверов для будущих термоядерных реакторов. Взаимодействие лазерного излучения с плазмой в случае ультрафиолетового лазера имеет свои особенности по сравнению

с физикой взаимодействия излучения лазеров на неодимовом стекле. Поэтому разработка физико-математических моделей и создание новых программ, необходимых для интерпретации современных экспериментов с помощью мощных эксимерных лазеров и планирования крупномасштабных установок, является актуальной задачей.

Ключевые слова: численное моделирование, лазерный термоядерный синтез, самофокусировка лазерного пучка в плазме

Для цитирования: Лебо И.Г. О моделировании самофокусировки светового пучка в плазме при облучении мишеней мощным ультрафиолетовым лазером. *Российский технологический журнал*. 2021;9(1):79–86. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-79-86>

RESEARCH ARTICLE

About the modeling of light beam self-focusing in plasma at the irradiation of the target by power UV laser

Ivan G. Lebo[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author, e-mail: lebo@mirea.ru

The peculiarities of light beam expansion in plasma upon irradiation of condensed targets with a powerful UV laser pulse are studied with the help of mathematical modeling. Experiments were carried out at the Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences with the use of GARPUN installation: a powerful KrF laser that irradiated two-layer targets consisting of aluminum foil and a plexiglass layer. Channels stretched along the direction of incidence of the laser beam were found at the bottom of the crater. It was shown on the basis of experimental and calculated data that self-focusing of the laser beam developed in the plasma. As a result, hot spots were produced in vicinity of the plasma critical density, and fast (superthermal) electron flows were generated. The electron flows could produce the channels in the plexiglas. In order to describe the self-focusing effect a physical-mathematical model was developed, and “FOCUS” program was created at the Russian Technological University (MIREA). Numerical simulations were carried out on the gas-dynamic profiles (linear and exponential). It was shown that thermal self-focusing could develop at the conditions of “GARPUN” experiments (~ 1 mm longitudinal plasma, moderate radiation intensity: 10^{11} – 10^{12} (W/cm²) $\times \mu\text{m}^2$). The parameters of dangerous modes of laser beam perturbations were estimated.

The interest in the experimental and mathematical modelling results is related to the laser thermonuclear fusion (LTF) research. Although Nd glass lasers are the basic installations for LTF research, UV gas eximer lasers have some advantages as drivers for future thermonuclear fusion reactors. The interaction of UV laser radiation with plasma has some peculiarities. Thus, developing physical-mathematical models and creating new programs required for the interpretation of modern UV laser – plasma coupling experiments and for the design of large scale facilities based on eximer drivers is a topical problem.

Keywords: numerical modelling, laser thermonuclear fusion, self-focusing of laser beam in plasma

For citation: Lebo I.G. About the modeling of light beam self-focusing in plasma at the irradiation of the target by power UV laser. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(1):79–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-1-79-86>

Введение

Более полувека ведутся исследования по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС). Первая научная публикация в открытой печати по этому вопросу датируется 1964 годом [1]. Для исследований по ЛТС и ряда военно-прикладных задач в США построена крупнейшая лазерная установка NIF с энергией около 2 МДж в импульсе [2]. Аналогичные установки строятся в нашей стране [3], во Франции [4] и Китае [5]. Все эти установки являются твердо-телесными лазерами на неодимовом стекле (Nd-лазер). Для улучшения условий взаимодействия мощного электромагнитного импульса с плазмой, лазерное излучение, как правило, конвертируется во вторую и третью гармоники. На установке NIF был достигнут физический порог термоядерных реакций («break-even») [6], когда выделившаяся в результате термоядерных реакций энергия превзошла тепловую энергию в горючем ($Q = E_f/E_t > 1$, E_f – энергия, которая содержится в частицах и электромагнитном излучении, образовавшихся в результате реакций синтеза ядер дейтерия и трития; $E_t = C_{vm}T$, где C_v – удельная теплоемкость, m , T – масса и температура горючего). В экспериментах на установке NIF зарегистрирован выход нейтронов $\approx 2 \times 10^{16}$ нейтронов за выстрел. Поскольку в каждой реакции синтеза ядер дейтерия и трития рождается один нейтрон и выделяется энергия 17.6 МэВ (2.816×10^{-12} Дж), то легко подсчитать, что выделившаяся термоядерная энергия составляла приблизительно 5.6×10^4 Дж. Эта величина равнялась всего нескольким процентам от энергии лазерного импульса (энергии драйвера). Дело в том, что в процессе нагрева и сжатия термоядерной мишени лишь малая доля (5–10%) от поглощенной лазерной энергии передается в DT-горючее. Подробнее о физике ЛТС можно прочесть в [7, 8]. Таким образом, на установке NIF была преодолена лишь «первая ступень» к достижению управляемого термоядерного синтеза. Следующий шаг – $G > 1$, где $G = E_f/E_L$, E_L – энергия лазерного драйвера (G – англ. Gain).

Заметим, что на установке NIF планировалось выйти на уровень G порядка 1, что и определило наименование установки NIF – Nation Ignition Facility. Эти планы опирались на результаты сложных численных расчетов, которые не могли в полной мере учесть влияние плазменных и гидродинамических неустойчивостей [7, 8].

В 2019 году один из «патриархов» ЛТС профессор Стефан Боднер опубликовал статью [9], в которой раскритиковал выбранную в США стратегию ЛТС, опирающуюся на использование твердотельных неодимовых драйверов. По его мнению, предпочтительными для этих целей могли бы быть эксимерные газовые лазеры. Преимущества этих типов лазеров (речь идет о KrF- и ArF-ла-

зерах) заключаются в следующем: 1) излучение генерируется непосредственно в ультрафиолетовом диапазоне ($\lambda = 0.25$ и 0.19 мкм, соответственно), в то время как у Nd-лазера $\lambda = 1.06$ мкм и требуются дополнительные дорогостоящие устройства для конвертации излучения в более высокие гармоники; 2) широкая полоса частоты генерации ($\Delta\nu = 3$ и 5 ТГц), в то время как у Nd-лазера она на порядок меньше; 3) возможность работы драйвера с частотой повторения от 1 до 10 Гц. Естественно, у эксимерных драйверов имеются и свои недостатки. По мнению автора [9], преимущества 1 и 2 позволят решить (или смягчить) проблему неоднородного нагрева и неустойчивого сжатия термоядерных мишеней и достигнуть значительно больших величин G при фиксированной энергии драйвера.

В Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН на установке «ГАРПУН» (KrF-лазер с энергией и длительностью импульса ~ 100 Дж и 100 нс) были выполнены интересные эксперименты по облучению двухслойных плоских мишеней (Al-фольга толщиной 100 – 200 мкм и слой оргстекла толщиной около 0.5 см) ультрафиолетовым излучением. Лазерное излучение падало со стороны алюминия. Интенсивность излучения на поверхности мишени составляла $\sim 5 \times 10^{12}$ Вт/см² [10].

В оргстекле формировался глубокий кратер протяженностью ~ 1 мм, а у его дна – один или несколько более узких каналов глубиной несколько сотен мкм. При этом фронт интенсивности падающего излучения, измеренный в дальней зоне, имел гладкую «гауссовую» форму. Двумерные численные расчеты уравнений плазменной динамики, представленные в статье, моделировали испарение вещества и формирование кратера.

Первопричиной формирования узких каналов в оргстекле, как мы полагаем, явилось развитие самофокусировки лазерного пучка в плазме [11–13]. Большинство работ по самофокусировке лазерных пучков в плазме посвящено исследованию стрикционного (или пондеромоторного) механизма, когда пондеромоторная сила, связанная с поперечным градиентом интенсивности лазерного пучка, приводит к изменению диэлектрической проницаемости плазмы, что, в свою очередь, инспирирует увеличение интенсивности излучения в этой области. Такое явление наблюдается в современных экспериментах при интенсивностях излучения более 10^{15} Вт/см² и длинах волн лазера ~ 1 мкм. Как правило, длительность лазерного импульса в этих экспериментах составляла 1 – 10 нс, а размер плазменной короны ~ 200 – 300 мкм. В наших экспериментах [10] длительность импульса 100 нс и короткая длина волны $\lambda = 0.25$ мкм. Лазерное излучение «продавливает» глубокий узкий кратер, который заполняется горячей плазмой [14].

Через эту протяженную плазму распространяется мощный лазерный импульс. Следует отметить, что в случае мишеней реакторного масштаба также будет формироваться протяженная плазма, поскольку размеры этой мишени и энергия лазерного драйвера будут на несколько порядков величины больше, чем в большинстве современных экспериментов. Поэтому рассмотренная в [10] задача моделирует, в некоторой степени, ситуацию, которая может реализоваться в мишенях для термоядерного реактора.

Наряду со стрикционным, возможно проявление теплового механизма самофокусировки. Тепловой механизм самофокусировки, как правило, приводит к более медленному росту возмущений и при значительно меньших длинах волн лазера. В [15] приведены оценки порогов развития самофокусировочной неустойчивости в однородной плазме для случаев стрикционного и теплового механизмов.

Так пороговое значение интенсивности для стрикционного механизма

$$I_{\text{str}} [10^{14} \text{ W / cm}^2] \geq 20 \frac{n_{\text{cr}}}{n_e} \frac{T_e [\text{keV}]}{L [\mu\text{m}] \cdot \lambda [\mu\text{m}]}, \quad (1)$$

а для теплового:

$$I_{\text{th}} [10^{14} \text{ W / cm}^2] \geq 2 \cdot 10^5 \left(\frac{n_{\text{cr}}}{n_e} \right)^3 \frac{T_e [\text{keV}]^5 \cdot \lambda [\mu\text{m}]^2}{Z^2 \cdot L [\mu\text{m}]^2}. \quad (2)$$

Здесь n_e – концентрация электронов в плазме, n_{cr} – критическая концентрация электронов для заданной длины волны лазера λ (при которой из-за резонанса с собственными колебаниями в плазме происходит полное отражение излучения), T_e – температура плазмы, Z – заряд ионов, L – длина плазменного канала. Для условий обсуждаемых экспериментов, типичные параметры плазмы $Z = 6$, $L = 1000$ мкм, $T_e = 0.1$ кэВ, и $\lambda = 0.25$ мкм, откуда $I_{\text{str}} \geq 3 \times 10^{12}$ Вт/см² и $I_{\text{th}} \geq 2 \times 10^{10}$ Вт/см² [10].

Для более аккуратного учета упомянутых выше эффектов в неоднородной плазме требуется использование методов математического моделирования и разработка новых программ для проведения численных расчетов.

Постановка задачи

Уравнение, описывающее распространение электромагнитного излучения в квазинейтральной плазме, имеет вид [16]:

$$\nabla \vec{E} + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \varepsilon \vec{E} = 0. \quad (3)$$

Здесь $\vec{E}$, ω – напряженность электрического поля и циклическая частота падающей волны; c – скорость света; $\varepsilon = 1 - (\omega_p / \omega)^2 = 1 - (n_e / n_{\text{cr}})$ – диэлектрическая проницаемость; $\omega_p = (4\pi n_e e^2 / m_e)^{0.5}$ – плазменная частота; e , m_e – заряд и масса электрона; n_{cr} – критическая плотность, при которой лазерная частота сравнивается с плазменной. Диэлектрическая проницаемость в плазме является функцией плотности электронов. В сильном электромагнитном поле плотность электронов будет зависеть от параметров плазмы, интенсивности и длины волны излучения. Для ее нахождения, требуется решать сложные неоднородные кинетические уравнения. В первом приближении можно воспользоваться моделью, предложенной в [12, 13]. В поперечном к падающему излучению направлению используется соотношение баланса сил, что позволяет вычислять возмущение плотности плазмы, связанное с воздействием на нее мощного лазера. В основе самофокусировки лежит эффект «выдавливания» плазмы за счет пондеромоторной силы либо возмущения теплового давления, вызванного дополнительным поглощением и нагревом вещества в области повышенной интенсивности. Изменение плотности и диэлектрической проницаемости приводит к фокусировке излучения, что, в свою очередь, может стимулировать увеличение пондеромоторной силы либо возмущения теплового давления. Возникает нелинейное взаимодействие излучения с плазмой, обусловленное стрикционным и тепловым механизмами.

Исследование самофокусировки цилиндрических пучков проводится с помощью следующего приближения: в поперечном направлении пучок сохраняет «гауссову» форму распределения, но с переменным эффективным радиусом $a(z)$:

$$E^2(r, z) = E_0^2 \cdot \exp \left(-\frac{r^2}{a^2(z)} \right). \quad (4)$$

Используя приближение геометрической оптики [17] и параксиальное приближение, если диэлектрическую проницаемость можно представить в виде:

$$\varepsilon(z, r) = \varepsilon_0(z) + \beta(z) \cdot r^2, \quad \beta = \frac{\partial \varepsilon}{\partial (r^2)} \Big|_{r=0}, \quad (5)$$

то можно получить уравнение для описания безразмерного радиуса пучка $f = \frac{a(z)}{a_0}$ (подробнее можно увидеть в [12, 13, 18, 19]):

$$\varepsilon_0 \frac{df}{dz^2} + \frac{1}{2} \frac{d\varepsilon_0}{dz} \frac{df}{dz} = \frac{c^2}{\omega^2 a_0^4 f^3} - \beta(z) f. \quad (6)$$

На границе «плазма-вакуум» полагаем, что пучок распространяется параллельно оси OZ, тогда краевые условия задачи: $f = 1$, $\frac{df}{dz} = 0$.

Первый член справа в уравнении (6) описывает дифракцию пучка, второй – самофокусировку.

В случае стрикционного механизма

$$\beta(z) = \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 \frac{\alpha I_0}{f^2 a_0^2} e^{-\alpha I_0}, \quad \alpha = \frac{e^2}{8m_e \cdot \omega^2 T_e}, \quad I_0 = E_0^2 \sqrt{\frac{\epsilon_0(0)}{\epsilon_0(z)}}.$$

В случае теплового механизма

$$\beta(z) = \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 \frac{\sigma E_0^2}{8\chi_0 T_e^{3.5}} \sqrt{\frac{\epsilon_0(0)}{\epsilon_0(z)}} \cdot \frac{1}{f^2} = \frac{9}{16} \frac{\nu_{ei}^2}{\omega^2 T_e^2} \cdot I_0,$$

где σ – высокочастотная электропроводность, ν_{ei} – эффективная частота электроннонных столкновений.

В представленной модели предполагается, что самофокусировка приводит к малым изменениям плотности плазмы и не оказывает влияния на общую динамику разлета вещества. В противном случае требуется решать неоднородные уравнения плазменной динамики совместно с уравнениями электродинамики. Такой программы у нас пока нет.

Результаты численных расчетов

Для моделирования поведения пучка в плазме требуется задать газодинамические распределения («профили» плотности и температуры), то есть $\rho(z, t)$ ($\rho = n_e m_i / Z$, m_i – масса иона) и $T_e(z, t)$. Для этого, вообще говоря, необходимо решать систему уравнений плазмодинамики. В первом приближении рассмотрим задачу на стационарных профилях $\rho(z)$ и $T_e(z)$.

Задача 1. В первой серии расчетов предполагалось, что продольное распределение плотности плазмы можно описать в виде линейного профиля $\rho(z) = \rho_{cr} \cdot (0.1 + Bz)$. Параметры лазерного излучения и плазмы взяты из [10]: $I = 5 \times 10^{12}$ В/см², $\rho_{cr} = 0.1354$ г/см³, $T_e(z) = 0.1$ кэВ, заряд ионов $Z = 6$, протяженность плазмы $0 \leq z \leq 0.1$ см. Отсюда $B = 8.5$ см⁻¹ (расчеты ведутся до окрестности критической плотности, если пучок не сфокусировался. В противном случае расчет заканчивался вблизи первого фокуса).

Синие кривые на рисунках будут соответствовать тепловому, а красные – пондеромоторному (стрикционному) механизму самофокусировки. На рис. 1 показаны профили безразмерных радиусов $f(z)$ для случаев начальных радиусов $a_0 = 100, 35$ и 10 мкм. Стрикционный механизм не проявляется в рассматриваемых условиях, то есть когда $f \geq 1$.

При плотности плазмы $\rho/\rho_{cr} > 0.2$ происходит самофокусировка пучка. Расчет останавливается, когда $f < 10^{-3}$.

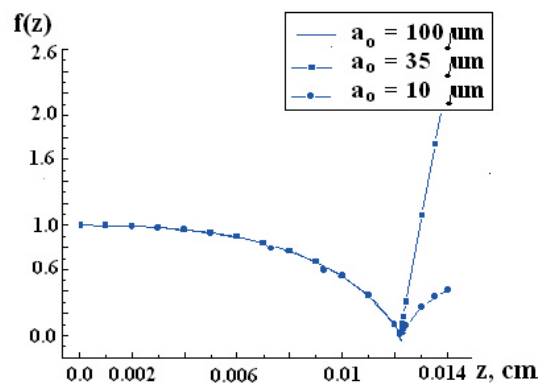


Рис. 1. Изменение безразмерного радиуса пучка на линейном профиле плотности для случая трех начальных радиусов: $a_0 = 100, 35$ и 10 мкм при тепловом механизме самофокусировки.

Интенсивность излучения I в фокусе могла бы вырасти в 10^3 – 10^4 раз. Известно [15], что при выполнении условия $I \times \lambda^2 > 10^{14}$ (Вт/см²) $\times$ мкм² плазма не успевает «максвеллизироваться», и значительная доля поглощенной плазмой энергии переносится потоком надтепловых («горячих») электронов.

Задача 2. Во второй серии расчетов был задан экспоненциальный профиль плотности: $\rho = \rho_{cr} \cdot \exp(-B(0.1 - z))$, $B = 40$ см⁻¹, $0 < z < 0.1$ см. Остальные параметры – как в задаче 1.

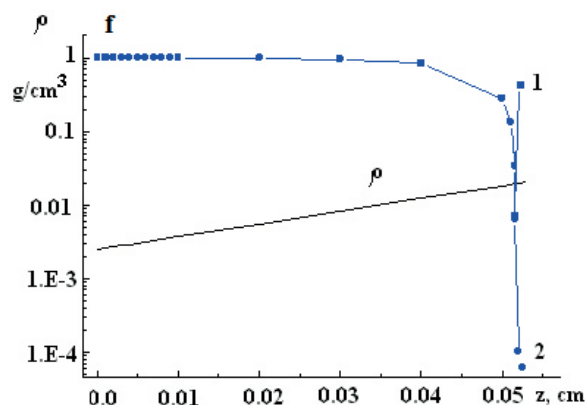


Рис. 2. Изменение безразмерного радиуса пучка $f(z)$ на экспоненциальном профиле плотности (ρ) для случая двух начальных радиусов: $a_0 = 35$ (1) и 100 мкм (2). Черная кривая – профиль плотности, г/см³.

В этом случае самофокусировка пучка происходит при плотности плазмы $\rho/\rho_{cr} \geq 0.3$ за счет теплового механизма. Как и в первой задаче, стрикционный механизм не проявляется ($f \geq 1$). Радиусы пучка в расчетах равнялись 35 и 100 мкм. Пучок с начальным радиусом 100 мкм уменьшился до размеров $f < 10^{-3}$. Расчет был прекращен. Пучок с начальным радиусом 35 мкм после того, как достиг минимального значения $f = 2 \times 10^{-3}$, стал увеличиваться в сечении.

Задача 3. В предыдущих задачах стрикционный механизм самофокусировки не проявлялся.

В этой серии расчетов принято: $\rho_{cr} = 0.0677 \text{ г/см}^3$, $T_e(z) = 1 \text{ кэВ}$, заряд ионов $Z = 12$, протяженность плазмы $0 \leq z \leq 0.1 \text{ см}$, $a_0 = 10 \text{ мкм}$, а интенсивность излучения на четыре порядка больше ($I = 5 \times 10^{16} \text{ Вт/см}^2$), чем в предыдущих задачах. При фокусировке исходного пучка в 100 раз (например, за счет тепловой самофокусировки) свой вклад может дать и стрикционный механизм.

На рис. 3 представлен случай, когда начальный радиус пучка $a_0 = 10 \text{ мкм}$. Самофокусировка за счет стрикционного механизма в этом случае нарастает быстрее. Первый фокус возникает при плотности плазмы $\rho = 0.00243 \text{ г/см}^3$, то есть $\rho / \rho_{cr} \approx 0.2$.

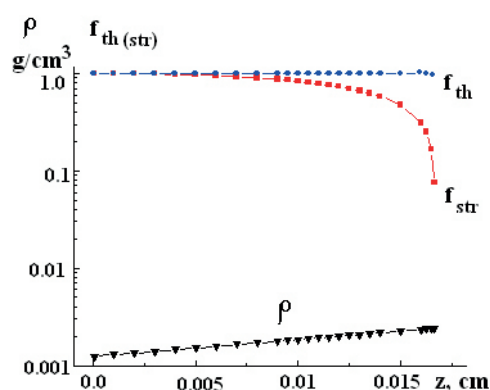


Рис. 3. Изменение безразмерного радиуса пучка на экспоненциальном профиле плотности для случая $I = 5 \times 10^{16} \text{ Вт/см}^2$ и $a_0 = 10 \text{ мкм}$ (синий – тепловой механизм, красный – стрикционный механизм, черный – распределение плотности плазмы).

Развитие самофокусировки лазерного пучка в плазме кратера, образовавшегося при облучении мощным лазером конденсированной мишени, приве-

дет к повышению интенсивности на ~ 2 порядка величины. В условиях экспериментов [10] преобладающим механизмом самофокусировки является тепловой. Ранее уже упоминалось, что в реальной ситуации при выполнении условия $I \times \lambda^2 > 10^{14} \text{ (Вт/см}^2) \times \text{мкм}^2$ в плазме возникают «горячие пятна», где формируются потоки надтепловых электронов, которые проникают вглубь конденсированного вещества, чей след наблюдался в обсуждаемых экспериментах вблизи дна кратера.

Заключение

1. Развита упрощенная физико-математическая модель и на ее основе создана программа «FOCUS» для моделирования эффекта самофокусировки лазерных пучков в плазме.

2. Проведены расчеты развития тепловой самофокусировки ультрафиолетовых лазерных пучков в условиях, приближенных к тем, которые были реализованы в экспериментах на установке «ГАРПУН» (Москва, ФИАН).

В РТУ МИРЭА ведутся работы по созданию программы, которая позволила бы рассчитывать процессы самофокусировки совместно с уравнениями плазменной динамики¹.

Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-02-00875.

Вклад авторов

Лебо И.Г. – концепция научной работы, проведение всех этапов исследования, написание текста статьи, итоговые выводы.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution

Lebo I.G. – research concept, carrying out all the stages of the study, writing the draft, final conclusions.

The author declares no conflicts of interests.

Литература

1. Басов Н.Г., Крохин О.Н. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора. *ЖЭТФ*. 1964;46(1):171–175.
2. Moses E.I. and the NIC Collaborators. The National Ignition Campaign: status and progress. IOP Publishing and International Atomic Energy Agency. *Nuclear Fusion*. 2013;53(10):104020. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/10/104020>
3. Гаранин С.Г., Бельков С.А., Бондаренко С.В. Концепция построения лазерной установки УФЛ-2М. В сб. докл. XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2012. С. 17.
4. Ebrardt J. and Chapt J.M. LMJ on its way to fusion. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2010;244(3):032017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/244/3/032017>

References

1. Basov N.G., Krokhin O.N. Conditions for heating up of a plasma by the radiation from an optical generator. *Sov. Phys. JETP*. 1964;19(1):123–126. URL: http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/e_019_01_0123.pdf
2. Moses E.I. and the NIC Collaborators. The National Ignition Campaign: status and progress. IOP Publishing and International Atomic Energy Agency. *Nuclear Fusion*. 2013;53(10):104020. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/10/104020>
3. Garanin S.G., Bel'kov S.A., Bondarenko S.V. In: Proc. XXXIX Intern. (Zvenigorod) conf. on plasma phys. and controlled fusion. Russia, Zvenigorod, 6–10 February, 2012. P. 17 (in Russ.).

¹ Расчет таких задач требует больших ресурсов ЭВМ и распараллеливания процессов, что возможно только с помощью современных супер-ЭВМ [20].

5. Zhen W., Wei X., Zhu Q., Jing F. et al. Laser performance of the SG-III laser facility. High power laser. *Sci Eng.* 2016;4:e21.
<https://doi.org/10.1017/hpl.2016.20>
6. Smalyuk V.A., Robey H., Döppner T., Casey D.N. et al. Experimental results of radiation-driven, layered deuterium-tritium implosions with adiabat-shaped drives at the National Ignition Facility. *Phys. Plasmas.* 2016;23(10):101063.
<https://doi.org/10.1063/1.4964919>
7. Басов Н.Г., Лебо И.Г., Розанов В.Б. Физика лазерного термоядерного синтеза. М.: Знание; 1988. 172 с.
8. Кузенов В.В., Лебо А.И., Лебо И.Г., Рыжков С.В. Физико-математические модели расчета воздействия мощных лазерных и плазменных потоков. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2015. 326 с. ISBN 978-5-7038-4183-9
9. Bodner S.E. The path to electrical energy using laser fusion. *High Power Laser Sci. Eng.* 2019;7:e63.
<https://doi.org/10.1017/hpl.2019.51>
10. Zvorykin V., Lebo I., Shutov A., Ustinovskii N. Self-focusing of UV radiation in 1 mm scale plasma in a deep ablative crater produced by 100 ns, 1 GW KrF laser pulse in the context of the ICF. *Matter Radiat. Extremes.* 2020;5(3):03540.
<https://doi.org/10.1063/1.5142361>
11. Аскар'ян Г.А. Влияние градиента мощного электромагнитного пучка на электроны и атомы. *ЖЭТФ.* 1962;42(6):1567–1570.
12. Ахманов С.А., Сухоруков А.П., Хохлов Р.В. Самофокусировка и дифракция света в нелинейной среде. *УФН.* 1967;93(1):19–70.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0093.196709c.0019>
13. Sodha M.S., Tripathi V.K. Nonlinear penetration of an inhomogeneous laser beam in an overdense plasma. *Phys. Rev. A.* 1977;16(5):2101–2104.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.16.2101>
14. Zvorykin V.D., Lebo I.G. Laser and Target Experiments on KrF GARPUN laser installation at FIAN. *Laser Part. Beams.* 1999;17(1):69–88.
<https://doi.org/10.1017/S0263034699171064>
15. Craxton R.S., Anderson K.S., Boehly T.R. et al. Direct-drive inertial confinement fusion: A review. *Phys. Plasmas.* 2015;22(11):110501.
<https://doi.org/10.1063/1.4934714>
16. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 683 с.
17. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.
18. Max C.G. Strong self-focusing due to the ponderomotive force in plasmas. *Phys. Fluids.* 1976;19:74–77.
<https://doi.org/10.1063/1.861305>
19. Perkins F.W., Valeo E.J. Thermal Self-Focusing of Electromagnetic Waves in Plasmas. *Phys. Rev. Letters.* 1974;32(22):1234–1237.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.32.1234>
20. Лебо И.Г., Симаков А.И. Моделирование развития вихревых структур в сверхзвуковом газовом потоке. *Российский технологический журнал.* 2018;6(5):45–54.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-5-45-54>
4. Ebrardt J. and Chapt J.M. LMJ on its way to fusion. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2010;244(3):032017.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/244/3/032017>
5. Zhen W., Wei X., Zhu Q., Jing F. et al. Laser performance of the SG-III laser facility. High Power Laser. *Sci Eng.* 2016;4:e21.
<https://doi.org/10.1017/hpl.2016.20>
6. Smalyuk V.A., Robey H., Döppner T., Casey D.N. et al. Experimental results of radiation-driven, layered deuterium-tritium implosions with adiabat-shaped drives at the National Ignition Facility. *Phys. Plasmas.* 2016;23(10):101063.
<https://doi.org/10.1063/1.4964919>
7. Basov N.G., Lebo I.G., Rozanov V.B. *Fizika lazernogo termoyadernogo sinteza* (Physics of Laser Thermonuclear Fusion). Moscow: Znanie; 1988. 172 p. (in Russ.).
8. Kuzenov V.V., Lebo A.I., Lebo I.G., Ryzhkov S.V. *Fiziko-matematicheskie modeli rascheta vozdeistviya moshchnykh lazernykh i plazmennyykh potokov* (Physical-mathematical models and simulation methods of action of high-power). Moscow: N.E. Bauman Moscow State Technical University Publishing House; 2015. 326 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7038-4183-9
9. Bodner S.E. The path to electrical energy using laser fusion. *High Power Laser Sci. Eng.* 2019;7:e63.
<https://doi.org/10.1017/hpl.2019.51>
10. Zvorykin V., Lebo I., Shutov A., Ustinovskii N. Self-focusing of UV radiation in 1 mm scale plasma in a deep ablative crater produced by 100 ns, 1 GW KrF laser pulse in the context of the ICF. *Matter Radiat. Extremes.* 2020;5(3):03540.
<https://doi.org/10.1063/1.5142361>
11. Askar'yan G.A. Effect of the gradient of a strong electromagnetic beam on electrons and atoms. *Sov. Phys. JETP.* 1962;15:1088.
12. Akhmanov S.A., Sukhorukov A.P., Khokhlov R.V. Self-focusing and diffraction of light in nonlinear medium. *Sov. Phys. Usp.* 1968;10:609–636.
<https://doi.org/10.1070/PU1968v010n05ABEH005849>
13. Sodha M.S., Tripathi V.K. Nonlinear penetration of an inhomogeneous laser beam in an overdense plasma. *Phys. Rev. A.* 1977;16(5):2101–2104.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.16.2101>
14. Zvorykin V.D., Lebo I.G. Laser and Target Experiments on KrF GARPUN laser installation at FIAN. *Laser Part. Beams.* 1999;17(1):69–88.
<https://doi.org/10.1017/S0263034699171064>
15. Craxton R.S., Anderson K.S., Boehly T.R. et al. Direct-drive inertial confinement fusion: A review. *Phys. Plasmas.* 2015;22(11):110501.
<https://doi.org/10.1063/1.4934714>
16. Ginzburg V.L. *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln v plazme* (Propagation of electromagnetic waves in plasma). Moscow: Nauka; 1967. 683 p. (in Russ.).
[Ginzburg V.L. Propagation of the Electromagnetic Waves in Plasmas: Transl. from the Russian. (Eds.) W.L. Sadowski and D.M. Gallik. NY: Gordon and Breach; 1961. 822 p.]
17. Борн М., Вольф Э. *Osnovy optiki* (Principles of optics). Moscow: Nauka; 1973. 719 p. (in Russ.).
18. Max C.G. Strong self-focusing due to the ponderomotive force in plasmas. *Phys. Fluids.* 1976;19:74–77.
<https://doi.org/10.1063/1.861305>
19. Perkins F.W., Valeo E.J. Thermal Self-Focusing of Electromagnetic Waves in Plasmas. *Phys. Rev. Letters.* 1974;32(22):1234–1237.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.32.1234>
20. Lebo I.G., Simakov A.I. Modeling the evolution of whirl structures in a supersonic gas stream. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal.* 2018;6(5):45–54 (in Russ.).
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-5-45-54>

Об авторе:

Лебо Иван Германович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: lebo@mirea.ru. Scopus Author Id 7003412908.

About the author:

Ivan G. Lebo, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of Department of Higher Mathematics, Cybernetics Institute, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: lebo@mirea.ru. Scopus Scopus Author Id 7003412908.

Поступила: 02.09.2020; получена после рецензирования: 21.11.2020; принята к опубликованию: 05.12.2020.

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-74578 от 14 декабря 2018 г.

Дата опубликования 29 января 2021 г.

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

<http://rtj-mirea.ru>

