



RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

*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. Управление в организационных системах*

Управление качеством продукции. Стандартизация

Мировоззренческие основы технологии и общества



RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

- 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. Управление в организационных системах
- Управление качеством продукции. Стандартизация
- Мировоззренческие основы технологии и общества
- Information systems. Computer sciences. Issues of information security
- Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and nondestructive 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. Management in organizational systems
- Product quality management. Standardization
- Philosophical foundations of technology and society

Russian Technological Journal
2024, том 12, № 5

Russian Technological Journal
2024, Vol. 12, No. 5

Russian Technological Journal 2024, том 12, № 5

Дата опубликования 27 сентября 2024 г.

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

Периодичность: один раз в два месяца.

Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 г. издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026), а с января 2016 г. по июль 2021 г. под названием «Российский технологический журнал» (ISSN 2500-316X).

Учредитель и издатель:

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

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доктора наук, индексируется в РГБ, РИНЦ, eLibrary, Соционет, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, президент ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет (ПТУ МИРЭА), Москва, Россия.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, sigov@mirea.ru.

Редакция:

Зав. редакцией	к.т.н. Г.Д. Середина
Научный редактор	д.т.н., проф. Г.В. Куликов
Выпускающий редактор	А.С. Алексеенко
Технический редактор	Д.В. Трофимова

119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7 (499) 600-80-80 (#31288).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Регистрационный номер и дата принятия решения о регистрации СМИ ПИ № ФС 77 - 81733 от 19.08.2021 г. СМИ зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Индекс по объединенному каталогу «Пресса России» 79641.

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

Russian Technological Journal 2024, Vol. 12, No. 5

Publication date September 27, 2024.

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.

Periodicity: bimonthly.

The journal was founded in December 2013. The titles were «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026) and «Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal» from January 2016 until July 2021 (ISSN 2500-316X).

Founder and Publisher:

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

The journal is included into the List of peer-reviewed science press of the State Commission for Academic Degrees and Titles of Russian Federation. The Journal is included in Russian State Library (RSL), Russian Science Citation Index, eLibrary, Socionet, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Ulrich's International Periodicals Directory.

Editor-in-Chief:

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

Editorial staff:

Managing Editor	Cand. Sci. (Eng.) Galina D. Seredina
Scientific Editor	Dr. Sci. (Eng.), Prof. Gennady V. Kulikov
Executive Editor	Anna S. Alekseenko
Technical Editor	Darya V. Trofimova

86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7 (499) 600-80-80 (#31288).
E-mail: seredina@mirea.ru.

The registration number ПИ № ФС 77 - 81733 was issued in August 19, 2021 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media of Russia.

The subscription index of *Pressa Rossii*: 79641.

Редакционная коллегия

Кудж Станислав Алексеевич	д.т.н., профессор, 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	хабилитированный доктор наук, профессор, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва. Scopus Author ID 7003687871, juras.banyas@ff.vu.lt
Бетелин Владимир Борисович	академик Российской академии наук (РАН), д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Федерального научного центра «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
Боков Алексей Алексеевич	д.ф.-м.н., 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
Вахрушев Сергей Борисович	д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Гуляев Юрий Васильевич	академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
Жуков Дмитрий Олегович	д.т.н., профессор кафедры телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
Кимель Алексей Вольдемарович	к.ф.-м.н., профессор, Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды. Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
Крамаров Сергей Олегович	д.ф.-м.н., профессор, Сургутский государственный университет, Сургут, Россия. Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513 , mavoo@yandex.ru
Новиков Дмитрий Александрович	академик РАН, д.т.н., директор Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, https://orcid.org/0000-0002-9314-3304 , novikov@ipu.ru
Перно Филипп	Dr. Sci. (Electronics), профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Романов Михаил Петрович	д.т.н., профессор, научный руководитель Института искусственного интеллекта РТУ МИРЭА, Москва, Россия. Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Савиных Виктор Петрович	академик РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии, Москва, Россия. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
Соболевский Андрей Николаевич	д.ф.-м.н., директор Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Москва, Россия. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, http://orcid.org/0000-0002-3082-5113 , sobolevski@iitp.ru
Сюй Ли Да	академик Европейской академии наук, Российской инженерной академии и Инженерной академии Армении, Dr. Sci. (Systems Science), профессор, Университет Олд Доминион, Норфолк, Соединенные Штаты Америки. Scopus Author ID 13408889400, https://orcid.org/0000-0002-5954-5115 , lxu@odu.edu
Харин Юрий Семенович	академик Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, 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
Чаплыгин Юрий Александрович	академик РАН, д.т.н., профессор, член Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, президент Института микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
Шпак Василий Викторович	к.э.н., зам. министра промышленности и торговли Российской Федерации, Министерство промышленности и торговли РФ, Москва, Россия; доцент, Институт микроприборов и систем управления им. Л.Н. Преснухина НИУ «МИЭТ», Москва, Россия, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Editorial Board

Stanislav A. Kudzh	Dr. Sci. (Eng.), 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 Banys	Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania. Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
Vladimir B. Betelin	Academician at the Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of Scientific Research Institute for System Analysis, RAS, Moscow, Russia. Scopus Author ID 6504159562, ResearcherID J-7375-2017, betelin@niisi.msk.ru
Alexei A. Bokov	Dr. Sci. (Phys.-Math.), 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
Sergey B. Vakhrushev	Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia. Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Yury V. Gulyaev	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Academic 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. (Eng.), Professor of the Department of Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Informatics, 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
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
Dmitry A. Novikov	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Director of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Moscow, Russia. Scopus Author ID 7102213403, ResearcherID Q-9677-2019, https://orcid.org/0000-0002-9314-3304 , novikov@ipu.ru
Philippe Pernod	Dr. Sci. (Electronics), Professor, Dean of Research of Centrale Lille, Villeneuve-d'Ascq, France. Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Mikhail P. Romanov	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academic Supervisor of the Institute of Artificial Intelligence, RTU MIREA, Moscow, Russia. Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Viktor P. Savinykh	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia. Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
Andrei N. Sobolevski	Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director of Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Moscow, Russia. Scopus Author ID 7004013625, ResearcherID D-9361-2012, http://orcid.org/0000-0002-3082-5113 , sobolevski@iitp.ru
Li Da Xu	Academician at the European Academy of Sciences, Russian Academy of Engineering (formerly, USSR Academy of Engineering), and Armenian Academy of Engineering, Dr. Sci. (Systems Science), Professor and Eminent Scholar in Information Technology and Decision Sciences, Old Dominion University, Norfolk, VA, the United States of America. Scopus Author ID 13408889400, https://orcid.org/0000-0002-5954-5115 , lxu@odu.edu
Yury S. Kharin	Academician at 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
Yuri A. Chaplygin	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Member of the Departments of Nanotechnology and Information Technology of the RAS, President of the National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia. Scopus Author ID 6603797878, ResearcherID B-3188-2016, president@miet.ru
Vasilii V. Shpak	Cand. Sci. (Econ.), Deputy Minister of Industry and Trade of the Russian Federation, Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, Moscow, Russia; Associate Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russia, mishinevaiv@minprom.gov.ru

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

- 7** *Камел С. Жафар, Али А. Мохаммад, Али Х. Исса, А.В. Панов*
Автоматизация поиска юридической информации на арабском языке:
подход к поиску документов

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- 17** *А.А. Парамонов, В.В. Чу*
Помехоустойчивость приема сигнала OFDM с использованием квадратурной амплитудной модуляции с мягкими решениями при наличии узкополосных помех
- 33** *А.Е. Троицкая, Ю.А. Полевода, Г.В. Куликов*
Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией на фоне ретранслированной помехи
- 42** *Фам Тхань Туан, О.В. Тихонова*
Метод ограничения пик-фактора с дополнительным сигналом компенсации в системе с ортогональным частотным разделением каналов для гауссовского канала

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния

- 50** *А.С. Тойкка, Н.В. Каманина*
Влияние обработки поверхностными электромагнитными волнами на рефрактивные свойства тонких пленок на основе оксидов индия и олова с лазерно-осажденными одностенными углеродными нанотрубками

Математическое моделирование

- 63** *Н.Н. Карабутов*
Об идентификации взаимосвязанных систем
- 77** *С.Е. Савотченко*
Модели симметричных трехслойных волноводных структур с градиентной сердцевиной и нелинейно-оптическими обкладками

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств. Управление в организационных системах

- 90** *А.Е. Краснов, А.А. Сапогов*
Оценка качества услуг в рамках ИТ-проектов на основе агрегирования показателей

Мировоззренческие основы технологии и общества

- 98** *А.А. Кытманов, Ю.Н. Горелова, Т.В. Зыкова, О.А. Пихтилькова, Е.В. Пронина*
Концептуальный подход к цифровой трансформации образовательного процесса в вузе

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Kamel S. Jafar, Ali A. Mohammad, Ali H. Issa, Alexander V. Panov*
Automating the search for legal information in Arabic:
A novel approach to document retrieval

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 17** *Alexey A. Paramonov, Chu Van Vuong*
Noise immunity of QAM-OFDM signal reception using soft-decision
demodulation in the presence of narrowband interference
- 33** *Alexandra E. Troitskaya, Yuriy A. Polevoda, Gennady V. Kulikov*
Noise immunity of signal reception with multiple frequency-shift keying
against retransmitted interference
- 42** *Pham Thanh Tuan, Olga V. Tikhonova*
Method for limiting the peak factor using an additional compensation signal
in a system with orthogonal frequency division multiplexing
for a Gaussian channel

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- 50** *Andrei S. Toikka, Natalia V. Kamanina*
Effect of surface electromagnetic wave treatment on the refractive properties
of thin films based on indium tin oxides with laser-deposited single-walled carbon
nanotubes

Mathematical modeling

- 63** *Nikolay N. Karabutov*
On identification of interconnected systems
- 77** *Sergey E. Savotchenko*
Models of symmetric three-layer waveguide structures with graded-index core
and nonlinear optical liners

Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries. Management in organizational systems

- 90** *Andrey E. Krasnov, Alexander A. Sapogov*
Service quality assessment in IT projects based on aggregate indicators

Philosophical foundations of technology and society

- 98** *Alexey A. Kytmanov, Yuliya N. Gorelova, Tatiana V. Zykova, Olga A. Pikhtilkova,
Elena V. Pronina*
A conceptual approach to digital transformation of the educational process
at a higher education institution

УДК 025.4.03

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-7-16>

EDN CBEERK



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Автоматизация поиска юридической информации на арабском языке: подход к поиску документов

Камел С. Жафар ^{1, @},
Али А. Мохаммад ²,
Али Х. Исса ³,
А.В. Панов ^{1, @}

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 109028 Россия

³ РОСБИОТЕХ – Российский биотехнологический университет, Москва, 125080 Россия

@ Авторы для переписки, e-mail: zhafar.k@edu.mirea.ru, panov_a@mirea.ru

Резюме

Цели. Поиск юридической информации, например, информации, связанной с различными юридическими вопросами, такими как наказание за преступления, является сложной задачей. Предлагаемый авторами подход может быть эффективным и действенным способом автоматизации поиска юридической информации без необходимости использования большого количества размеченных данных или значительных вычислительных ресурсов. Целью статьи является анализ возможности использования подхода к поиску документов в контексте юридических текстов на арабском языке, с применением методов обработки естественного языка и неконтролируемой кластеризации.

Методы. Использован подход Top2Vec – алгоритм моделирования темы, который создает вложения документов на основе семантического контекста, чтобы группировать юридические тексты на арабском языке в соответствующие темы. Использован алгоритм кластеризации на основе плотности для определения подтем внутри каждого кластера. Решаются проблемы работы с арабским юридическим текстом, такие как морфологическая сложность, двусмысленность и отсутствие стандартизированной терминологии. Предложен конвейер предварительной обработки, включающий в себя токенизацию, нормализацию, выделение корней и удаление стоп-слов.

Результаты. Результаты оценки подхода с использованием набора данных юридических текстов на арабском языке, основанного на ключевых словах, показали его эффективность и превосходство с точки зрения точности и запоминаемости. Предлагаемый подход обеспечивает точность поиска – 87% и полноту поиска – 80%. Применение этого подхода может значительно улучшить поиск юридических документов, сделав его более быстрым и точным.

Выводы. Предложенный подход может быть ценным инструментом для юристов и исследователей, которым необходимо ориентироваться в обширном и сложном ландшафте арабской юридической информации, повышая эффективность и точность ее поиска.

Ключевые слова: поиск документов, обработка естественного языка, Top2Vec, алгоритм кластеризации на основе плотности, арабские юридические документы, вложения слов, косинусное сходство

• Поступила: 05.05.2023 • Доработана: 04.04.2024 • Принята к опубликованию: 11.07.2024

Для цитирования: Жафар К.С., Мохаммад А.А., Исса А.Х., Панов А.В. Автоматизация поиска юридической информации на арабском языке: подход к поиску документов. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):7–16. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-7-16>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Automating the search for legal information in Arabic: A novel approach to document retrieval

Kamel S. Jafar ^{1, @},
Ali A. Mohammad ²,
Ali H. Issa ³,
Alexander V. Panov ^{1, @}

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Higher School of Economics, Moscow, 109028 Russia

³ Russian Biotechnological University, Moscow, 125080 Russia

@ Corresponding authors, e-mail: zhafar.k@edu.mirea.ru, panov_a@mirea.ru

Abstract

Objectives. The retrieval of legal information, including information related to issues such as punishment for crimes and felonies, represents a challenging task. The approach proposed in the article represents an efficient way to automate the retrieval of legal information without requiring a large amount of labeled data or consuming significant computational resources. The work set out to analyze the feasibility of a document retrieval approach in the context of Arabic legal texts using natural language processing and unsupervised clustering techniques.

Methods. The Topic-to-Vector (Top2Vec) topic modeling algorithm for generating document embeddings based on semantic context is used to cluster Arabic legal texts into relevant topics. We also used the HDBSCAN density-based clustering algorithm to identify subtopics within each cluster. Challenges of working with Arabic legal text, such as morphological complexity, ambiguity, and a lack of standardized terminology, are addressed by means of a proposed preprocessing pipeline that includes tokenization, normalization, stemming, and stop-word removal.

Results. The results of the evaluation of the approach using a dataset of legal texts in Arabic based on keywords demonstrated its superior effectiveness in terms of accuracy and memorability. The proposed approach provides 87% accuracy and 80% completeness. This circumstance can significantly improve the search for legal documents, making the process faster and more accurate.

Conclusions. Our findings suggest that this approach can be a valuable tool for legal professionals and researchers to navigate the complex landscape of Arabic legal information to improve efficiency and accuracy in legal information retrieval.

Keywords: search for documents, NLP, Top2Vec, HDBSCAN, Arabic legal documents, word embeddings, cosine similarity

• Submitted: 05.05.2023 • Revised: 04.04.2024 • Accepted: 11.07.2024

For citation: Jafar K.S., Mohammad A.A., Issa A.H., Panov A.V. Automating the search for legal information in Arabic: A novel approach to document retrieval. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):7–16. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-7-16>

Financial disclosure: The authors have no financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и анализ юридической информации связаны с определенными трудностями, обусловленными спецификой области права. В последние годы наблюдается растущий интерес к использованию методов обработки естественного языка для автоматизации процесса доступа к такой информации [1]. В частности, были предприняты значительные усилия по разработке систем вопросов и ответов, которые могут извлекать конкретные ответы из юридических документов [2, 3]. Однако построение качественной системы контроля качества требует большого количества размеченных данных и часто связано со значительными вычислительными затратами. В работе предлагается альтернативный подход к автоматизации поиска юридической информации, связанной с преступлениями, в т.ч. уголовными, в нормативных актах и юридических документах на арабском языке. Во многих практических случаях достаточно получить наиболее релевантные юридические документы, связанные с запросом пользователя, без необходимости извлечения конкретных ответов из документов. Подход состоит из нескольких шагов, включая сбор данных, их предварительную обработку, индексацию документов, обработку запросов и поиск документов. В нашем наборе данных используются стандартные арабские грамматические и юридические документы, касающиеся преступлений и уголовных правонарушений.

1. СВЯЗАННЫЕ РАБОТЫ

Поиск юридической информации – сфера деятельности с богатой историей и обширным объемом исследований. Рассмотрим ключевые работы и разработки в этой области с особым акцентом на подходах к поиску юридической информации и документов на арабском языке. Авторы [4] исследуют современные методы искусственного интеллекта (ИИ), используемые для систем поиска правовой информации. С появлением информационных и коммуникационных технологий практикующие юристы столкнулись с резким ростом цифровой информации, что делает крайне важными эффективные методы поиска. В статье рассматриваются

различные подходы к ИИ, включая методы обработки естественного языка, машинного обучения и извлечения знаний, а также то, как они могут помочь в поиске правовой информации. Кроме того, описываются проблемы, с которыми сталкиваются практикующие юристы, особенно при поиске аналогичных дел, законодательных актов или параграфов, и обсуждаются открытые вопросы, касающиеся систем поиска правовой информации. В целом исследование подчеркивает важность ИИ в правовой сфере и необходимость продолжения исследований и разработок в системах поиска правовой информации. В [5] представлены комментарии к девяти значимым источникам, опубликованным за последнее десятилетие. Четыре статьи посвящены анализу юридических дел, введению контекстуальных соображений, прогнозированию результатов на основе описаний дел на естественном языке, сравнению различных способов представления дел и формализации прецедентных рассуждений. Одна статья представляет метод анализа аргументов, который впоследствии стал очень широко использоваться в ИИ и праве, а именно – схемы аргументации. Две статьи относятся к онтологиям для представления правовых концепций, а две используют преимущества растущей доступности юридических наборов данных в этом десятилетии для автоматизации обобщения документов и поиска аргументов.

Авторы [6] представляют обзор развития, текущего состояния и будущих направлений правового ИИ. Юридический ИИ применяет обработку естественного языка, чтобы помочь юристам в их работе с потенциалом повышения эффективности за счет автоматизации утомительных задач. Авторы иллюстрируют точки зрения юристов и исследователей методов обработки естественного языка с помощью экспериментов и анализа существующих работ. Они определяют моделирование знаний, юридическое обоснование и интерпретируемость как три основные проблемы юридических задач, для решения которых требуются дальнейшие исследования. В документе предлагается объединить методы на основе встраивания и на основе символов для решения этих проблем, создания крупномасштабных и высококачественных наборов данных и учета этических проблем, таких как гендерная предвзятость и расовая

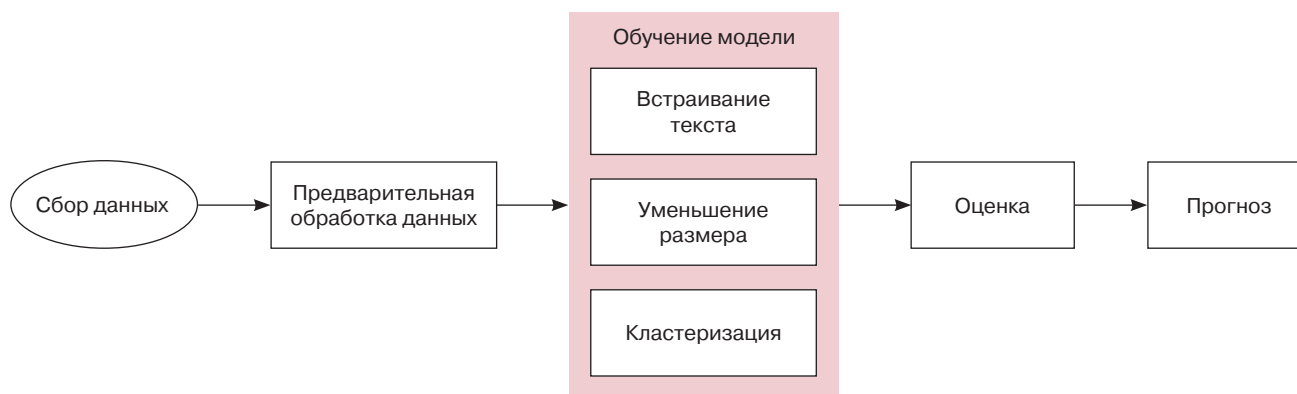


Рис. 1. Подход Top2Vec для поиска юридической информации

дискриминация. В конечном счете, юридический ИИ должен играть вспомогательную роль в правовой системе, а профессионалы должны принимать решения в первую очередь. Авторы [7] описывают разработку арабской системы извлечения информации из юридических документов, в которой используются гибридный подход машинного обучения и методы, основанные на правилах. Система предназначена для извлечения важной информации из документов и предоставления ее в структурированном виде для сложных запросов. Подход был протестирован на ограниченном классе арабских юридических документов и показал хорошие результаты. Авторы предлагают несколько возможных расширений системы, таких как рассмотрение различных типов дел в данной правовой системе, использование более продвинутых арабских инструментов методов обработки естественного языка, изучение использования глубокого обучения, извлечение большего количества отношений, улучшение представления результатов и расширение системы в другие области, такие как здравоохранение и финансы.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

Предлагаемая методология использования подхода Topic-to-Vector (Top2Vec) для поиска юридической информации содержит несколько шагов (рис. 1). Первым шагом является подготовка данных, которая включает сбор юридических документов, связанных с преступлениями и уголовными преступлениями, в арабских правилах и документах. Затем данные предварительно обрабатываются с использованием конвейера, который включает в себя токенизацию, нормализацию, выделение корней и удаление стоп-слов, чтобы подготовить текстовые данные для модели.

Следующим шагом является обучение модели, которое включает в себя создание вложений документов с использованием модели Top2Vec. Затем вложения сокращаются до пространства меньшей

размерности с использованием методов уменьшения размерности, таких как UMAP¹, чтобы упростить кластеризацию документов. Кластеризация выполняется с использованием алгоритма кластеризации на основе плотности, например, HDBSCAN², который может эффективно идентифицировать кластеры документов на основе их сходства [8].

После завершения кластеризации модель можно оценить с помощью набора реальных пользовательских запросов. Для каждого запроса модель извлекает наиболее релевантные кластеры документов, и пользователь может просматривать документы, чтобы найти необходимую информацию. Производительность модели можно оценить с помощью таких показателей, как точность и полнота.

Наконец, модель можно использовать для прогнозирования, когда пользователь вводит запрос, а модель извлекает наиболее релевантные кластеры документов. Затем пользователь может просматривать документы, чтобы найти необходимую информацию. Прогноз можно повторять для разных запросов, а модель можно постоянно обновлять новыми данными для повышения ее производительности. В целом, эта методология предлагает эффективный и действенный способ автоматизации поиска юридической информации, связанной с преступлениями, в т.ч. уголовными, в юридических документах на арабском языке.

2.1. Подход Top2Vec

Top2Vec [9, 10] – это новая неконтролируемая техника кластеризации документов и моделирования тем, которая может обнаруживать темы в крупномасштабных наборах данных без какого-либо предварительного знания их количества. Основная

¹ Uniform manifold approximation and projection – алгоритм машинного обучения, выполняющий нелинейное снижение размерности.

² Hierarchical density-based spatial clustering of applications with noise – иерархическая пространственная кластеризация приложений с шумом на основе плотности.

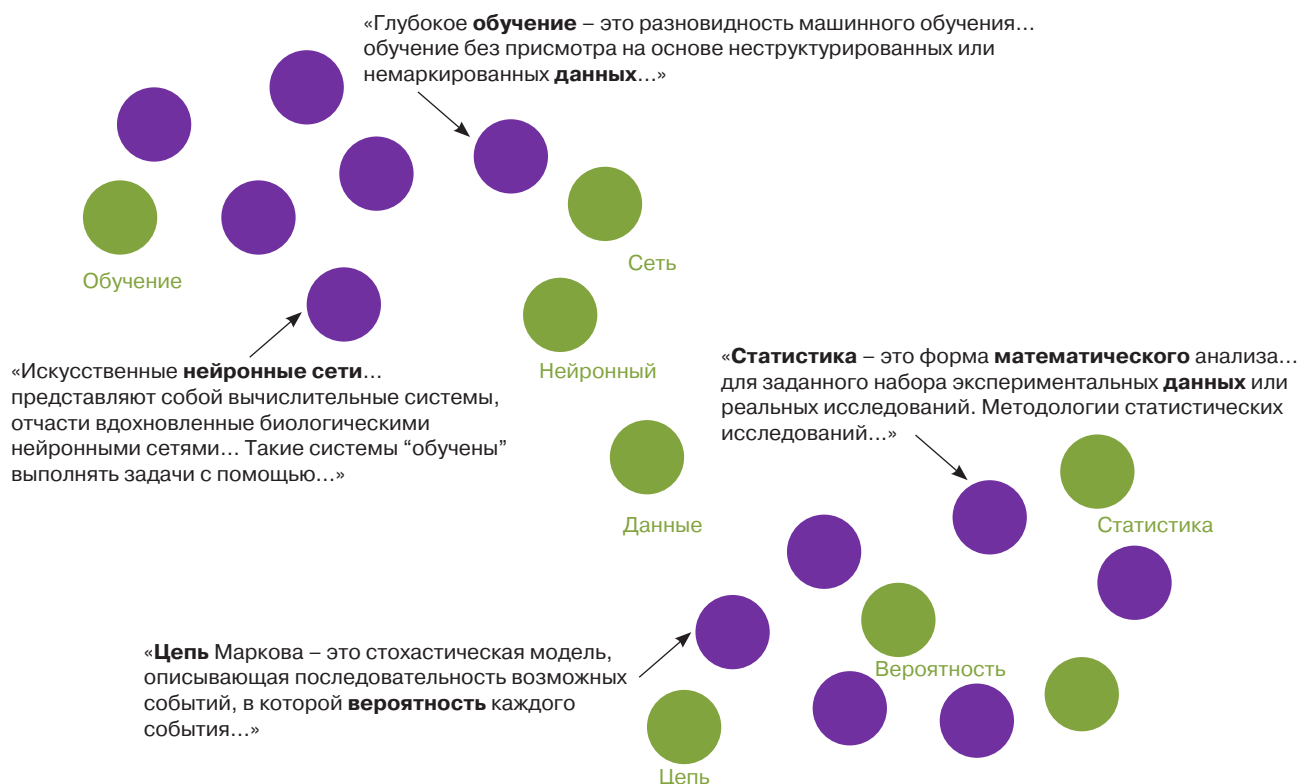


Рис. 2. Пример семантического пространства

идея Top2Vec заключается в том, чтобы встроить документы и темы в одно и то же пространство, а затем сгруппировать встроженные документы с использованием алгоритма кластеризации на основе плотности [11]. Top2Vec также может автоматически определять количество тем, а темы представлены в виде набора слов и связанного вектора. Алгоритм превосходит традиционные методы тематического моделирования, такие как скрытое распределение Дирихле и неотрицательная матричная факторизация как по качеству кластеризации, так и по масштабируемости для больших наборов данных. Кроме того, Top2Vec применялся в различных областях, включая поиск по сходству документов, визуализацию и обнаружение аномалий, где был продемонстрирован его потенциал.

На рис. 2 показан пример семантического пространства. Фиолетовые точки – это документы, а зеленые – слова. Слова ближе всего к документам, которые они лучше представляют, а похожие документы расположены близко друг к другу.

2.2. Алгоритм кластеризации HDBSCAN

Иерархическая пространственная кластеризация приложений с шумом на основе плотности (HDBSCAN) [12, 13] представляет собой алгоритм кластеризации, который может идентифицировать кластеры различной плотности и формы

в многомерных пространствах. Он использует иерархический подход для построения иерархии кластеров и автоматически определяет их количество. Одним из преимуществ HDBSCAN является то, что он может обрабатывать кластеры разных размеров и форм, а также идентифицировать точки шума. Алгоритм имеет несколько гиперпараметров, которые можно настроить для оптимизации результатов кластеризации. Ниже приведены некоторые из ключевых гиперпараметров:

- Минимальный размер кластера: этот параметр устанавливает минимальное количество точек, необходимое для формирования кластера. Увеличение этого параметра приводит к увеличению кластеров и уменьшению их количества.
- Метрика: этот параметр определяет метрику расстояния, используемую для расчета сходства между точками данных. В зависимости от характеристик данных могут использоваться различные показатели.
- Метод выбора кластера: этот параметр определяет, каким образом окончательный набор кластеров выбирается из иерархии.

В процессе обучения модели Top2Vec был использован алгоритм HDBSCAN со следующими гиперпараметрами: минимальный размер кластера – 3, метрика – евклидова, метод выбора листового кластера – leaf.

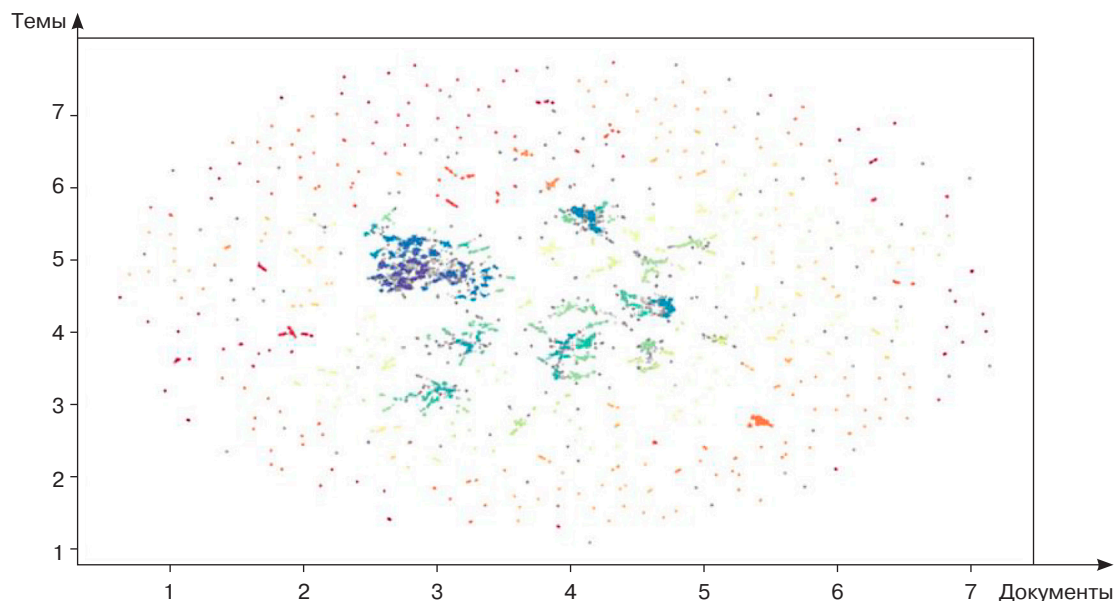


Рис. 3. Поиск плотных областей документов с помощью пространственной кластеризации приложений на основе иерархической плотности с шумом

Эти гиперпараметры выбраны на основе характеристик имеющегося набора данных и были настроены для оптимизации результаты кластеризации. Использована евклидова метрика, т.к. она является общей метрикой для измерения расстояния между точками в многомерных пространствах, и метод выбора листового кластера, поскольку он подходит для больших наборов данных и обеспечивает хороший баланс между скоростью и точностью. Минимальный размер кластера, равный 3, был выбран, чтобы гарантировать, что небольшие кластеры не будут формироваться, а шумовые точки не будут включены в кластеры.

Результирующая визуализация, показанная на рис. 3, отображает кластеры в двумерном пространстве и позволяет увидеть, как документы в каждом кластере связаны друг с другом. Этот подход представляет собой полезный инструмент для изучения и навигации по сложному ландшафту юридической информации и может помочь специалистам в области права и исследователям быстро идентифицировать соответствующие документы на основе их содержания.

2.3. Сбор данных и предварительная обработка

На этом этапе собираются и предварительно обрабатываются нормативные и юридические документы на арабском языке, касающиеся преступлений. Используется набор стандартных юридических документов, включающий различные типы юридических текстов, т.е. законы и постановления. Эти документы собраны в один файл csv, называемый *корпусом*, где каждый документ представляет собой одну запись (строку) в этом корпусе.

Каждая строка имеет несколько основных ключей, необходимых для организации данных:

1. Индекс: уникальный порядковый номер для каждого документа.
2. Идентификатор: уникальная строка для каждого документа, которая представляет собой нормативный или юридический документ, реальный идентификатор, как он упоминается в первоисточнике.
3. Название: строковое название нормативного или правового документа.
4. Резюме: строковое краткое описание содержания регламента или документа.
5. Детали: строковое полное описание и содержание документа, как оно есть в первоисточнике.

В целях контролируемого обучения модель обучается только на тех данных, которые находятся в колонке Details из корпуса. Они собираются в один список. Затем результирующий список предварительно обрабатывается, чтобы удалить стоп-слова, знаки препинания и диакритические знаки, а также выполнить определение корней и нормализацию.

Этап предварительной обработки включает в себя следующие подэтапы:

1. Токенизация: этот этап включает в себя разбиение текста на отдельные слова или токены. Это важный первый шаг в любом конвейере обработки текста, поскольку большинство алгоритмов работает с отдельными словами или токенами, а не с целыми предложениями или документами. Токенизация может выполняться с использованием различных методов: токенизация на основе пробелов, регулярных выражений и правил.

2. Удаление стоп-слов. Стоп-слова – это общеупотребительные слова, которые часто удаляют из текста, поскольку они не несут особого смысла, а их присутствие может снизить точность анализа текста. Примерами стоп-слов являются предлоги, союзы, артикли (and, the, of, in и пр.). Удаляя стоп-слова, можно уменьшить размерность данных и повысить эффективность последующих шагов обработки текста.
3. Основополагание (стемминг). Этот шаг включает в себя приведение слов к их корневой форме, также известной как основа. Цель стемминга – сгруппировать похожие слова, даже если они неидентичны. Стемминг может быть выполнен с использованием алгоритма Портера, алгоритма снежного кома и алгоритма Ланкастера.
4. Нормализация. Этот шаг включает в себя преобразование слов в стандартную форму, чтобы обеспечить согласованность и уменьшить избыточность в тексте. Примеры нормализации включают преобразование всех слов в нижний регистр, преобразование всех чисел в цифры и удаление знаков препинания. Нормализация помогает уменьшить шум в данных и повысить точность последующих шагов обработки текста. После этого шага получаем необходимый набор данных предварительно обработанных документов, который будет использоваться для обучения модели.

2.4. Обучение модели

Обучение модели Top2Vec включает в себя несколько параметров, которые необходимо установить на основе характеристик набора данных и желаемого результата. В этой работе модель Top2Vec была обучена с использованием следующих параметров:

- Документы: корпус предварительно обработанных документов для кластеризации.
- min count: минимальное количество раз, которое должно появиться слово, чтобы быть включенным в модельный словарь.
- Модель внедрения: тип модели внедрения, используемый для создания вложений документов. В этом случае была использована модель Document-to-Vector (Doc2Vec) – неконтролируемая модель глубокого обучения, которая может изучать векторные представления документов, что позволяет эффективно вычислять сходство и моделировать темы.
- Разделить документы: логическое значение, указывающее, следует ли разбивать документы на части для обработки. В этой работе значение «раздельные документы» соответствует истине (true).

- Блокировщик документов: метод, используемый для разделения документов. В этом случае использован последовательный фрагментатор – метод разделения документов на более мелкие последовательные фрагменты фиксированной длины для облегчения обучения и обработки моделей машинного обучения.
- Длина фрагмента: максимальная длина каждого фрагмента документа. В этом случае установлена длина блока 5, т.е. каждый документ разбит на блоки по 5 предложений. Этот параметр управляет степенью детализации процесса разделения: меньшие значения приводят к меньшим фрагментам и потенциально более подробным темам, а большие значения – к более крупным фрагментам и потенциально более общим темам.
- Максимальное количество фрагментов: максимальное количество фрагментов для каждого документа. В данном случае установлено максимальное количество фрагментов равное 2, т.е. каждый документ разбивается не более чем на 2 фрагмента длиной 5 предложений. Таким образом, если документ длиннее 10 слов, он будет разделен на 2 фрагмента по 5 слов, а если документ короче 6 слов, он будет считаться одним фрагментом.
- Аргументы HDBSCAN: гиперпараметры алгоритма кластеризации HDBSCAN, минимальный размер кластера, мера расстояния и метод выбора кластера.
- Скорость: скорость для обучения модели. В работе установлено «глубокое обучение», которое является наиболее сложным и эффективным.

После установки этих параметров происходит обучение модели Top2Vec.

Оптимальные значения получаются после нескольких экспериментов с разными параметрами и сравнения результатов. Модель обучается на большом количестве юридических документов. Из-за этого и возможностей глубокого обучения процесс обучения занимает несколько часов. Результатом процесса обучения является модель, имеющая доступ к набору кластеров, каждый из которых содержит репрезентативный документ и список подобных документов. Эти кластеры можно использовать для изучения корпуса и выявления закономерностей или тем в юридических документах.

2.5. Обработка запросов

На этом этапе запрос пользователя обрабатывается так, чтобы он соответствовал предварительно обработанным документам, которые использовались для обучения модели. К запросу пользователя применяются те же методы предварительной обработки,

что и для документов. Затем предварительно обработанный запрос используется для создания набора документов-кандидатов по модели.

2.6. Поиск документов

Чтобы получить документы, связанные с запросом, с помощью Top2Vec, первым шагом является встраивание запроса в то же векторное пространство, что и документы. Это делается путем передачи запроса через ту же нейронную сеть, которая использовалась для встраивания документов. Результатом является вектор запроса, представляющий запрос в том же многомерном векторном пространстве.

Затем Top2Vec вычисляет косинусное сходство между вектором запроса и всеми векторами документа в векторном пространстве. Оценка косинусного сходства находится в диапазоне от -1 до 1 , где 1 указывает на полное сходство, 0 указывает на отсутствие сходства и -1 указывает на полное несходство.

Косинусное сходство между векторами $\mathbf{q}$ и $\mathbf{d}$ можно рассчитать следующим образом:

$$\cos(\mathbf{q}, \mathbf{d}) = \frac{\mathbf{q} \cdot \mathbf{d}}{(\|\mathbf{q}\| \cdot \|\mathbf{d}\|)},$$

где $\|\mathbf{q}\|$ и $\|\mathbf{d}\|$ – евклидовы нормы векторов $\mathbf{q}$ и $\mathbf{d}$, а $\mathbf{q} \cdot \mathbf{d}$ – их скалярное произведение [14].

3. ОЦЕНКА И ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемый подход к поиску документов оценивался с использованием набора реальных пользовательских запросов, связанных с преступлениями, в т.ч. уголовными, в юридических документах на арабском языке. Сначала формировался набор из 100 пользовательских запросов от юристов, работающих с такими документами. Для оценки эффективности подхода сравнивались 10 самых популярных документов по каждому запросу с набором релевантных документов, определенных экспертами в области права. Документ считается релевантным, если он содержит информацию, относящуюся к теме запроса, даже если он не содержит явного ответа на запрос. Например, документ о расследовании убийства будет считаться релевантным для запроса об убийстве, даже если он явно не отвечает на запрос. Для измерения эффективности предлагаемого подхода использованы две стандартные оценочные метрики: точность и полнота. Точность измеряет долю извлеченных релевантных документов, а полнота – долю извлеченных релевантных документов. В частности, точность и полнота определялись следующим образом [15]:

$$\text{Precision} = \frac{\text{Relevant Documents Retrieved (RDR)}}{\text{Total Documents Retrieved (TDR)}},$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{Relevant Documents Retrieved (RDR)}}{\text{Total Relevant Documents (TRD)}},$$

где RDR – количество извлеченных релевантных документов, TDR – общее количество извлеченных документов, а TRD – общее количество релевантных документов.

Для обеспечения единой сводной меры общей производительности была проведена оценка балла F1, который является гармоническим средним значением точности и полноты. Для сравнения производительности предлагаемого подхода с базовым уровнем реализован простой подход на основе ключевых слов, который извлекает документы, содержащие хотя бы одно ключевое слово из пользовательского запроса. При сравнении использован один и тот же набор запросов и показателей оценки. Эксперименты показали, что предлагаемый подход к поиску документов превосходит подход, основанный на ключевых словах как с точки зрения точности, так и с точки зрения полноты, в частности, обеспечивает точность поиска – 87% и полноту поиска – 80% по сравнению с точностью – 66% и полнотой – 62% для подхода, основанного на ключевых словах. Оценка F1 для предлагаемого подхода составляет 0.83, а оценка F1 для подхода на основе ключевых слов – 0.63.

Эти результаты показывают, что использование методов обработки естественного языка и машинного обучения при поиске документов может значительно повысить производительность систем поиска юридической информации. При обработке пользовательских запросов и документов с использованием передовых алгоритмов предлагаемый подход позволяет извлекать соответствующие юридические документы с более высокой точностью, уменьшая нагрузку на практикующих юристов по ручному поиску в больших хранилищах документов. Тем не менее, следует отметить, что этот подход еще можно улучшить. Например, он может оказаться неэффективным при поиске соответствующих документов для узкоспециализированных юридических областей, требующих более тонкого понимания юридического языка. Тем не менее, крайне важно признать, что нынешний подход имеет возможности для совершенствования. В частности, его эффективность может быть ограничена при идентификации соответствующих документов в узкоспециализированных правовых областях, где требуется более детальное понимание юридического языка. Кроме того, потенциальные искажения, присущие обучающим данным, могут привести к искажениям в полученных результатах.

В целом, результаты проведенных экспериментов показывают, что предлагаемый подход к поиску документов является многообещающим шагом на пути к разработке более эффективных систем поиска правовой информации. Дальнейшие исследования и разработки в этой области способны привести к созданию еще более эффективных алгоритмов, которые смогут лучше поддерживать практикующих юристов в их работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен подход к поиску юридических документов, который использует методы обработки естественного языка, включая модель Top2Vec и алгоритм кластеризации HDBSCAN. Этот подход протестирован в сравнении с подходом, основанным на ключевых словах, и результаты показывают его превосходство с точки зрения точности и полноты. В частности, предложенный подход позволяет достичь точности поиска, равной 87% и полноты поиска, равной 80%. Это может значительно улучшить поиск юридических документов, сделав его более быстрым и точным. Однако важно отметить, что подход имеет ограничения, и в этой области есть место для будущих исследований и разработок. В целом работа подчеркивает важность использования передовых методов обработки естественного языка в юридической сфере и демонстрирует их потенциал для повышения эффективности и точности поиска юридических документов.

Вклад авторов

К.С. Жафар – провел основную часть исследования от концепции до выполнения, включая разработку методологии, реализацию алгоритма Topic-to-Vector и оценку результатов.

А.А. Мохаммад – внес вклад в обзор литературы, идентифицируя старые исследования и фоновые материалы, относящиеся к извлечению правовой информации, и помогал в написании введения.

А.Х. Исса – внес значительный вклад в написание раздела обсуждения, интерпретируя результаты в контексте существующей литературы и способствуя составлению заключения статьи.

А.В. Панов – курировал процесс исследования, предоставлял рекомендации по исследовательскому направлению и помогал в уточнении методологии и результатов.

Authors' contributions

K.S. Jafar – conducted the majority of the research from conception to execution, including the design of the methodology, implementation of the Topic-to-Vector algorithm, and evaluation of results.

A.A. Mohammad – contributed to the literature review, identifying relevant studies and background information related to legal information retrieval, and assisted in drafting the introduction.

A.H. Issa – made significant contributions to writing the discussion section, interpreting the findings within the context of existing literature, and contributed to the conclusion of the article.

A.V. Panov – supervised the research process, provided guidance on research direction, and assisted in refining the methodology and results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Sleimi A., Sannier N., Sabetzadeh M., Briand L., Dann J. Automated extraction of semantic legal metadata using natural language processing. In: *2018 IEEE 26th International Requirements Engineering Conference (RE)*. IEEE; 2018. P. 124–135. <https://doi.org/10.1109/RE.2018.00022>
2. Rogers A., Gardner M., Augenstein I. QA dataset explosion: A taxonomy of NLP resources for question answering and reading comprehension. *ACM Comput. Surveys*. 2023;55(10):1–45. <https://doi.org/10.1145/3560260>
3. Alanazi S.S., Elfadil N., Jarajreh M., Algarni S. Question Answering Systems: A Systematic Literature Review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. 2021;12(3):359. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120359>
4. Sansone C., Sperl G. Legal Information Retrieval systems: State-of-the-art and open issues. *Inform. Syst.* 2022;106:101967. <https://doi.org/10.1016/j.is.2021.101967>
5. Sartor G., Araszkiwicz M., Atkinson K., et al. Thirty years of Artificial Intelligence and Law: the second decade. *Artif. Intell. Law*. 2022;30(4):521–557. <https://doi.org/10.1007/s10506-022-09326-7>
6. Zhong H., Xiao C., Tu C., et al. How Does NLP Benefit Legal System: A Summary of Legal Artificial Intelligence. 2020. *arXiv:2004.12158* [cs.CL]. <https://arxiv.org/abs/2004.12158v5>
7. Abu Shamma S., Ayasa A., Yahya A., et al. Information extraction from Arabic law documents. In: *2020 IEEE 14th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. IEEE; 2020;1–6. <https://doi.org/10.1109/AICT50176.2020.9368577>
8. Hammami E., Faiz R. Topic Modelling of Legal Texts Using Bidirectional Encoder Representations from Sentence Transformers. In: *Advances in Information Systems, Artificial Intelligence and Knowledge Management. Conference paper. International Conference on Information and Knowledge Systems*. Cham: Springer Nature Switzerland; 2023. V. 486. P. 333–343. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51664-1_24
9. Angelov D. Top2Vec: Distributed Representations of Topics. 2020. *arXiv:2008.09470* [cs.CL]. <https://arxiv.org/abs/2008.09470v1>

10. Karas B., Qu S., Xu Y., Zhu Q. Experiments with LDA and Top2Vec for embedded topic discovery on social media data—A case study of cystic fibrosis. *Front. Artif. Intell.* 2022;5:948313. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.948313>
11. Vianna D., de Moura E.S., da Silva A.S. A topic discovery approach for unsupervised organization of legal document collections. *Artif. Intell. Law.* 2023;Online First. <https://doi.org/10.1007/s10506-023-09371-w>
12. McInnes L., Healy J., Astels S. hdbscan: Hierarchical density-based clustering. *J. Open Source Softw.* 2017;2(11):205. <https://doi.org/10.21105/joss.00205>
13. Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. 2018. *arXiv, preprint arXiv:1810.04805*. <https://arxiv.org/abs/1810.04805v2>
14. Salton G., McGill M.J. *Introduction to Modern Information Retrieval*. N.Y.: McGraw-Hill; 1983. 472 p.
15. Manning C.D., Raghavan P., Schütze H. *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge, England: Cambridge University Press; 2008. 492 p.

Об авторах

Жафар Камел С., аспирант, кафедра корпоративных информационных систем, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: zhafar.k@edu.mirea.ru. Scopus Author ID 57552322300, <https://orcid.org/0009-0004-1791-1406>

Мохаммад Али А., магистрант, Факультет компьютерных наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) (109028, Россия, Москва, Покровский бульвар, д. 11). E-mail: amokhammad_1@edu.hse.ru. <https://orcid.org/0009-0002-3533-568X>

Исса Али Х., аспирант, кафедра автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами, ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет» (РОСБИОТЕХ) (125080, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, д. 11). E-mail: ali.issa.rus@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-3699-222X>

Панов Александр Владимирович, к.т.н. доцент, профессор кафедры корпоративных информационных систем, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: panov_a@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 8571-9729, <https://orcid.org/0009-0003-0310-3638>

About the authors

Kamel S. Jafar, Postgraduate Student, Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: zhafar.k@edu.mirea.ru. Scopus Author ID 57552322300, <https://orcid.org/0009-0004-1791-1406>

Ali A. Mohammad, Master Student, Faculty of Computer Science, HSE University (11, Pokrovsky bulv., Moscow, 109028 Russia). E-mail: amokhammad_1@edu.hse.ru. <https://orcid.org/0009-0002-3533-568X>

Ali H. Issa, Postgraduate Student, Department of Automated Control Systems for Biotechnological Processes, BIOTECH University (11, Volokolamskoye sh., Moscow, 125080 Russia). E-mail: ali.issa.rus@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-3699-222X>

Alexander V. Panov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: panov_a@mirea.ru. RSCI SPIN-code 8571-9729, <https://orcid.org/0009-0003-0310-3638>

УДК 621.391.072

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-17-32>

EDN EBOWFT



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Помехоустойчивость приема сигнала OFDM с использованием квадратурной амплитудной модуляции с мягкими решениями при наличии узкополосных помех

А.А. Парамонов[@],
В.В. Чу

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Целью работы является исследование помехоустойчивости передачи цифровой информации в системах на основе мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) и квадратурной амплитудной модуляцией (quadrature amplitude modulation, QAM) поднесущих в присутствии узкополосной помехи. В качестве способа борьбы с этой помехой исследовано применение демодулятора с мягкими выходами и последующее декодирование используемых в системе сверточного кода и кода LDPC (low-density parity-check code).

Методы. Представленные в статье результаты получены с использованием методов статистической радиотехники, математической статистики, теории кодирования и компьютерного моделирования.

Результаты. Представлен простой метод вычисления мягких оценок битов в демодуляторе M -ичных сигналов QAM, где M является четной степенью двойки. Получен большой объем численных результатов, показывающих зависимость вероятности ошибки на бит передаваемой информации от кратности M , от отношений сигнал/шум, сигнал/узкополосная помеха, от скорости кодов.

Выводы. Из полученных результатов можно сделать вывод, что использование кодирования с мягкими решениями демодулятора значительно улучшает помехоустойчивость приема OFDM-сигнала, позволяя эффективно бороться с узкополосными помехами. Кодирование LDPC показывает превосходство над сверточным кодированием в повышении помехоустойчивости приема сигнала OFDM как в отсутствие узкополосных помех, так и при их наличии. Наряду с использованием в системах QAM-OFDM, предложенный простой метод демодуляции сигналов QAM с мягкими решениями может применяться в любых системах беспроводной связи, использующих M -позиционные сигналы QAM, у которых M представляет собой число 2 в четной степени.

Ключевые слова: OFDM, квадратурная амплитудная модуляция, мягкое решение, кодирование, узкополосная помеха, помехоустойчивость, коэффициент битовых ошибок

• Поступила: 23.04.2024 • Доработана: 19.06.2024 • Принята к опубликованию: 05.08.2024

Для цитирования: Парамонов А.А., Чу В.В. Помехоустойчивость приема сигнала OFDM с использованием квадратурной амплитудной модуляции с мягкими решениями при наличии узкополосных помех. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):17–32. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-17-32>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Noise immunity of QAM-OFDM signal reception using soft-decision demodulation in the presence of narrowband interference

Alexey A. Paramonov[@],
Chu Van Vuong

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 194454 Russia

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

Abstract

Objectives. The aim of this paper is to study the noise immunity of digital information transmission in systems with orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) and quadrature amplitude modulation (QAM) of subcarriers in the presence of narrowband interference. As a way of managing this interference, the paper studies the use of a demodulator with soft outputs and subsequent decoding of the convolutional code and low-density parity-check (LDPC) code used in the system.

Methods. The results presented in the article were obtained using statistical radio engineering, mathematical statistics, encoding theory, and computer modeling.

Results. The paper presents a simple method for calculating soft bit estimates in the M -point signal QAM demodulator, where M is an even power of two. A considerable amount of numerical results were obtained which show the dependence of the transmitted information bit error rate on M , as well as on the signal-to-noise ratio, signal-to-narrowband interference, and code rates.

Conclusions. It can be concluded from the above results that the use of encoding with soft demodulator decisions significantly improves the noise immunity of OFDM signal reception, and enables narrowband interference to be managed efficiently. LDPC encoding is superior to convolutional encoding in increasing the noise immunity of OFDM signal reception both in the absence and in the presence of narrowband interference. Along with the use in QAM-OFDM systems, the proposed simple method for demodulating QAM signals with soft decisions can be used in any wireless communication system using M -position QAM signals, where M is 2 to an even power.

Keywords: OFDM, soft decision, encoding, narrowband interference, noise immunity, bit error rate

• Submitted: 23.04.2024 • Revised: 19.06.2024 • Accepted: 05.08.2024

For citation: Paramonov A.A., Chu V.V. Noise immunity of QAM-OFDM signal reception using soft-decision demodulation in the presence of narrowband interference. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):17–32. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-17-32>

Financial disclosure: The authors have no financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В современных беспроводных коммуникационных сетях, для которых эффективность использования радиочастотного спектра играет решающую роль, широкое применение находят системы передачи данных на основе мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) [1–3] и квадратурной амплитудной модуляцией кратности M (quadrature amplitude modulation, M-QAM) [4–6]. Однако в условиях активного использования спектра и наличия многочисленных источников помех, в т.ч. и узкополосных [7, 8], актуальной проблемой становится обеспечение надежности передачи данных.

Цель настоящей статьи состоит в исследовании помехоустойчивости системы QAM-OFDM с кодированием при наличии узкополосных помех [9–11]. Методы декодирования при жестких решениях демодулятора часто неспособны эффективно компенсировать воздействие узкополосных помех, что существенно ухудшает качество приема. В данном контексте предлагается метод вынесения мягких решений демодулятором. Такой демодулятор может быть эффективно использован в совокупности с соответствующим декодером для улучшения помехоустойчивости приема. Предложенный алгоритм демодуляции с мягкими решениями имеет более низкую вычислительную сложность по сравнению с традиционными методами. Предлагаемый метод основан на анализе качества принимаемого сигнала, что позволяет динамически определять степень надежности каждого бита передаваемого сигнала. Это позволяет добиться большей эффективности процесса

декодирования, что заметно повышает помехоустойчивость системы при наличии узкополосных помех.

В статье описан предлагаемый метод демодуляции сигналов M-QAM с мягкими решениями, выполнено сравнение с существующими методами демодуляции и на основе результатов моделирования продемонстрирована эффективность предложенного метода. Показано, что за счет использования декодирования с мягкими решениями достигается заметное улучшение помехоустойчивости приема при наличии узкополосных помех.

СИСТЕМА OFDM И АЛГОРИТМ МЯГКОГО РЕШЕНИЯ

Рассматриваемая в статье система OFDM приведена на рис. 1.

На рис. 1а изображена структура передатчика OFDM. Битовый поток кодируется перед модуляцией. Будем считать, что в системе используется M -ичная квадратурная амплитудная модуляция. После выполнения обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) к сигналу OFDM добавляется защитный интервал для защиты принятого сигнала от межсимвольной интерференции. Затем сигнал передается в эфир.

На рис. 1б изображена структура приемника OFDM. Обработка сигнала в приемнике осуществляется в порядке, обратном порядку обработки в передатчике. Сначала выполняются временная синхронизация и разделение сигнала OFDM на символы OFDM. После удаления защитного интервала выполняется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Затем сигнал демодулируется и, наконец, декодируется для получения исходного потока данных.

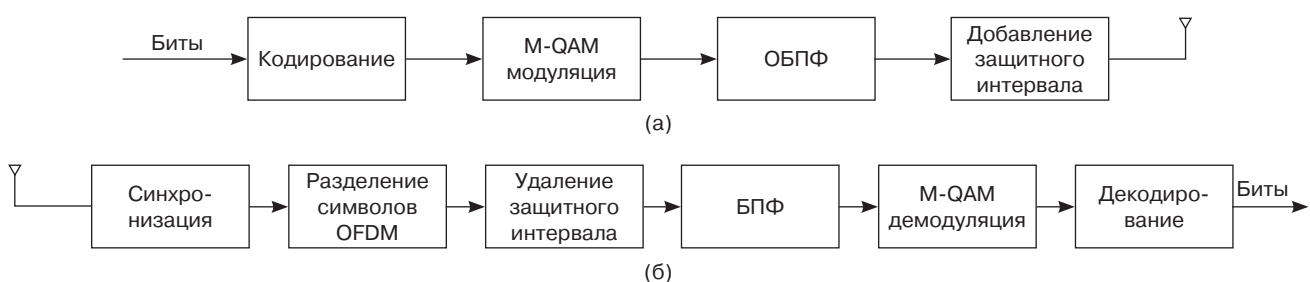


Рис. 1. Структура системы OFDM: (а) передатчик, (б) приемник

На каждой из ортогональных частот сигнала OFDM передается сигнал М-QAM $x(t)$ с длительностью символа, равной длительности символа сигнала OFDM. Полученный приемником сигнал $\tilde{x}(t)$ на этой частоте можно описать следующим образом:

$$\tilde{x}(t) = x(t) + w(t), \quad (1)$$

где $w(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум.

Алгоритм приема сигнала М-QAM целесообразно разрабатывать именно в такой постановке задачи. Включение в принимаемый сигнал $\tilde{x}(t)$ каких-либо аддитивных помех, кроме шумовой, означает, что система передачи информации обязательно должна работать на занятых помехами частотах. Более реальна другая картина: система передачи разрабатывается для работы на частотах, свободных от помех. Но в действительности помеха может появиться, и для этого случая помехоустойчивость системы передачи следует анализировать отдельно. Именно с этих позиций ниже проведено исследование помехоустойчивости приема сигнала QAM-OFDM в присутствии узкополосной помехи.

Здесь же целесообразно отметить особенность воздействия гармонической помехи на сигнал OFDM. В дальнейших формулах, относящихся к гармонической помехе, принято, что сигнал OFDM перенесен на нулевую частоту. Как видно из рис. 1, принятое колебание $\tilde{x}(t)$ подвергается процедуре БПФ, выполняемой в цифровой форме. Если в этом колебании содержится гармоническая помеха в области некоторой поднесущей, то она может быть записана как последовательность временных отсчетов:

$$g(n) = A_g e^{j(2\pi f_g n T_s + \theta)},$$

где A_g – амплитуда узкополосной помехи; f_g – частота узкополосной помехи; T_s – интервал дискретизации, равный длительности символа; θ – случайно распределенная фаза, $\theta \in (-\pi; \pi]$.

Частота узкополосной помехи необязательно совпадает с поднесущей и определяется как

$$f_g = \frac{m + \alpha}{N} f_s, \quad 0 \leq m \leq N - 1, \quad -0.5 \leq \alpha \leq 0.5,$$

где f_s – разнос частот между поднесущими; m – номер поднесущей, ближайшей к помехе; N – количество поднесущих в сигнале OFDM (и размерность БПФ при приеме).

Подставляя это значение f_g в формулу для гармонической помехи и используя тот факт, что $f_s = \frac{1}{T_s}$, получаем:

$$g(n) = A_g e^{j\left(\frac{2\pi}{N}(m + \alpha)n + \theta\right)}.$$

Если в этой формуле $\alpha = 0$, частота помехи совпадает с частотой поднесущей и эта помеха ортогональна другим поднесущим. Если же $\alpha \neq 0$, то частота помехи не совпадает с частотой поднесущей и с остальными поднесущими не ортогональна.

Выражение для спектра узкополосных помех после выполнения БПФ будет записано следующим образом:

$$G(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(n) e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} = \frac{A_g}{N} e^{j\theta} \frac{1 - e^{j2\pi\alpha}}{1 - e^{j\frac{2\pi}{N}(m-k+\alpha)}}.$$

Если узкополосная помеха ортогональна ($\alpha = 0$), то после БПФ она имеет вид:

$$G(k) = \begin{cases} A_g e^{j\theta}, & k = m, \\ 0, & k \neq m. \end{cases}$$

Таким образом, узкополосная помеха, совпадающая по частоте с некоторой m -й поднесущей, не попадает на частоты остальных поднесущих. Если же $\alpha \neq 0$, т.е. узкополосная помеха не ортогональна остальным поднесущим, то мощность этой помехи распределяется по всем поднесущим, т.е. происходит утечка спектра помехи. Мощность узкополосной помехи, просочившейся за счет неортогональности на некоторую k -ю поднесущую, определяется следующим выражением [7]:

$$\sigma_{G,k}^2 = E[|G_k|^2] = \frac{A_g^2}{N^2} \cdot \frac{1 - \cos(2\pi\alpha)}{1 - \cos\frac{2\pi}{N}(m-k+\alpha)}.$$

Вернемся к соотношению (1). Входящие в него составляющие можно представить как сигнальные точки в некотором сигнальном пространстве:

$$\tilde{X} = X + W. \quad (2)$$

Условная плотность вероятности принятого сигнала $\tilde{X}$ при условии, что передавался сигнал X :

$$f(\tilde{X} | X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left(-\frac{|\tilde{X}-X|^2}{2\sigma^2}\right)}. \quad (3)$$

Здесь σ^2 – дисперсия распределения (3).

Каждый из M -ичных символов сигнала М-QAM переносит $\log_2 M$ битов информации. Например, для 16-QAM эти биты – b_0, b_1, b_2, b_3 . Под мягким решением для некоторого i -го бита будем понимать логарифм отношения правдоподобия, определяемый для априори равновероятных битов как [12–18]:

$$\begin{aligned}
 l(b_i) &= \ln \frac{\sum_{X \in S_i^-} f(X | \tilde{X})}{\sum_{X \in S_i^+} f(X | \tilde{X})} \approx \\
 &\approx \ln \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|\tilde{X} - X_{i,\text{opt}}^-|^2}{2\sigma^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|\tilde{X} - X_{i,\text{opt}}^+|^2}{2\sigma^2}}} = \\
 &= \frac{1}{2\sigma^2} (|\tilde{X} - X_{i,\text{opt}}^-|^2 - |\tilde{X} - X_{i,\text{opt}}^+|^2),
 \end{aligned} \quad (4)$$

где S_i^+ и S_i^- обозначают наборы символов, i -е биты которых равны 1 и 0 соответственно.

В выражении (4) $X_{i,\text{opt}}^+$ и $X_{i,\text{opt}}^-$ – ближайшие к принятому колебанию $\tilde{X}$ сигналы X , i -е биты которых равны 1 и 0 соответственно:

$$\begin{aligned}
 X_{i,\text{opt}}^+ &= \arg \min_{X \in S_i^+} |\tilde{X} - X|^2, \\
 X_{i,\text{opt}}^- &= \arg \min_{X \in S_i^-} |\tilde{X} - X|^2.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Нахождение мягких решений по выражениям (4) и (5) достаточно трудоемко. Сложность вычислений существенно возрастает при увеличении уровня модуляции M . В следующем разделе рассмотрены заметно более простые алгоритмы определения мягких решений для сигналов QAM, у которых M представляет собой 2 в четной степени. Детально рассмотрены алгоритмы для 16-QAM, 64-QAM и 256-QAM.

ПРОСТЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЯГКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ДЕМОДУЛЯЦИИ M-QAM

На рис. 2 изображены созвездия 16-QAM, 64-QAM и 256-QAM. Около каждой сигнальной точки расположено десятичное число, которое, будучи переведенным в двоичную форму, показывает набор передаваемых двоичных символов (далее – битов), соответствующих этой сигнальной точке. Например, для сигнала 16-QAM точке, обозначенной номером 6, соответствует набор передаваемых битов 0, 1, 1, 0.

Сначала рассмотрим демодуляцию сигнала 16-QAM. Каждой точке сигнального созвездия соответствуют 4 передаваемых бита b_0, b_1, b_2, b_3 . Проекция сигнальных точек на синфазную и квадратурную оси для разных сочетаний передаваемых битов приведены в табл. 1.

Предлагаемый упрощенный алгоритм вычисления логарифма отношения правдоподобия объясняется с помощью рис. 3. Пусть принимается некоторый

символ сигнала 16-QAM, который отображается синим кружочком на IQ-диаграмме: $\tilde{X}_i = \Re(\tilde{X}_i) + j\Im(\tilde{X}_i)$, где $\Re(\tilde{X}_i)$, $\Im(\tilde{X}_i)$ – действительная и мнимая части колебания $\tilde{X}$.

Проекции сигнальных точек передаваемого сигнала 16-QAM на оси I и Q обозначены красными кружочками.

Таблица 1. Проекция сигнальных точек сигнала 16-QAM на оси I и Q

b_0b_1	I	b_2b_3	Q
00	–3	00	3
01	–1	01	1
11	+1	11	–1
10	+3	10	–3

Обратим внимание на то, что значение бита b_0 влияет только на проекцию сигнальной точки на ось I и не влияет на проекцию на ось Q . Это хорошо видно на рис. 3а. Когда $b_0 = 0$, действительная часть сигнала 16-QAM принимает значение –1 или –3. Когда $b_0 = 1$, действительная часть сигнала равна +1 или +3.

Процесс вынесения мягкого решения о первом бите b_0 проиллюстрирован на рис. 4, представляющей собой нижнюю часть рис. 3а.

Условная вероятность принятого колебания $\tilde{X}_i$ при $b_0 = 0$ равна:

$$\begin{aligned}
 P(\tilde{X}_i | b_0 = 0) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\Re(\tilde{X}_i) + 3)^2}{2\sigma^2}} + \\
 &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\Re(\tilde{X}_i) + 1)^2}{2\sigma^2}}.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Условная вероятность принятого колебания $\tilde{X}$ при $b_0 = 1$ равна:

$$\begin{aligned}
 P(\tilde{X}_i | b_0 = 1) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\Re(\tilde{X}_i) - 3)^2}{2\sigma^2}} + \\
 &+ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(\Re(\tilde{X}_i) - 1)^2}{2\sigma^2}}.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Отношение правдоподобия описывается выражением:

$$\frac{P(\tilde{X}_i | b_0 = 0)}{P(\tilde{X}_i | b_0 = 1)} = \frac{e^{-\frac{(\Re(\tilde{X}_i) + 1)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(\Re(\tilde{X}_i) + 3)^2}{2\sigma^2}}}{e^{-\frac{(\Re(\tilde{X}_i) - 1)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(\Re(\tilde{X}_i) - 3)^2}{2\sigma^2}}}. \quad (8)$$

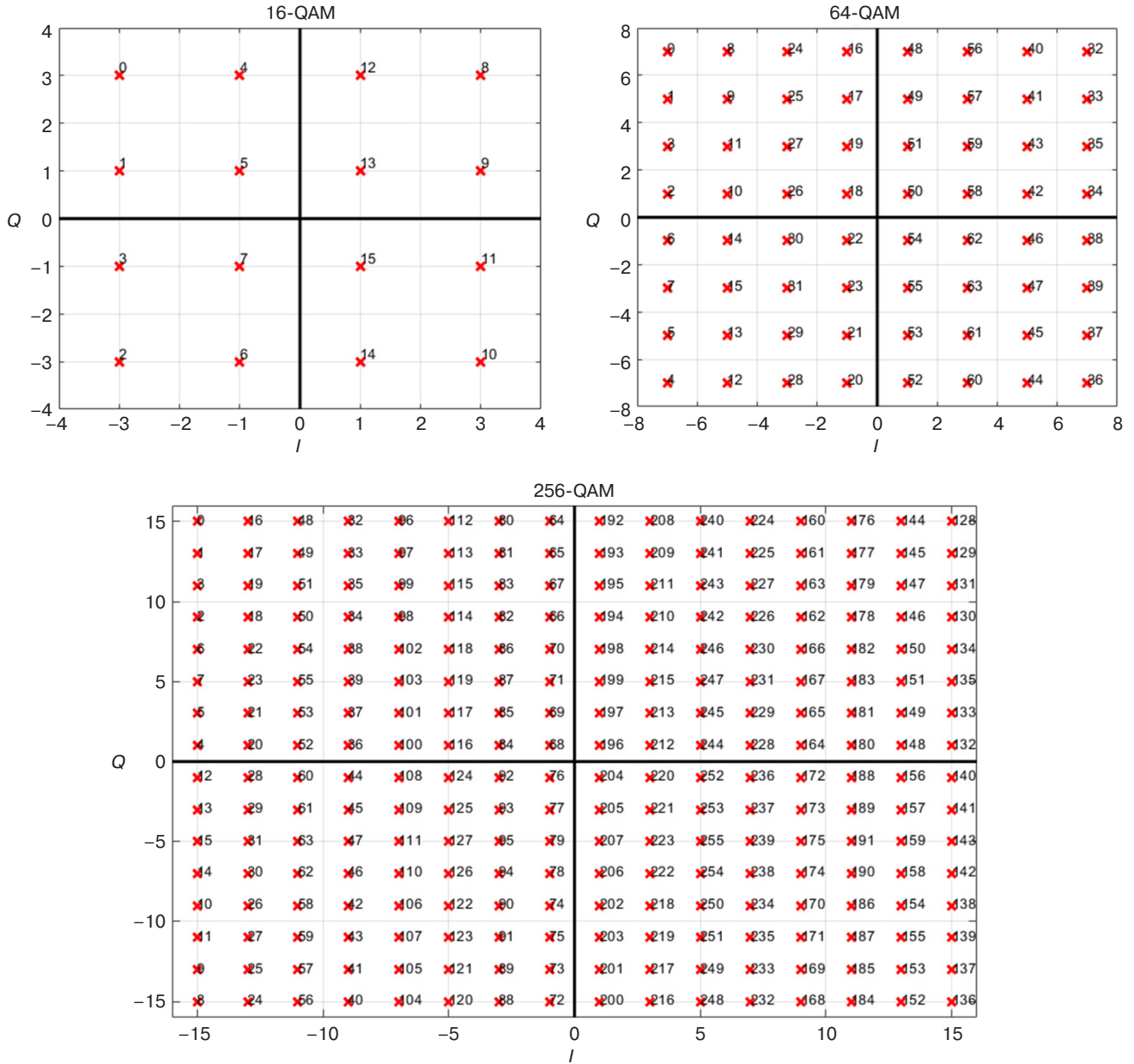


Рис. 2. Созвездия M-QAM

Пользоваться выражением (8) неудобно, т.к. это требует вычисления экспонент. Однако его можно упростить, учитывая, что на практике обычно оказывается, что проекция принятого колебания располагается ближе к одной из двух возможных сигнальных точек, соответствующих определенному решению. Например, на рис. 4 проекция принятого колебания оказалась ближе к значению -1 , а не к -3 , по которым принимается решение о символе $b_0 = 0$. Учитывая то, что в выражение (8) входят экспоненты квадратов разностей проекций, можно считать, что первое слагаемое в знаменателе (8) существенно больше, чем второе, поэтому второй экспонентой можно пренебречь. Аналогичные рассуждения

справедливы и для оценки числителя (8). Следовательно, логарифм отношения правдоподобия при величине $\tilde{X}_i$, отраженной синим кружочком, можно достаточно точно рассчитать с помощью выражения

$$l(b_0, \tilde{X}_i) \approx \frac{1}{2\sigma^2} ((\Re(\tilde{X}_i) - 1)^2 - (\Re(\tilde{X}_i) + 1)^2) = -\frac{2}{\sigma^2} \Re(\tilde{X}_i). \quad (9)$$

При вынесении решения о бите b_1 следует обратиться к рис. 3б. Нижняя часть этого рисунка показана на рис. 5. Как и в предыдущем случае, значение

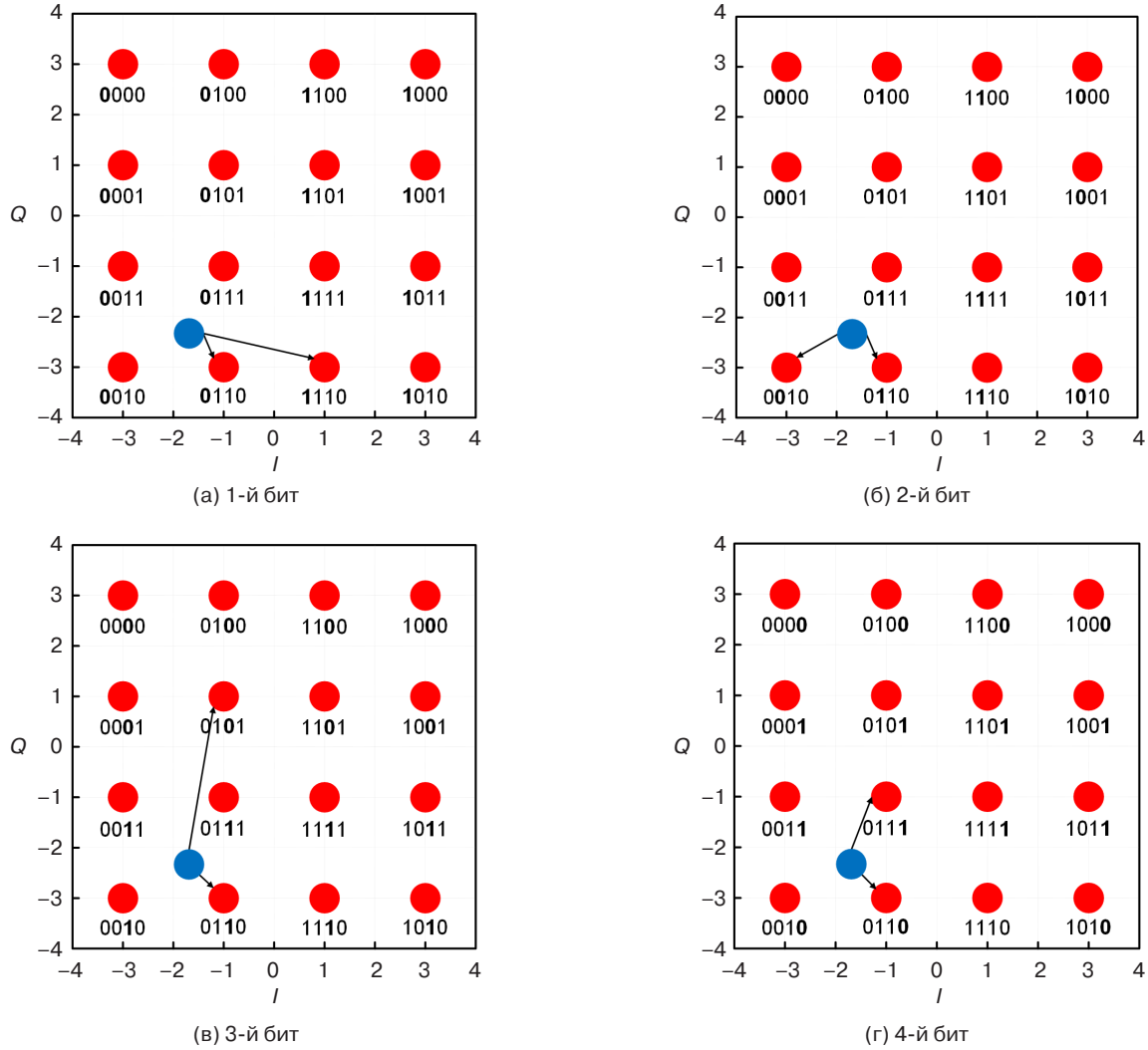


Рис. 3. Пример вычисления логарифмов отношений правдоподобия для каждого бита сигнала 16-QAM

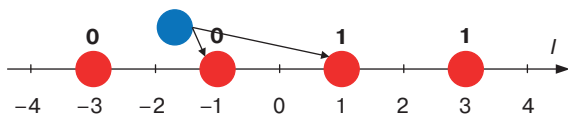


Рис. 4. Вычисление логарифма отношения правдоподобия для первого бита

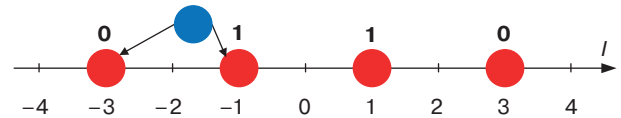


Рис. 5. Вычисление логарифма отношения правдоподобия для второго бита

бита b_0 влияет только на проекцию сигнальной точки на ось I и не влияет на проекцию на ось Q . Когда значение b_1 равно 0, действительная часть сигнала 16-QAM принимает значение -3 . Когда $b_1 = 1$, действительная часть сигнала принимает значение -1 , как показано на рис. 5.

Отношение правдоподобия для второго бита b_1 принятого колебания $\tilde{X}$ равно:

$$\begin{aligned} l(b_1, \tilde{X}_i) &\approx \frac{1}{2\sigma^2} ((\Re(\tilde{X}_i) + 1)^2 - (\Re(\tilde{X}_i) + 3)^2) = \\ &= -\frac{2}{\sigma^2} (\Re(\tilde{X}_i) + 2). \end{aligned} \quad (10)$$

В зависимости от значения бита b_2 у сигналов 16-QAM меняются только проекции сигнальной точки на ось Q (рис. 3в). Когда значение $b_2 = 0$, мнимая часть сигнала 16-QAM принимает значение 1. Когда $b_2 = 1$, мнимая часть сигнала принимает значение -3 , как показано на рис. 6.

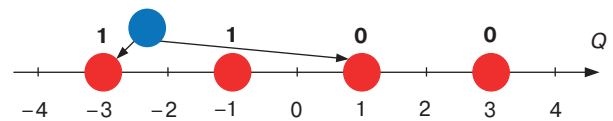


Рис. 6. Вычисление логарифма отношения правдоподобия для третьего бита

Логарифм отношения правдоподобия для b_2 принятого колебания $\tilde{X}$ равен:

$$\begin{aligned} l(b_2, \tilde{X}_i) &\approx \frac{1}{2\sigma^2} ((\Im(\tilde{X}_i) + 3)^2 - (\Im(\tilde{X}_i) - 1)^2) = \\ &= \frac{2}{\sigma^2} (\Im(\tilde{X}_i) + 1). \end{aligned} \quad (11)$$

Как следует из рис. 3г, значение b_3 влияет только на проекцию сигнальной точки на ось Q . Если $b_3 = 0$, то эта проекция принимает значение -3 . Если $b_3 = 1$, эта проекция принимает значение -1 , как показано на рис. 7.

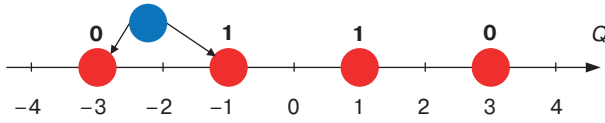


Рис. 7. Вычисление логарифма отношения правдоподобия для четвертого бита

Отношение правдоподобия для четвертого бита b_3 принятого колебания $\tilde{X}$:

$$\begin{aligned} l(b_3, \tilde{X}_i) &\approx \frac{1}{2\sigma^2} ((\Re(\tilde{X}_i) + 1)^2 - (\Re(\tilde{X}_i) + 3)^2) = \\ &= -\frac{2}{\sigma^2} (\Re(\tilde{X}_i) + 2). \end{aligned} \quad (12)$$

Ранее была детально рассмотрена процедура вынесения мягких решений на конкретном примере входного колебания $\tilde{X}_i$, изображенного в виде синего кружка на рис. 3. Рассмотрев аналогичным образом все возможные положения входного колебания, получим:

$$l(b_0, \tilde{X}_i) = \begin{cases} -\frac{2}{\sigma^2} [\Re(\tilde{X}_i) + 1], & \Re(\tilde{X}_i) < -2, \\ -\frac{2}{\sigma^2} \Re(\tilde{X}_i), & -2 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 0, \\ -\frac{2}{\sigma^2} \Re(\tilde{X}_i), & 0 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 2, \\ -\frac{2}{\sigma^2} [\Re(\tilde{X}_i) - 1], & 2 \leq \Re(\tilde{X}_i), \end{cases} \quad (13)$$

$$l(b_1, \tilde{X}_i) = \frac{2}{\sigma^2} [\Re(\tilde{X}_i) - 2] \quad \forall \Re(\tilde{X}_i), \quad (14)$$

$$l(b_2, \tilde{X}_i) = \begin{cases} \frac{2}{\sigma^2} [\Im(\tilde{X}_i) + 1], & \Im(\tilde{X}_i) < -2, \\ \frac{2}{\sigma^2} \Im(\tilde{X}_i), & -2 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 0, \\ \frac{2}{\sigma^2} \Im(\tilde{X}_i), & 0 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 2, \\ \frac{2}{\sigma^2} [\Im(\tilde{X}_i) - 1], & 2 \leq \Im(\tilde{X}_i), \end{cases} \quad (15)$$

$$l(b_3, \tilde{X}_i) = \frac{2}{\sigma^2} [\Im(\tilde{X}_i) - 2] \quad \forall \Im(\tilde{X}_i). \quad (16)$$

Подобно тому, как был рассмотрен процесс вынесения мягких решений для сигнала 16-QAM, можно рассмотреть процесс демодуляции сигналов 64-QAM. На рис. 8, аналогичном рис. 3, приведены сигнальное созвездие этого сигнала, принятое колебание и ближайшие к принятому колебанию сигнальные точки, соответствующие значениям 0 и 1 для каждого из шести битов $b_0 b_1 b_2 b_3 b_4 b_5$, заключающихся в одном символе сигнала 64-QAM.

Из рис. 8 видно, что первые три бита $b_0 b_1 b_2$ влияют только на действительную часть сигнала, т.е. они определяют проекцию сигнала на ось I . Остальные три бита $b_3 b_4 b_5$ влияют только на его мнимую часть, т.е. определяют проекцию на ось Q . По этим проекциям можно однозначно определить логарифмы отношений правдоподобия для всех шести битов. Соответствующие формулы приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Значения $l(b_k, \tilde{X}_i)$ для $k = 0, 1, 2$ для сигнала 64-QAM

Значения $\Re(\tilde{X}_i)$	$l(b_0, \tilde{X}_i)$	$l(b_1, \tilde{X}_i)$	$l(b_2, \tilde{X}_i)$
$\Re(\tilde{X}_i) < -6$	$-8[\Re(\tilde{X}_i) + 3]$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) + 5]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 6]$
$-6 \leq \Re(\tilde{X}_i) < -4$	$-6[\Re(\tilde{X}_i) + 2]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 4]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 6]$
$-4 \leq \Re(\tilde{X}_i) < -2$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) + 1]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 4]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) + 2]$
$-2 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 0$	$-2\Re(\tilde{X}_i)$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) + 3]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) + 2]$
$0 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 2$	$-2\Re(\tilde{X}_i)$	$4[\Re(\tilde{X}_i) - 3]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) - 2]$
$2 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 4$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) - 1]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 4]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) - 2]$
$4 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 6$	$-6[\Re(\tilde{X}_i) - 2]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 4]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 6]$
$\Re(\tilde{X}_i) \geq 6$	$-8[\Re(\tilde{X}_i) - 3]$	$4[\Re(\tilde{X}_i) - 5]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 6]$

Таблица 3. Значения $l(b_k, \tilde{X}_i)$ для $k = 3, 4, 5$ для сигнала 64-QAM

Значения $\Im(\tilde{X}_i)$	$l(b_3, \tilde{X}_i)$	$l(b_4, \tilde{X}_i)$	$l(b_5, \tilde{X}_i)$
$\Im(\tilde{X}_i) < -6$	$8[\Im(\tilde{X}_i) + 3]$	$-4[\Im(\tilde{X}_i) + 5]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 6]$
$-6 \leq \Im(\tilde{X}_i) < -4$	$6[\Im(\tilde{X}_i) + 2]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 4]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 6]$
$-4 \leq \Im(\tilde{X}_i) < -2$	$4[\Im(\tilde{X}_i) + 1]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 4]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) + 2]$
$-2 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 0$	$2\Im(\tilde{X}_i)$	$-4[\Im(\tilde{X}_i) + 3]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) + 2]$
$0 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 2$	$2\Im(\tilde{X}_i)$	$4[\Im(\tilde{X}_i) - 3]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) - 2]$
$2 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 4$	$4[\Im(\tilde{X}_i) - 1]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 4]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) - 2]$
$4 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 6$	$6[\Im(\tilde{X}_i) - 2]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 4]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 6]$
$\Im(\tilde{X}_i) \geq 6$	$8[\Im(\tilde{X}_i) - 3]$	$4[\Im(\tilde{X}_i) - 5]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 6]$

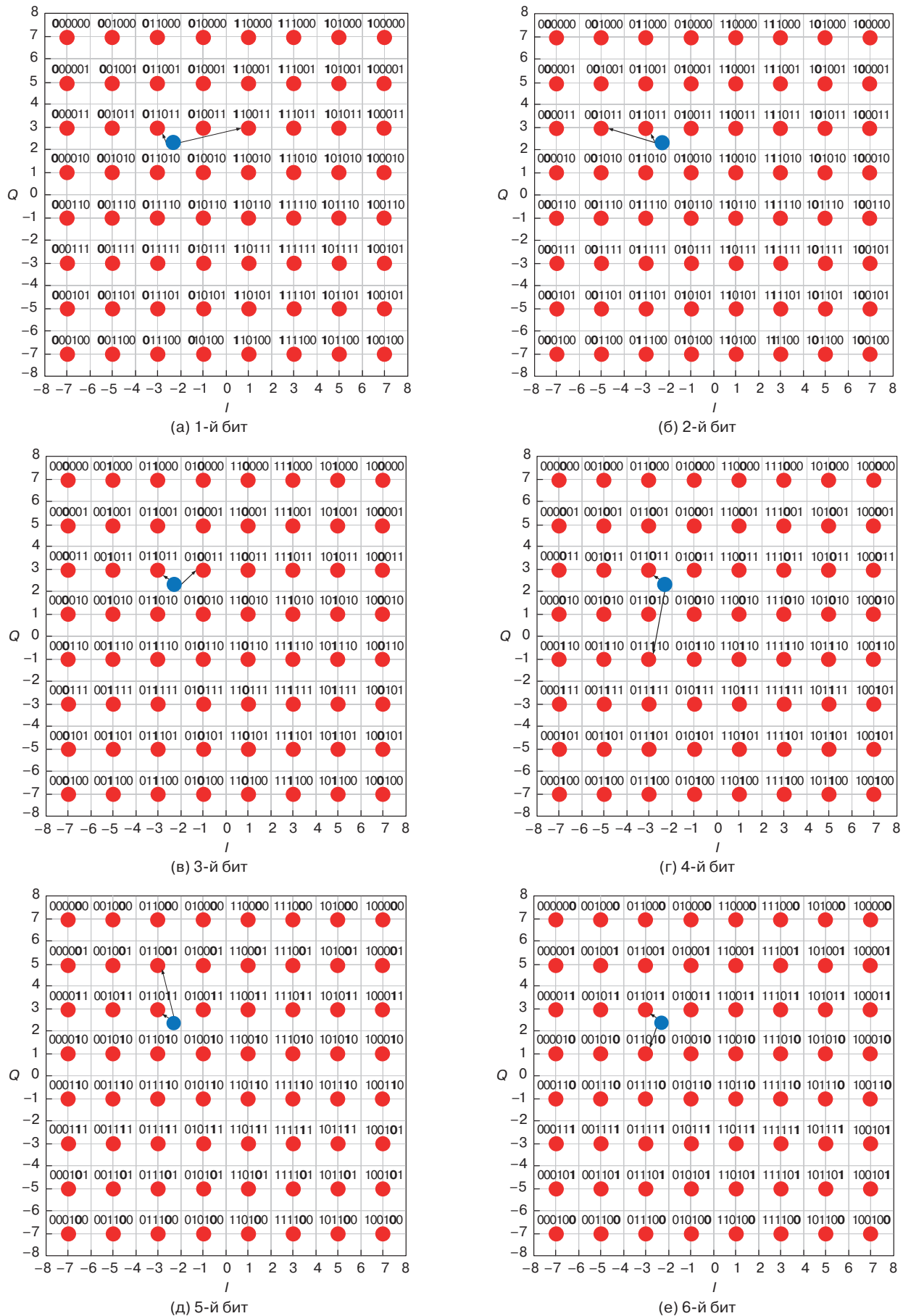


Рис. 8. Пример вычисления логарифмов отношений правдоподобия для каждого бита сигнала 64-QAM

При модуляции 256-QAM каждая точка этого созвездия соответствует восьми битам передаваемой информации: $b_0b_1b_2b_3b_4b_5b_6b_7$. Рассмотрев внимательно это созвездие, можно увидеть, что первые четыре бита $b_0b_1b_2b_3$ влияют только на действительную часть

сигнала, т.е. на проекции сигнала на ось I . Остальные четыре бита $b_4b_5b_6b_7$ определяют только мнимую часть сигнала, т.е. проекции сигнала на ось Q . Результаты вычисления логарифмов отношений правдоподобия для всех восьми битов приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4. Значения $l(b_k, \tilde{X}_i)$ для $k = 0, 1, 2, 3$ для сигнала 256-QAM

Значения $\Re(\tilde{X}_i)$	$l(b_0, \tilde{X}_i)$	$l(b_1, \tilde{X}_i)$	$l(b_2, \tilde{X}_i)$	$l(b_3, \tilde{X}_i)$
$\Re(\tilde{X}_i) \leq -14$	$-16[\Re(\tilde{X}_i) + 7]$	$-8[\Re(\tilde{X}_i) + 11]$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) + 13]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 14]$
$-14 \leq \Re(\tilde{X}_i) < -12$	$-14[\Re(\tilde{X}_i) + 6]$	$-6[\Re(\tilde{X}_i) + 10]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 12]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 14]$
$-12 \leq \Re(\tilde{X}_i) < -10$	$-12[\Re(\tilde{X}_i) + 5]$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) + 9]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 12]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) + 10]$
$-10 \leq \Re(\tilde{X}_i) < -8$	$-10[\Re(\tilde{X}_i) + 4]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 8]$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) + 11]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) + 10]$
$-8 \leq \Re(\tilde{X}_i) < -6$	$-8[\Re(\tilde{X}_i) + 3]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 8]$	$4[\Re(\tilde{X}_i) + 5]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 6]$
$-6 \leq \Re(\tilde{X}_i) < -4$	$-6[\Re(\tilde{X}_i) + 2]$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) + 7]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) + 4]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) + 6]$
$-4 \leq \Re(\tilde{X}_i) < -2$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) + 1]$	$-6[\Re(\tilde{X}_i) + 6]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) + 4]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) + 2]$
$-2 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 0$	$-2\Re(\tilde{X}_i)$	$-8[\Re(\tilde{X}_i) + 5]$	$4[\Re(\tilde{X}_i) + 3]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) + 2]$
$0 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 2$	$-2\Re(\tilde{X}_i)$	$8[\Re(\tilde{X}_i) - 5]$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) - 3]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) - 2]$
$2 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 4$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) - 1]$	$6[\Re(\tilde{X}_i) - 6]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) - 4]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) - 2]$
$4 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 6$	$-6[\Re(\tilde{X}_i) - 2]$	$4[\Re(\tilde{X}_i) - 7]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) - 4]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 6]$
$6 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 8$	$-8[\Re(\tilde{X}_i) - 3]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 8]$	$-4[\Re(\tilde{X}_i) - 5]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 6]$
$8 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 10$	$-10[\Re(\tilde{X}_i) - 4]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 8]$	$4[\Re(\tilde{X}_i) - 11]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) - 10]$
$10 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 12$	$-12[\Re(\tilde{X}_i) - 5]$	$4[\Re(\tilde{X}_i) - 9]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 12]$	$-2[\Re(\tilde{X}_i) - 10]$
$12 \leq \Re(\tilde{X}_i) < 14$	$-14[\Re(\tilde{X}_i) - 6]$	$6[\Re(\tilde{X}_i) - 10]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 12]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 14]$
$\Re(\tilde{X}_i) \geq 14$	$-16[\Re(\tilde{X}_i) - 7]$	$8[\Re(\tilde{X}_i) - 11]$	$4[\Re(\tilde{X}_i) - 13]$	$2[\Re(\tilde{X}_i) - 14]$

Таблица 5. Значения $l(b_k, \tilde{X}_i)$ для $k = 4, 5, 6, 7$ для сигнала 256-QAM

Значения $\Im(\tilde{X}_i)$	$l(b_4, \tilde{X}_i)$	$l(b_5, \tilde{X}_i)$	$l(b_6, \tilde{X}_i)$	$l(b_7, \tilde{X}_i)$
$\Im(\tilde{X}_i) \leq -14$	$16[\Im(\tilde{X}_i) + 7]$	$-8[\Im(\tilde{X}_i) + 11]$	$-4[\Im(\tilde{X}_i) + 13]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 14]$
$-14 \leq \Im(\tilde{X}_i) < -12$	$14[\Im(\tilde{X}_i) + 6]$	$-6[\Im(\tilde{X}_i) + 10]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 12]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 14]$
$-12 \leq \Im(\tilde{X}_i) < -10$	$12[\Im(\tilde{X}_i) + 5]$	$-4[\Im(\tilde{X}_i) + 9]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 12]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) + 10]$
$-10 \leq \Im(\tilde{X}_i) < -8$	$10[\Im(\tilde{X}_i) + 4]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 8]$	$-4[\Im(\tilde{X}_i) + 11]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) + 10]$
$-8 \leq \Im(\tilde{X}_i) < -6$	$8[\Im(\tilde{X}_i) + 3]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 8]$	$4[\Im(\tilde{X}_i) + 5]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 6]$
$-6 \leq \Im(\tilde{X}_i) < -4$	$6[\Im(\tilde{X}_i) + 2]$	$-4[\Im(\tilde{X}_i) + 7]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) + 4]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) + 6]$
$-4 \leq \Im(\tilde{X}_i) < -2$	$4[\Im(\tilde{X}_i) + 1]$	$-6[\Im(\tilde{X}_i) + 6]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) + 4]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) + 2]$
$-2 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 0$	$2\Im(\tilde{X}_i)$	$-8[\Im(\tilde{X}_i) + 5]$	$4[\Im(\tilde{X}_i) + 3]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) + 2]$
$0 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 2$	$2\Im(\tilde{X}_i)$	$8[\Im(\tilde{X}_i) - 5]$	$-4[\Im(\tilde{X}_i) - 3]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) - 2]$
$2 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 4$	$4[\Im(\tilde{X}_i) - 1]$	$6[\Im(\tilde{X}_i) - 6]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) - 4]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) - 2]$
$4 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 6$	$6[\Im(\tilde{X}_i) - 2]$	$4[\Im(\tilde{X}_i) - 7]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) - 4]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 6]$
$6 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 8$	$8[\Im(\tilde{X}_i) - 3]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 8]$	$-4[\Im(\tilde{X}_i) - 5]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 6]$
$8 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 10$	$10[\Im(\tilde{X}_i) - 4]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 8]$	$4[\Im(\tilde{X}_i) - 11]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) - 10]$
$10 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 12$	$12[\Im(\tilde{X}_i) - 5]$	$4[\Im(\tilde{X}_i) - 9]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 12]$	$-2[\Im(\tilde{X}_i) - 10]$
$12 \leq \Im(\tilde{X}_i) < 14$	$14[\Im(\tilde{X}_i) - 6]$	$6[\Im(\tilde{X}_i) - 10]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 12]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 14]$
$\Im(\tilde{X}_i) \geq 14$	$16[\Im(\tilde{X}_i) - 7]$	$8[\Im(\tilde{X}_i) - 11]$	$4[\Im(\tilde{X}_i) - 13]$	$2[\Im(\tilde{X}_i) - 14]$

В табл. 2–5 приведены формулы для вычисления небольшого количества логарифмов отношений правдоподобия, достаточного для упрощенного алгоритма вынесения решения по каждому из битов, определяющих любую сигнальную точку созвездия QAM. Формулы доведены до вида, удобного для их практического использования. Предложенный алгоритм требует значительно меньшего количества вычислений, чем алгоритм максимального правдоподобия, предусматривающий вычисление логарифмов отношений правдоподобия для всех возможных сочетаний битов.

Алгоритм вынесения мягких решений разработан для каналов с белым гауссовским шумом. Эффективность этого алгоритма для приема сигналов OFDM при наличии узкополосных помех с использованием кодирования с мягким решением требует отдельного анализа. Эти вопросы рассматриваются в следующем разделе.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА СИГНАЛОВ QAM-OFDM

Ниже приведены результаты исследования помехоустойчивости приема сигналов QAM-OFDM в присутствии шумовой помехи или смеси шумовой и узкополосной помех. Исследована эффективность применения кодирования для борьбы с узкополосной помехой, причем мягкие решения демодуляторов получались с помощью описанных выше алгоритмов.

Моделирование системы OFDM проводилось с использованием инструмента *MATLAB*¹. Количество точек БПФ при формировании сигнала OFDM составляло 128, длина защитного интервала – 32, методы модуляции поднесущих – 16-QAM, 64-QAM и 256-QAM.

Остановимся на моделировании сигнала и помех. Согласно рис. 2 комплексные огибающие сигналов представляются числами $(a + jb)$, где $a, b \in \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(\sqrt{M} - 1)\}$. При этом средняя мощность сигнала оказывается зависящей от кратности модуляции M . Для того чтобы получить сравнимые результаты моделирования при разных кратностях модуляции, при моделировании нужно в представление сигнала ввести некоторый коэффициент l , зависящий от M . Тогда комплексные огибающие сигналов будут представляться числами

$$l(a + jb), \text{ где } a, b \in \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(\sqrt{M} - 1)\}.$$

Коэффициент l нужно выбрать так, чтобы энергия сигнала, приходящаяся на один передаваемый

символ E_s , не зависела от кратности модуляции M . Средняя энергия одного символа сигнала M-QAM длительностью T_s составит

$$E_s = \frac{T_s}{M} \sum_{i=1}^M \frac{l^2(a_i^2 + b_i^2)}{2}.$$

Для определенности при моделировании принято $E_s = 1$ и $T_s = 1$, а необходимое отношение сигнал/шум обеспечивается выбором дисперсии шума. Тогда

$$1 = \frac{l^2}{M} \sum_{i=1}^M \frac{(a_i^2 + b_i^2)}{2}.$$

Из этого соотношения следует, что для сигнала 16-QAM $l = \frac{1}{\sqrt{5}}$, для сигнала 64-QAM $l = \frac{1}{\sqrt{21}}$, а для сигнала 256-QAM $l = \frac{1}{\sqrt{85}}$.

На один бит передаваемой информации приходится энергия:

$$E_b = E_s / \log_2 M = \frac{1}{\log_2 M}.$$

В системе OFDM поднесущие располагаются на частотной оси на расстоянии $\frac{1}{T_s}$ друг от друга. Дисперсия шума в этой полосе будет $\sigma_n^2 = \frac{N_0}{T_s} = N_0$ (N_0 – односторонняя спектральная плотность шума).

Отношение сигнал/шум, понимаемое как отношение средней энергии сигнала, приходящейся на бит передаваемой информации, к спектральной плотности шума:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{\sigma_n^2 \log_2 M}.$$

Отсюда получается:

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{\frac{E_b}{N_0} \log_2 M}.$$

Это значит, что, поскольку принято предположение о том, что для всех видов модуляции M-QAM энергия сигнала равна единице, для получения нужного отношения сигнал/шум $\frac{E_b}{N_0}$ необходимо моделировать гауссовский шум с дисперсией

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{\frac{E_b}{N_0} \log_2 M}.$$

¹ <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Дата обращения 31.03.2024. / Accessed March 31, 2024.

На рис. 9–11 приведены зависимости вероятности ошибки P_{eb} на бит передаваемой информации от отношения сигнал/шум, приходящегося на бит передаваемой информации, для модуляции 16-QAM, 64-QAM и 256-QAM. Моделирование проводилось для канала с белым гауссовским шумом при отсутствии и при наличии узкополосной помехи для отношения сигнал/узкополосная помеха (signal to interference ratio, SIR), равного 0 дБ по мощности. Исследовались методы передачи без кодирования, с LDPC-кодированием² [19], а также со сверточным кодированием при мягких и жестких решениях демодулятора. Скорость кодов (R) составляла 1/2 для всех видов кодирования.

Сверточный код, рассматривавшийся при этом, строился на основе порождающих полиномов $G_1(X) = 1 + X + X^2 + X^3 + X^4$ и $G_2(X) = 1 + X + X^3 + X^4$. При декодировании этого кода использовался алгоритм Витерби. Ниже рассматривается также использование сверточного кода со скоростью 3/4. Этот код получался из кода со скоростью 1/2 путем выкалывания каждого третьего выходного бита в соответствии с шаблоном $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$.

При LDPC-кодировании со скоростью 1/2 длина кодового слова составляла 648 битов, из них информационных – 324. Мягкое декодирование выполнялось в соответствии с алгоритмом Belief propagation (или суммы произведений).

На каждом из этих рисунков видно, что при использовании кодирования вероятность битовой ошибки P_{eb} значительно снижается по сравнению со случаем отсутствия кодирования.

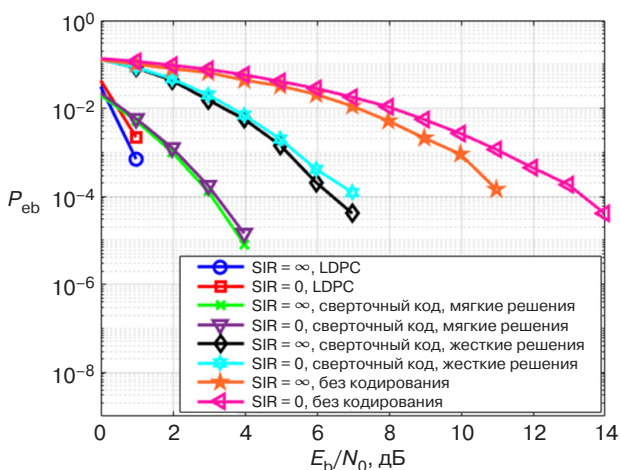


Рис. 9. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для системы OFDM с модуляцией 16-QAM и различными типами кодирования

² Low-density parity-check code – код с малой плотностью проверок на четность.

Из рис. 9 видно, что при наличии узкополосных помех и для $P_{eb} = 10^{-3}$ кодирование LDPC дает на 10 дБ лучшие результаты, чем без кодирования. Кодирование LDPC дает лучшие результаты, чем сверточное кодирование с жестким решением, на 4 дБ. Кодирование LDPC дает лучшие результаты, чем сверточное кодирование с мягким решением, на 1 дБ.

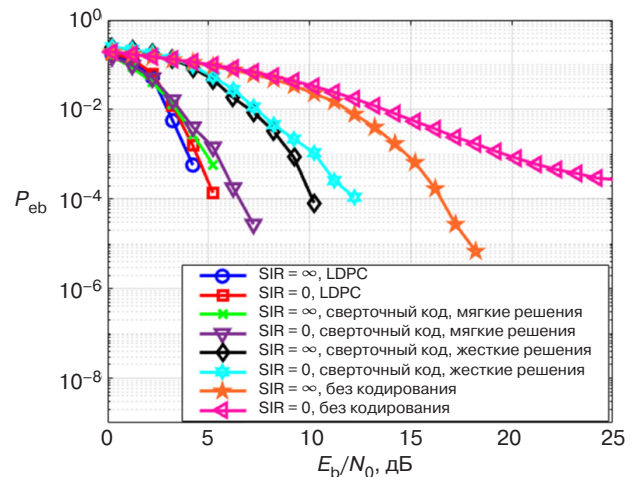


Рис. 10. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для системы OFDM с модуляцией 64-QAM и различными типами кодирования

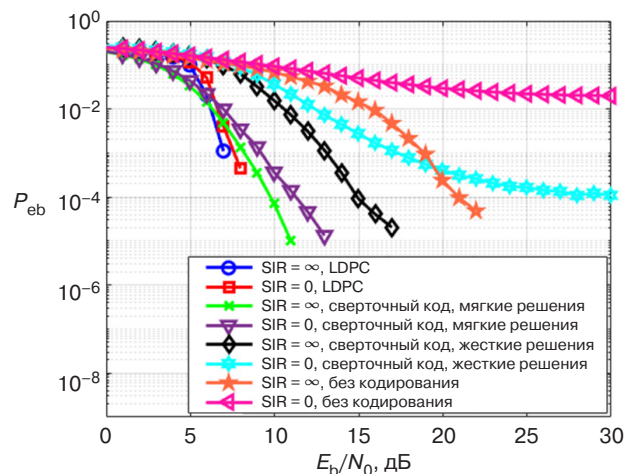


Рис. 11. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 системы OFDM с модуляцией 256-QAM и различными типами кодирования

Из рис. 10 следует, что при наличии узкополосных помех и для $P_{eb} = 10^{-3}$, кодирование LDPC дает на 16 дБ лучшие результаты, чем без кодирования. Кодирование LDPC дает лучшие результаты, чем сверточное кодирование с жестким решением, на 6 дБ. Кодирование LDPC дает результат, лучший на 1.5 дБ, по сравнению со сверточным кодированием с мягким решением.

Из рис. 11 видно, что при наличии узкополосных помех и при $P_{eb} = 10^{-3}$ кодирование LDPC дает результат, лучший, чем сверточное кодирование с жестким решением, на 10 дБ. Кодирование LDPC дает результат, лучший на 2 дБ, по сравнению со сверточным кодированием с мягким решением.

Рис. 9–11 позволяют утверждать, что при наличии узкополосных помех кодирование значительно снижает вероятность битовых ошибок по сравнению со случаем отсутствия кодирования. Кодирование при мягких решениях демодулятора дает лучшие результаты, чем при жестких решениях. Кодирование LDPC с мягкими решениями дает лучшие результаты, чем сверточное кодирование с мягкими решениями.

На рис. 12–14 приведены результаты моделирования, позволяющие сравнить эффективность сверточного кодирования и LDPC при мягких решениях демодулятора и при скоростях кодирования, равных 1/2 и 3/4, в присутствии узкополосной помехи. Отношение сигнал/узкополосная помеха равно 0 дБ по мощности.

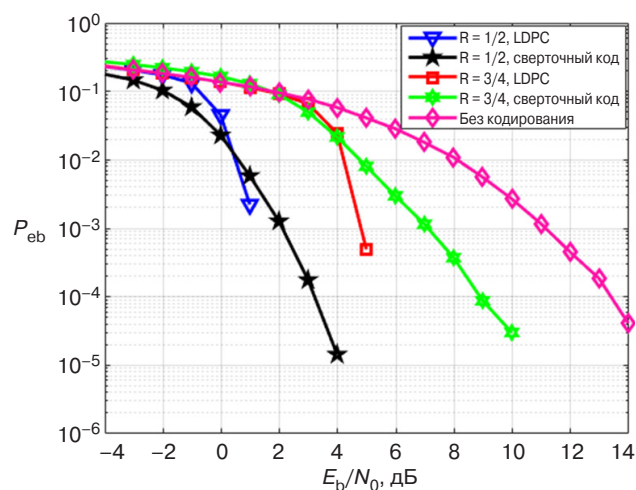


Рис. 12. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 системы OFDM с модуляцией 16-QAM и различными скоростями кодирования

Как видно из рис. 12, при $P_{eb} = 10^{-3}$ кодирование LDPC с мягкими решениями демодулятора при $R = 1/2$ на 3.5 дБ лучше, чем при $R = 3/4$. Сверточное кодирование с мягкими решениями демодулятора при $R = 1/2$ на 5 дБ лучше, чем при $R = 3/4$. При $R = 1/2$ кодирование LDPC с мягкими решениями демодулятора на 0.5 дБ лучше, чем сверточное кодирование с мягкими решениями демодулятора. При $R = 3/4$ кодирование LDPC с мягкими решениями демодулятора на 5 дБ лучше, чем сверточное кодирование с мягкими решениями демодулятора.

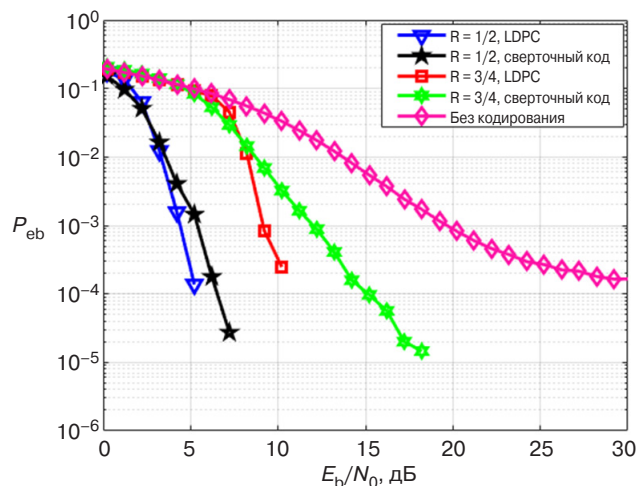


Рис. 13. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 системы OFDM с модуляцией 64-QAM и различными скоростями кодирования

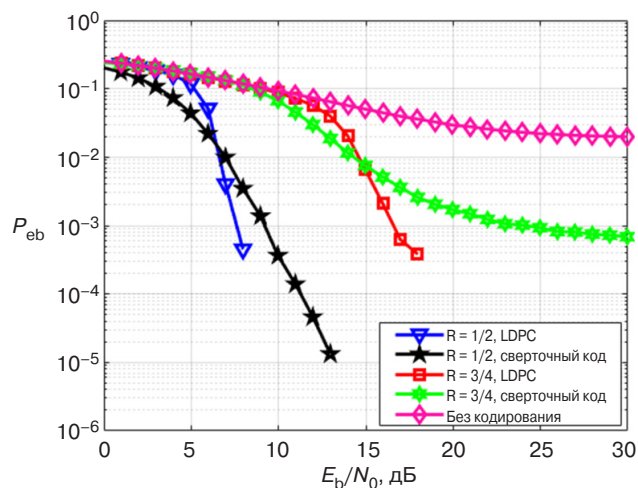


Рис. 14. Зависимость вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 системы OFDM с модуляцией 256-QAM и различными скоростями кодирования

Согласно рис. 13 при $P_{eb} = 10^{-3}$ кодирование LDPC с мягкими решениями демодулятора при $R = 1/2$ энергетически на 4.5 дБ лучше, чем при $R = 3/4$. Сверточное кодирование с мягкими решениями демодулятора при $R = 1/2$ на 6.5 дБ лучше, чем при $R = 3/4$. При $R = 1/2$ кодирование LDPC с мягкими решениями демодулятора на 1 дБ лучше, чем сверточное кодирование с мягкими решениями демодулятора. При $R = 3/4$ кодирование LDPC с мягкими решениями демодулятора на 3 дБ лучше, чем сверточное кодирование с мягкими решениями демодулятора.

Согласно рис. 14 при $P_{eb} = 10^{-3}$ кодирование LDPC с мягкими решениями демодулятора при $R = 1/2$ на 9 дБ лучше, чем при $R = 3/4$. Сверточное кодирование с мягкими решениями демодулятора при $R = 1/2$ на 14 дБ лучше, чем при $R = 3/4$.

При $R = 1/2$ кодирование LDPC с мягкими решениями демодулятора на 1.5 дБ лучше, чем сверточное кодирование с мягкими решениями демодулятора. При $R = 3/4$ кодирование LDPC с мягкими решениями демодулятора на 6.5 дБ лучше, чем сверточное кодирование с мягкими решениями демодулятора.

Из рис. 12–14 следует, что при мягких решениях демодулятора кодирование LDPC дает лучшие результаты, чем сверточное кодирование. При этом скорость кода $1/2$ приводит к более высокой помехоустойчивости приема, чем скорость $3/4$.

На рис. 15–17 представлены результаты оценки помехоустойчивости приема сигнала OFDM с модуляцией QAM поднесущих с использованием мягких решений демодулятора при разных отношениях сигнал/узкополосная помеха. Скорость кодов составляла $1/2$ для всех видов кодирования.

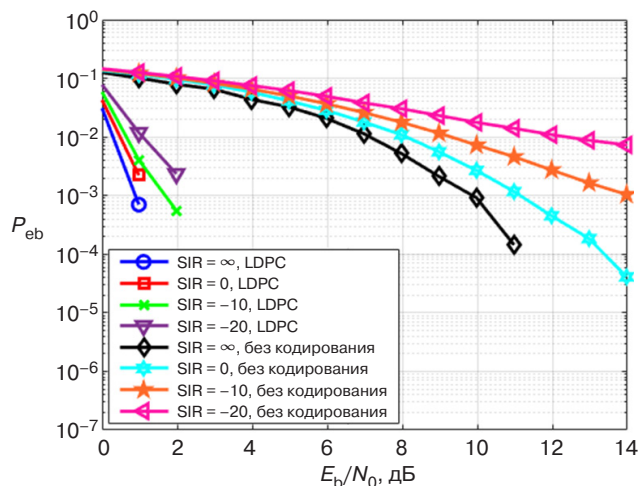


Рис. 15. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум E_b/N_0 системы OFDM с модуляцией 16-QAM при наличии узкополосных помех с разными уровнями

Из рис. 15 видно, что при $P_{eb} = 10^{-3}$, когда отсутствует узкополосная помеха ($SIR = \infty$), кодирование LDPC дает на 9 дБ лучшие результаты, чем без использования кодирования. Когда $SIR = 0$ дБ, кодирование LDPC дает на 10 дБ лучшие результаты, чем в случае, когда кодирование не используется. При $SIR = -10$ дБ, кодирование LDPC дает на 11 дБ лучшие результаты, чем в случае, когда кодирование не используется. При $P_{eb} = 10^{-3}$, когда $SIR = -20$ дБ, кодирование LDPC дает не менее чем на 20 дБ лучшие результаты, чем передача без кодирования.

Из рис. 16 видно, что при $P_{eb} = 10^{-3}$, когда отсутствует узкополосная помеха ($SIR = \infty$), кодирование LDPC дает на 11 дБ лучшие результаты, чем без использования кодирования. При $SIR = 0$ дБ кодирование LDPC дает на 15.5 дБ лучшие результаты, чем в случае, когда кодирование не используется. При $SIR = -10$ дБ вероятность ошибки по битам

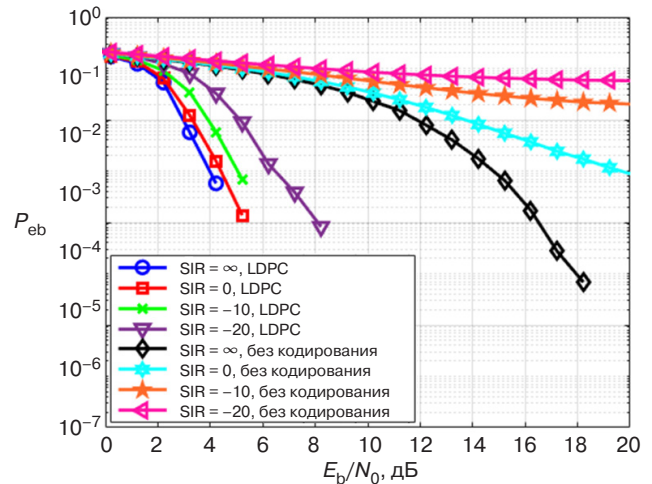


Рис. 16. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум E_b/N_0 системы OFDM с модуляцией 64-QAM при наличии узкополосных помех с разными уровнями

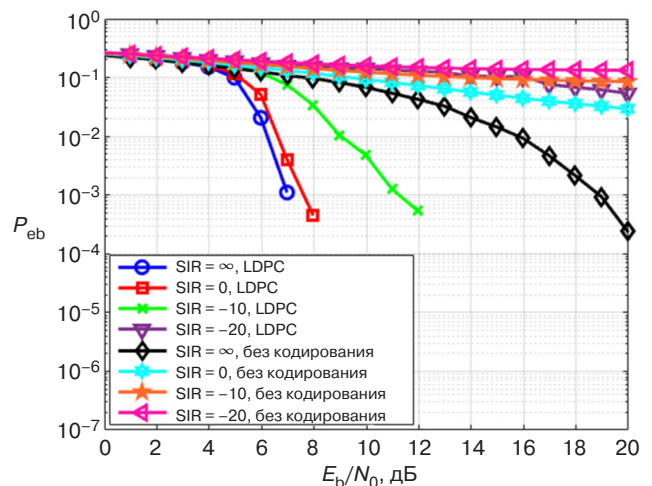


Рис. 17. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум E_b/N_0 системы OFDM с модуляцией 256-QAM при наличии узкополосных помех с разными уровнями

становится ниже значения 10^{-3} при E_b/N_0 , большем 5 дБ. Когда $SIR = -20$ дБ, это происходит при E_b/N_0 , большем 8 дБ.

Из рис. 17 видно, что при $P_{eb} = 10^{-3}$, когда отсутствует узкополосная помеха ($SIR = \infty$), кодирование LDPC дает на 12 дБ лучшие результаты, чем без использования кодирования. При $SIR = 0$ дБ вероятность ошибки по битам становится ниже 10^{-3} при E_b/N_0 , большем 8 дБ. При $SIR = -10$ дБ вероятность ошибки по битам становится ниже 10^{-3} , когда E_b/N_0 больше 12 дБ.

Результаты, приведенные на рис. 15–17, описывают помехоустойчивость приема OFDM-сигналов при наличии узкополосных помех с разными значениями SIR с LDPC-кодированием и без кодирования. Можно видеть, что при всех трех видах модуляции

в отсутствие кодирования узкополосная помеха существенно ухудшает помехоустойчивость системы передачи, причем с увеличением кратности QAM падение помехоустойчивости становится более существенным. Код LDPC значительно снижает влияние узкополосных помех на систему, особенно заметно – при небольших кратностях QAM.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных результатов можно сделать вывод, что использование кодирования с мягкими решениями демодулятора значительно улучшает помехоустойчивость приема OFDM-сигнала, позволяя смягчить воздействие узкополосных помех

на систему передачи. Кодирование LDPC показывает превосходство над сверточным кодированием в повышении помехоустойчивости приема сигнала OFDM, в т.ч. в присутствии узкополосных помех. Наряду с использованием в системах QAM-OFDM, предложенный простой метод демодуляции сигналов QAM с мягкими решениями может применяться в любых системах беспроводной связи, использующих M -позиционные сигналы QAM, у которых M представляет собой число 2 в четной степени.

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

Authors' contributions. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Cimini Jr. L.J. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing. *IEEE Trans. Commun.* 1985;33(7):665–675. URL: <https://doi.org/10.1109/TCOM.1985.1096357>
2. Mosse P.H. A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction. *IEEE Trans. Commun.* 1994;42(10):2908–2914. <https://doi.org/10.1109/26.328961>
3. Van Nee R., Prasad R. *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Boston: Artech House; 2000. 260 p.
4. Pandey S., Bharti M., Agrawal A.K. Analysis of M-ary QAM-Based OFDM Systems in AWGN Channel. In: Bansal R.C., Agrawal A., Jadoun V.K. (Eds.). *Advances in Energy Technology: Select Proceedings of EMSME*. 2022;(766):223–235. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1476-7_22
5. Van Wyk J., Linde L. Bit error probability for a M-ary QAM OFDM-based system. In: *AFRICON 2007*. IEEE; 2007. <https://doi.org/10.1109/AFRICON.2007.4401578>
6. Fuqin Xiong. M-ary amplitude shift keying OFDM system. *IEEE Trans. Commun.* 2003;51(10):1638–1642. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2003.818103>
7. Batra A., Zeidler J.R. Narrowband interference mitigation in OFDM systems. In: *MILCOM 2008. 2008 IEEE Military Communications Conference*. 2008. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2008.4753296>
8. Coleri S., Ergen M., Puri A., Bahai A. Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems. *IEEE Trans. Broadcast.* 2002;48(3):223–229. <http://doi.org/10.1109/TBC.2002.804034>
9. Lu B., Yue G., Wang X.D. Performance analysis and design optimization of LDPC-coded MIMO OFDM systems. *IEEE Trans. Signal Process.* 2004;52(2):348–361. <https://doi.org/10.1109/TSP.2003.820991>
10. Lu B., Wang X. Space-time code design in OFDM systems. In: *Globecom '00 – IEEE Global Telecommunications Conference. Conference Record (Cat. No. 00CH37137)*. IEEE; 2000. V. 2. P. 1000–1004. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2000.891288>
11. Wang Q., Onotera L.Y. Coded QAM using a binary convolutional code. *IEEE Trans. Commun.* 1995;43(6):2001–2004. <https://doi.org/10.1109/26.387437>
12. Mosleh M.F. Log-Likelihood Ratio to Improve Hard Decision Viterbi Algorithm. *Eng. & Tech. J.* 2013;31(9):1779–1790. <https://doi.org/10.30684/etj.2013.82189>
13. Hagenauer J., Hoher P. A Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its applications. In: *1989 IEEE Global Telecommunications Conference and Exhibition "Communications Technology for the 1990s and Beyond."* 1989;3:1680–1686. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.1989.64230>
14. Cao S., Kam P.Y., Yu C. Pilot-Aided Log-Likelihood Ratio for LDPC Coded MPSK-OFDM Transmission. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2013;25(6):594–597. <https://doi.org/10.1109/LPT.2013.2246563>
15. Cao S., Kam P.Y., Yu C. Pilot-aided log-likelihood ratio for LDPC coded M-QAM CO-OFDM system. *OFC 2014*. 2014, W3. <https://doi.org/10.1364/OFC.2014.W3J.1>
16. Chen J., Dholakia A., Ftheriou E., et al. Reduced-complexity decoding of LDPC codes. *IEEE Trans. Commun.* 2005;53(8):1288–1299. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2005.852852>
17. Jiabin T., Yue X., Lilin D., Wei X., et al. Efficient LLR Approximation for Coded Constant Envelope OFDM. *IEEE Trans. Vehicular Technol.* 2023;72(5):6194–6208. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3231912>
18. Zhenyu Z., Caihong G., Hua L., et al. Soft-Input Soft-Output Detection via Expectation Propagation for Massive Spatial Modulation MIMO Systems. *IEEE Commun. Lett.* 2021;25(4):1173–1177. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.3047081>

19. Чу В.В. Помехоустойчивость OFDM системы передачи при использовании LDPC кода. В сб.: *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сборник трудов Национальной научно-практической конференции*. М: РТУ МИРЭА; 2022. С. 389–392.
[Chu V.V. Noise immunity of OFDM transmission system when using LDPC code. In: *Fundamental, Exploratory, Applied Research and Innovation Projects: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2022. P. 389–392 (in Russ.).]

Об авторах

Парамонов Алексей Анатольевич, д.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: paramonov@mirea.ru. Scopus Author ID 57208923552, SPIN-код РИНЦ 5605-9459, <http://orcid.org/0000-0002-4537-4626>

Чу Ван Вуонг, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: muadem1110@gmail.com. <http://orcid.org/0009-0003-0143-0168>

About the authors

Alexey A. Paramonov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: paramonov@mirea.ru. Scopus Author ID 57208923552, RSCI SPIN-code 5605-9459, <http://orcid.org/0000-0002-4537-4626>

Chu Van Vuong, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: muadem1110@gmail.com. <http://orcid.org/0009-0003-0143-0168>

УДК 621.391.072

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-33-41>

EDN ELQHEK



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией на фоне ретранслированной помехи

А.Е. Троицкая,
Ю.А. Полевода[@],
Г.В. Куликов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Радиотехнические системы передачи информации широко применяются в роботизированных комплексах для использования военными и гражданскими службами. При попадании такого комплекса в сложную окружающую среду, в которой возникает большое количество ретранслированных помех, например, при попадании комплекса под завал, в железобетонные трубы или различные коммунальные объекты, связь с командным пунктом может быть потеряна. Задача поддержания надежной связи в сложных условиях распространения радиоволн является весьма актуальной. В области телекоммуникаций широко используются многопозиционные виды модуляции, которые, несмотря на их хорошие спектральные характеристики, обеспечивают невысокую помехоустойчивость в условиях нефлуктуационных помех, особенно в случае ретранслированных помех. Представляется целесообразным исследовать возможность применения сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией (М-ЧМ) в радиосистемах со сложной помеховой обстановкой. Целью работы является анализ помехоустойчивости когерентного приема сигналов М-ЧМ на фоне ретранслированной помехи.

Методы. Используются методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и математического моделирования.

Результаты. Приведена модель сигнала М-ЧМ и ретранслированной помехи. Получены статистические параметры распределений случайных процессов в многоканальном когерентном приемнике сигналов М-ЧМ на фоне ретранслированной помехи. На этой основе рассчитана вероятность битовой ошибки при приеме сигналов М-ЧМ разной позиционности M на фоне ретранслированной помехи с различной интенсивностью.

Выводы. Показано, что воздействие ретранслированной помехи приводит к снижению помехоустойчивости приема сигналов М-ЧМ, которое тем больше, чем выше интенсивность помехи. С возрастанием позиционности сигналов М-ЧМ при небольшой интенсивности ретранслированной помехи помехоустойчивость приема значительно улучшается, но помеха большой интенсивности сильно увеличивает вероятность битовой ошибки. Наличие помехи с относительной интенсивностью 0.5 вызывает энергетические потери от 4 до 6 дБ в зависимости от позиционности. При $M > 4$ сигналы М-ЧМ значительно выигрывают в помехоустойчивости у сигналов с многопозиционной фазовой, квадратурной амплитудной и амплитудно-фазовой манипуляцией.

Ключевые слова: многопозиционная частотная манипуляция, ретранслированная помеха, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки

• Поступила: 12.03.2024 • Доработана: 03.04.2024 • Принята к опубликованию: 12.07.2024

Для цитирования: Троицкая А.Е., Полевода Ю.А., Куликов Г.В. Помехоустойчивость приема сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией на фоне ретранслированной помехи. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):33–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-33-41>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Noise immunity of signal reception with multiple frequency-shift keying against retransmitted interference

Alexandra E. Troitskaya,
Yuriy A. Polevoda[@],
Gennady V. Kulikov

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

Abstract

Objectives. Radio engineering information transmission systems are widely used in robotic systems employed in various military and civilian services. If such systems are used in a harsh environment, where a large amount of retransmitted interference occurs, for example, if a complex is buried under rubble or is located in reinforced concrete pipes or other utility facilities, communication with the command post may be lost. Thus, the task of maintaining reliable communications under difficult conditions of radio wave propagation is very urgent. In the field of telecommunications, multiposition types of modulation are widely used, which, despite their good spectral characteristics, provide low noise immunity under conditions of nonfluctuating interference, especially in cases of retransmitted interference. Therefore, it is relevant to explore the possibility of using multiple frequency-shift keying (M-FSK) signals in radio systems with complex interference environments. The paper sets out to analyze the noise immunity of coherent reception of M-FSK signals against the background of retransmitted interference.

Methods. Statistical radio engineering and mathematical modeling methods are used according to the theory of optimal signal reception.

Results. A model of the M-FSK signal and retransmitted interference is provided. The statistical parameters of the distributions of random processes occurring in a multichannel coherent receiver of M-FSK signals against retransmitted interference are obtained; based on this, the bit error rate is calculated when receiving M-FSK signals of different positionality M against retransmitted interference with different intensities.

Conclusions. The impact of retransmitted interference is shown to result in a decrease in the noise immunity of M-FSK signal reception, which is greater the higher its intensity. With increasing positionality of M-FSK signals at low intensity of retransmitted interference, the noise immunity of reception is significantly improved; however, high-intensity interference significantly increases the bit error rate. The presence of interference with a relative intensity of 0.5 causes energy losses from 4 to 6 dB depending on the positionality. When $M > 4$, M-FSK signals gain significantly in terms of noise immunity over signals with multiple phase-shift keying, quadrature amplitude modulation, and amplitude and phase-shift keying.

Keywords: multiple frequency-shift keying, retransmitted interference, noise immunity, bit error rate

• Submitted: 12.03.2024 • Revised: 03.04.2024 • Accepted: 12.07.2024

For citation: Troitskaya A.E., Polevoda Yu.A., Kulikov G.V. Noise immunity of signal reception with multiple frequency-shift keying against retransmitted interference. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):33–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-33-41>

Financial disclosure: The authors have no financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Радиотехнические системы передачи информации широко применяются в роботизированных комплексах для использования военными и гражданскими службами, например, в целях гражданской обороны, при возникновении чрезвычайных ситуаций и ликвидации последствий стихийных бедствий¹ [1–4]. При попадании такого комплекса в сложную окружающую среду, в которой возникает большое количество ретранслированных помех² [5–7], например, при попадании комплекса под завал, в железобетонные трубы или различные коммунальные объекты, связь с командным пунктом может быть потеряна. Поэтому задача поддержания надежной связи с такими роботизированными комплексами в сложных условиях распространения радиоволн является весьма актуальной.

В настоящее время в области телекоммуникаций широко используются многопозиционные виды модуляции. Известно, что сигналы с многопозиционной фазовой (М-ФМ), сигналы с квадратурной амплитудной (КАМ) и амплитудно-фазовой (АФМ) манипуляциями, несмотря на их хорошие спектральные характеристики, обладают невысокой помехоустойчивостью в условиях нефлуктуационных помех, особенно в случае ретранслированных помех [8–12].

¹ Приказ от 26 декабря 2018 г. № 633. Об утверждении и введении в действие руководства по радиосвязи Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. <https://base.garant.ru/72152196/>. Дата обращения 25.11.2023. [Order No. 633 dated December 26, 2018. On Approval and Enactment of the Radio Communications Manual of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters. <https://base.garant.ru/72152196/> (in Russ.). Accessed November 25, 2023.]

² Рекомендация МСЭ-Р R.1238-6 (10/2009). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в частотном диапазоне 900 МГц – 100 ГГц. Серия Р. Распространение радиоволн. [ITU-R Recommendation R.1238-6 (10/2009). *Radio wave propagation data and prediction methods for planning indoor radio communication systems and local area radio networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz*. Series R. Radio wave propagation (in Russ.).]

Поэтому представляется целесообразным исследовать возможность применения сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией (М-ЧМ, англ. M-FSK – multiple frequency-shift keying) [13–15] в радиосистемах со сложной помеховой обстановкой. Целью работы является анализ помехоустойчивости когерентного приема сигналов М-ЧМ на фоне ретранслированной помехи.

МОДЕЛЬ М-ЧМ СИГНАЛА И РЕТРАНСЛИРОВАННОЙ ПОМЕХИ

Многопозиционная частотная манипуляция представляет собой один из методов передачи цифровой информации с использованием нескольких частот. В технике связи используются М-ЧМ сигналы разной позиционности M (от 4 до 64), которые имеют различную ширину спектра при заданной скорости передачи информации.

Для сигнала с многопозиционной частотной манипуляцией i -й вариант посылки канального символа длительностью T_s , несущего информацию о $k = \log_2 M$ информационных битах, можно записать следующим образом:

$$s_i(t) = A_0 \cos \left[\left(\omega_0 + \left(i - \frac{M+1}{2} \right) \Delta\omega \right) t \right], \quad (1)$$

$$i = \overline{1, M}, \quad t \in (0, T_s],$$

где $A_0 = \sqrt{2E_s / T_s}$ – номинальная амплитуда сигнала, $E_s = kE_b$ – энергия канального символа, E_b – энергия, приходящаяся на один бит информации; ω_0 – центральная частота спектра сигнала (несущая частота); $\Delta\omega = 2\Delta\omega_d$, $\Delta\omega_d$ – девиация частоты (минимальная девиация, при которой выполняется условие ортогональности, равна $\pi/2T_s$); t – время.

Если ввести обозначения индекса модуляции $h = \Delta\omega_d T_s / \pi$ и многопозиционного канального символа $C_i = \pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)$, то выражение (1) можно представить в виде [15]:

$$s_i(t) = A_0 \cos \left(\omega_0 t + C_i h \frac{\pi}{T_s} t \right).$$

На рис. 1 показан пример распределения частот для сигнала 8-ЧМ. Сигнальные точки и соответствующие им каналные символы организованы согласно кодированию Грея.

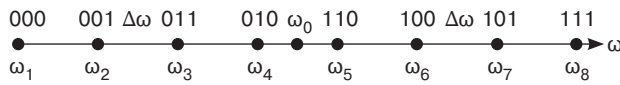


Рис. 1. Пример расстановки частот для сигнала 8-ЧМ

В качестве ретранслированной помехи, возникающей при отражении сигнала М-ЧМ от какого-либо препятствия, используем сигнал (1) с временной задержкой $\tau \leq T_s$ и случайной фазой φ_{int} :

$$s_{\text{int}}(t) = \begin{cases} \mu A_0 \cos \left[\left(\omega_0 + \left(j - \frac{M+1}{2} \right) \Delta\omega \right) (t - \tau) + \varphi_{\text{int}} \right], & 0 < t \leq \tau, \\ \mu A_0 \cos \left[\left(\omega_0 + \left(i - \frac{M+1}{2} \right) \Delta\omega \right) (t - \tau) + \varphi_{\text{int}} \right], & \tau < t \leq T_s, \end{cases} \quad (2)$$

где μ – относительная интенсивность ретранслированной помехи, i и j – текущие номера сигналов в передаваемой последовательности.

На рис. 2 представлены временные соотношения между полезным радиосигналом и ретранслированной помехой.

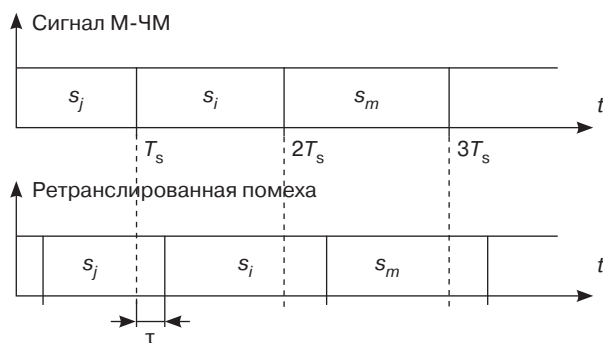


Рис. 2. Временные соотношения между полезным сигналом и ретранслированной помехой

Считаем, что на входе приемника системы передачи информации кроме полезного сигнала и ретранслированной помехи присутствует белый гауссовский шум $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0 и δ -функцией корреляции:

$$R(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau).$$

ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ БИТОВОЙ ОШИБКИ

В качестве приемника сигналов М-ЧМ рассмотрим многоканальный когерентный демодулятор [14, 15]. Это демодулятор в присутствии белого гауссовского шума вычисляет M интегралов свертки I_i принимаемого колебания и M опорных сигналов и принимает решение о канальном символе по максимуму правдоподобия.

Вычисление вероятности битовой ошибки выполнено по методике, представленной в [10–12]. Для этого случайные параметры ретранслированной помехи (2), такие как интенсивность μ , фаза φ_{int} , задержка τ и информационный символ в задержанной копии вначале полагались фиксированными. Это позволило определить условную по ним вероятность ошибочного приема канального символа:

$$P_{\text{es}}^* = 1 - \prod_{i=1}^M p_i(I_m > I_i) \Big|_m, \quad m \neq i. \quad (3)$$

При таком условии и с учетом наличия на входе приемника белого гауссовского шума распределения случайных процессов – интегралов свертки в каналах приемника и их линейных комбинаций « mi » можно считать нормальными и для получения вероятностей $p_i(I_m > I_i)$, входящих в (3) и определяемых через стандартный интеграл вероятности (функцию ошибок), достаточно рассчитать их также условные статистические характеристики:

- математическое ожидание

$$m_{mi}^* = \frac{2E_s}{N_0} \left\{ 1 + \mu \frac{\sin x}{x} \times \right. \\ \times \frac{\tau}{T_s} \cos \left[\left(\frac{M+1}{2} - \frac{j+m}{2} \right) \Delta\omega T_s \frac{\tau}{T_s} + \eta \right] + \\ + \mu \left(1 - \frac{\tau}{T_s} \right) \cos \left[\left(\frac{M+1}{2} - m \right) \Delta\omega T_s \frac{\tau}{T_s} + \eta \right] - \frac{\sin y}{y} - \\ - \mu \frac{\tau}{T_s} \cdot \frac{\sin z}{z} \cos \left[\left(\frac{M+1}{2} - \frac{(j+i)}{2} \right) \Delta\omega T_s \frac{\tau}{T_s} + \eta \right] - \\ - \left(1 - \frac{\tau}{T_s} \right) \mu \frac{\sin g}{g} \cos \left[\frac{(m-i) \Delta\omega T_s}{2} - \right. \\ \left. - \left(\frac{m+i}{2} + \frac{M+1}{2} \right) \Delta\omega T_s \frac{\tau}{T_s} + \eta \right] \Big\},$$

- дисперсия

$$D_{mi}^* = \frac{4E_s}{N_0} \left(1 - \frac{\sin y}{y} \right),$$

где

$$\eta = \varphi_{\text{int}} - \omega_0 \tau, \quad x = (j - m) \frac{\Delta \omega T_s}{2} \cdot \frac{\tau}{T_s},$$

$$y = (m - i) \Delta \omega T_s, \quad z = (j - i) \frac{\Delta \omega T_s}{2} \cdot \frac{\tau}{T_s},$$

$$g = (m - i) \frac{\Delta \omega T_s \left(1 - \frac{\tau}{T_s}\right)}{2}.$$

Для получения безусловной вероятности ошибки P_{es} усреднение условной вероятности P_{es}^* для случайных параметров помехи, таких как, например, случайная фаза φ_{int} , было проведено численным методом. Параметры μ и τ полагались фиксированными. При этом вычисления выполнены с перебором всех возможных комбинаций канальных символов. При расчете вероятности битовой ошибки P_{eb} учтена рекомендация [14], описывающая соотношение между ее величиной и вероятностью ошибки при приеме канального символа P_{es} для многопозиционных ортогональных сигналов:

$$P_{\text{eb}} = P_{\text{es}} / ((M - 1) / (M/2)).$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На основе выведенных формул проведены расчеты помехоустойчивости приема сигналов М-ЧМ с позиционностями $M = 2, 4, 8, 16, 32$. В ходе исследования изменялись параметры радиоканала: отношение сигнал/шум E_b/N_0 – в диапазоне от 1 до 13 дБ, относительная интенсивность ретранслированной помехи μ – в диапазоне $[0; 1]$, относительная задержка помехи $\tau/T_s = 0.5$. Результаты расчетов представлены на рис. 3 и 4.

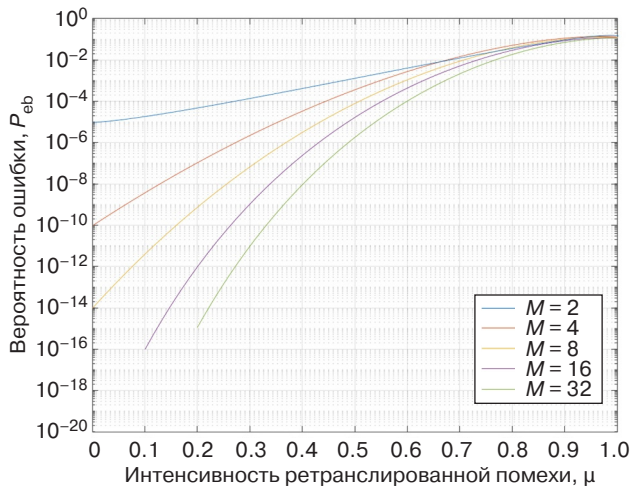


Рис. 3. Зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от относительной интенсивности ретранслированной помехи μ при $E_b/N_0 = 13$ дБ

Воздействие ретранслированной помехи приводит к снижению помехоустойчивости. Снижение тем больше, чем выше интенсивность помехи. При этом сигналы с большей позиционностью ($M \geq 8$) с этой точки зрения являются предпочтительными и при небольшой относительной интенсивности помехи ($\mu < 0.3$) обеспечивают на несколько порядков меньшую вероятность битовой ошибки, чем малопозиционные сигналы 2-ЧМ и 4-ЧМ.

Стоит отметить, что даже при высоком значении относительной интенсивности ретранслированной помехи ($\mu \in [0.4; 0.5]$) использование сигналов с многопозиционной частотной манипуляцией позволяет сохранить достаточно малый уровень вероятности битовой ошибки (10^{-5} – 10^{-4}), что недоступно при использовании других видов многопозиционных сигналов КАМ [10], М-ФМ [11], АФМ [12] при той же позиционности.

Оценить энергетические потери от воздействия ретранслированной помехи при приеме сигналов М-ЧМ позволяют графики зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при разной относительной интенсивности помехи μ (рис. 4).

Из графиков видно, что с увеличением позиционности М-ЧМ сигнала от 2 до 32 помехоустойчивость приема значительно возрастает. Так, например, при малой интенсивности ретранслированной помехи ($\mu \leq 0.1$) и высоком отношении сигнал/шум ($E_b/N_0 = 10$ дБ) вероятность битовой ошибки снижается на 7 порядков.

Наличие помехи с относительной интенсивностью $\mu = 0.5$ при $P_{\text{eb}} = 10^{-4}$ вызывает энергетические потери от 5 до 6 дБ в зависимости от позиционности. Тем не менее, в целом помехоустойчивость приема М-ЧМ сигналов высокой позиционности остается высокой.

СРАВНЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ М-ЧМ И ДРУГИХ ВИДОВ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ МОДУЛЯЦИИ

На рис. 5 для сравнения приведены графики зависимости вероятности битовой ошибки от относительной интенсивности ретранслированной помехи при приеме сигналов М-ЧМ и КАМ [10] одинаковой позиционности 4, 16 и 32.

Можно видеть, что при позиционности $M = 4$ помехоустойчивость приема этих сигналов примерно одинакова, но при возрастании величины M сигналы с многопозиционной частотной манипуляцией значительно (на несколько порядков по вероятности битовой ошибки) выигрывают у сигналов КАМ в широком диапазоне интенсивностей ретранслированной помехи ($\mu \in [0; 0.6]$).

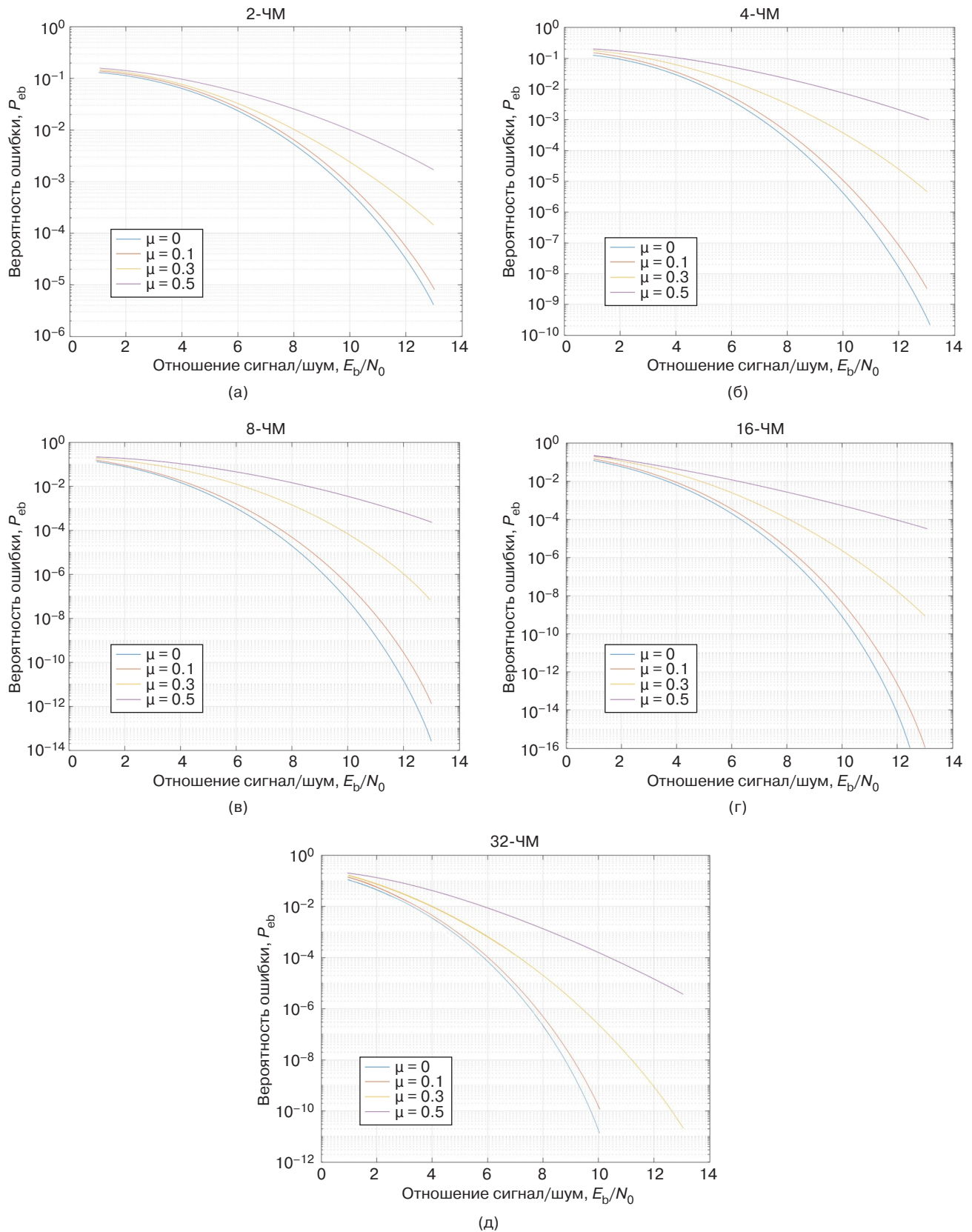


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 при воздействии ретранслированной помехи для сигналов: (а) 2-ЧМ, (б) 4-ЧМ, (в) 8-ЧМ, (г) 16-ЧМ, (д) 32-ЧМ

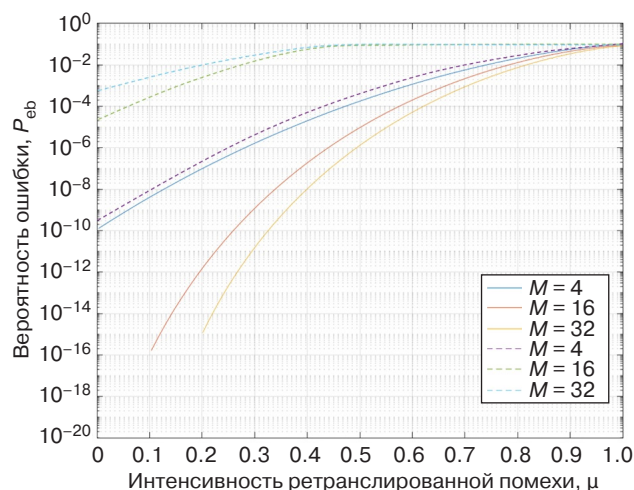


Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки $P_{об}$ от относительной интенсивности μ ретранслированной помехи при приеме сигналов М-ЧМ (сплошные линии) и КАМ (штриховые линии) одинаковой позиционности

Подобный вывод можно сделать и в отношении сигналов АФМ [12], помехоустойчивость приема которых приблизительно соответствует КАМ, и, тем более, в отношении сигналов М-ФМ [11], проигрывающих КАМ. Но говоря об указанных достоинствах сигналов М-ЧМ, не следует забывать об их спектральных характеристиках, по которым они существенно проигрывают другим сигналам [13, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ помехоустойчивости приема сигналов с частотной манипуляцией позиционности M от 2 до 32 при наличии в канале связи ретранслированной помехи для разных значений

отношений сигнал/шум и значений относительной интенсивности помехи. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. С возрастанием позиционности помехоустойчивость приема сигналов М-ЧМ улучшается, и при малой интенсивности ретранслированной помехи вероятность битовой ошибки снижается на несколько порядков.
2. Воздействие ретранслированной помехи приводит к снижению помехоустойчивости приема сигналов М-ЧМ, которое тем больше, чем выше ее интенсивность. Например, наличие помехи с относительной интенсивностью $\mu = 0.5$ при $P_{об} = 10^{-4}$ вызывает энергетические потери от 4 до 6 дБ в зависимости от позиционности сигнала М-ЧМ.
3. При $M > 4$ сигналы М-ЧМ значительно выигрывают в помехоустойчивости у сигналов М-ФМ, КАМ и АФМ в широком диапазоне интенсивностей ретранслированной помехи.
4. Применение сигналов М-ЧМ, обладающих столь высокими энергетическими характеристиками, оправдано в радиоканалах без существенных частотных ограничений.

Вклад авторов

А.Е. Троицкая – проведение компьютерных расчетов.

Ю.А. Полевода – обработка результатов.

Г.В. Куликов – идея исследования, консультации по вопросам проведения всех этапов исследования.

Authors' contributions

A.E. Troitskaya – conducting computer calculations.

Yu.A. Polevoda – processing the results.

G.V. Kulikov – the research idea, consultations on the issues of conducting all stages of the study.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асхадеев А.И., Павлов Е.В., Баранник А.Ю., Лагутина А.В., Козлов В.И., Пеньков И.А., Чирко О.В. Система робототехники МЧС России. Состояние и перспективы развития. *Технологии гражданской безопасности*. 2022;19(2–72): 41–47. URL: https://www.vniigochs.ru/upload/medialibrary/6b3/ufktj8lowcrv39y864piuh8dtzmnw0njo/p_8_Emercom_Russia_Robotics_System_tgb_2_2022.pdf
2. Антохин Е.А., Панасенко Н.Н., Чернова А.Д. Основные требования к беспроводным каналам связи наземных робототехнических комплексов военного назначения. *Робототехника и техническая кибернетика*. 2017;4(17):10–14.
3. Андреев В.П. Обеспечение безопасности работы кино- и тележурналистов средствами экстремальной робототехники. *Экстремальная робототехника. Труды 33-й Международной научно-технической конференции*. 2022;1(1):25–34. URL: https://er.rtc.ru/images/docs/2022/Proceedings_ER-2022.pdf
4. Манько С.В., Лохин В.М., Диане С.К. Принципы построения и экспериментальные исследования прототипного образца многоагентной робототехнической системы для разбора завалов. *Russian Technological Journal*. 2022;10(6): 28–41. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>
5. Гуреев А.В., Гуреев И.А., Павлюк Ю.М., Тхурайн Т. Влияние многолучевости распространения радиоволн на характеристики широкополосных беспроводных систем внутри зданий. *Электронные информационные системы*. 2017;4(15):17–23.
6. Гуреев А.В. Энергетические характеристики распространения электромагнитных волн внутри зданий. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2015;20(4):421–430.

7. Гуреев А.В., Гуреев И.А., Павлюк Ю.М., Жмылев В.А., Качуренко Д.С. Исследование характеристик распространения электромагнитных волн внутри зданий. *Электронные информационные системы*. 2019;4(23):95–101.
8. Башкиров А.В., Крисилов А.В., Машин В.В., Муратов А.В., Хорошайлова М.В. Анализ вероятностей символьных ошибок для 16-QAM-сигналов в присутствии QPSK-сигналов и 16-QAM-сигналов. *Радиотехника*. 2020;84(6–12): 5–9. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202006\(12\)-01](https://doi.org/10.18127/j00338486-202006(12)-01)
9. Сидельников Г.М. Сравнительный анализ эффективности разнесенного приема сигналов с квадратурной амплитудной и с фазовой модуляцией в канале с дискретной многолучевостью. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2020;2(46):18–30. <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2020.2.18>
10. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Граченко Е.Н. Помехоустойчивость когерентного приемника сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией при наличии ретранслированной помехи. *Радиотехника и электроника*. 2020;65(8): 804–808. <https://doi.org/10.31857/S0033849420070074>
11. Нгуен В.З. Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированной помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
12. Куликов Г.В., Данг С.Х. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в двухлучевом канале связи. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2022;2:43–49.
13. Haykin S. *Communication Systems*. John Wiley & Sons. Inc.; 2001. 816 p.
14. Прохис Дж. *Цифровая связь*: пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь; 2000. 800 с.
15. Xiong F. *Digital Modulation Techniques*. 2nd ed. Boston, London: Artech House, Inc.; 2006. 1039 p.

REFERENCES

1. Askhadeev A.I., Pavlov E.V., Barannik A.Y., Lagutina A.V., Kozlov V.I., Penkov I.A., Chirko O.V. Emercom of Russia Robotics System. State and Prospects of Development. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti = Civil Security Technologies*. 2022;19(2–72):41–47 (in Russ.). Available from URL: https://www.vniigochs.ru/upload/medialibrary/6b3/ufktj81owcrv39y864piuh8dtzmw0njo/p_8_Emercom_Russia_Robotics_System_tgb_2_2022.pdf
2. Antokhin E.A., Panasenko N.N., Chernova A.D. Main requirements to wireless communication channels of military ground robotic complexes. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika = Robotics and Technical Cybernetics*. 2017;4(17):10–14 (in Russ.).
3. Andreev V.P. Ensuring the safety of the work of film and TV journalists by means of extreme robotics. In: *Proceedings of the International Scientific and Technological Conference EXTREME ROBOTICS*. 2022;1(1):25–34 (in Russ.). Available from URL: https://er rtc.ru/images/docs/2022/Proceedings_ER-2022.pdf
4. Manko S.V., Lokhin V.M., Diane S.K. Prototype multi-agent robotic debris removal system: principles of development and experimental studies. *Russ. Technol. J*. 2022;10(6):28–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-28-41>
5. Gureev A.V., Gureev I.A., Pavlyuk Y.M., Thurain T. The effect of multipath propagation on characteristics of indoor broadband wireless systems. *Elektronnye informatsionnye sistemy = Electronic Information Systems*. 2017;4(15):17–23 (in Russ.).
6. Gureev A.V. Energetic characteristics of indoor wave propagation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2015;20(4):421–430 (in Russ.).
7. Gureev A.V., Gureev I.A., Pavlyuk Y.M., Zhmylev V.A., Kachurenko D.S. Investigation of characteristics of electromagnetic waves propagation in buildings. *Elektronnye informatsionnye sistemy = Electronic Information Systems*. 2019;4(23):95–101 (in Russ.).
8. Bashkirov A.V., Krisilov A.V., Mashin V.V., Muratov A.V., Khoroshailova M.V. Analysis of symbol error rate for 16-QAM signals in the presence of QPSK signals and 16-QAM signals. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2020;84(6–12):5–9 (in Russ.). [https://doi.org/10.18127/j00338486-202006\(12\)-01](https://doi.org/10.18127/j00338486-202006(12)-01)
9. Sidelnikov G.M. Comparative analysis of efficiency of spaced reception of signals with quadrature amplitude and with phase modulation in a channel with discrete multipath. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems*. 2020;2(46):18–30 (in Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2020.2.18>
10. Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Grachenko E.N. Noise immunity of coherent signal receiver with quadrature amplitude modulation in the presence of relayed interference. *J. Commun. Technol. Electron*. 2020;65(8):934–938. <https://doi.org/10.1134/S1064226920070074>
[Original Russian Text: Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Grachenko E.N. Noise immunity of coherent signal receiver with quadrature amplitude modulation in the presence of relayed interference. *Radiotekhnika i Elektronika*. 2020;65(8):804–808 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033849420070074>]
11. Nguyen V.D. Noise immunity of correlation receiver of signal with multi-position phase shift keying in the presence of retransmitted interference. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2019;3 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
12. Kulikov G.V., Dang X.Kh. Noise immunity of reception of signal with amplitude-phase shift keying in a two-path communication channel. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya = Questions of Radio Electronics. Series: TV Technique*. 2022;2:43–49 (in Russ.).

13. Haykin S. *Communication Systems*. John Wiley & Sons. Inc.; 2001. 816 p.
14. Proakis J. *Tsifrovaya svyaz' (Digital Communication)*: transl. from Engl. Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 800 p. (in Russ.). [Proakis J. *Digital Communications*. N.Y.: McGraw-Hill; 1995. 928 p.]
15. Xiong F. *Digital Modulation Techniques*. 2nd ed. Boston, London: Artech House, Inc.; 2006. 1039 p.

Об авторах

Троицкая Александра Евгеньевна, студент, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: troitskaya.a.e@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0002-9315-8829>

Полевода Юрий Александрович, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: polevoda@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-6327-9685>

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, SPIN-код РИНЦ 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

About the authors

Alexandra E. Troitskaya, Student, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: troitskaya.a.e@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0002-9315-8829>

Yuriy A. Polevoda, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: polevoda@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-6327-9685>

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, RSCI SPIN-code 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

УДК 621.391, 621.396

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-42-49>

EDN EMMZPA



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Метод ограничения пик-фактора с дополнительным сигналом компенсации в системе с ортогональным частотным разделением каналов для гауссовского канала

Фам Тхань Туан[@],
О.В. Тихонова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: anhsequayve.ru@gmail.com

Резюме

Цели. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) стало стандартом для различных систем беспроводной связи с высокой скоростью передачи данных благодаря нескольким преимуществам, одним из которых является эффективное использование полосы частот. Главным недостатком OFDM является высокое значение отношения пиковой мощности к средней мощности – пик-фактору, на что указывает повышение частоты битовых ошибок из-за нелинейности усилителя мощности. Цель статьи – оценка возможности снижения значения пик-фактора с помощью разработанного авторами метода ограничения с дополнительным сигналом компенсации в канале с белым гауссовским шумом и анализ его основных параметров.

Методы. Используются методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и компьютерного моделирования.

Результаты. Проведен анализ влияния уровня ограничения сигнала OFDM и числа дополнительных сигналов при использовании метода ограничения с дополнительным сигналом компенсации на качество (уменьшение потерь при передаче) сигнала OFDM. Получены результаты, показывающие снижение величины пик-фактора OFDM-сигнала, и зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при фиксированных значениях ограничения и числа дополнительных сигналов в канале с белым гауссовским шумом.

Выводы. Предложен метод ограничения с дополнительным сигналом при передаче OFDM-сигнала в канале с белым гауссовским шумом, обеспечивающий компенсацию потерь информации, обусловленных ограничениями уровня сигнала в канале передачи. Установлено, что увеличение уровня ограничения увеличивает величину пик-фактора, а при изменении числа дополнительных сигналов пик-фактор изменяется незначительно. Для эффективной реализации метода ограничения с дополнительным сигналом компенсации необходимо выбирать параметры уровня ограничения порогового значения и число дополнительных сигналов в зависимости от прогнозируемого отношения сигнал/шум в системе.

Ключевые слова: метод ограничения с дополнительным сигналом, пик-фактор, вероятность битовой ошибки, ортогональное частотное разделение каналов, белый гауссовский шум

• Поступила: 23.01.2024 • Доработана: 29.03.2024 • Принята к опубликованию: 12.07.2024

Для цитирования: Фам Т.Т., Тихонова О.В. Метод ограничения пик-фактора с дополнительным сигналом компенсации в системе с ортогональным частотным разделением каналов для гауссовского канала. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):42–49. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-42-49>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Method for limiting the peak factor using an additional compensation signal in a system with orthogonal frequency division multiplexing for a Gaussian channel

Pham Thanh Tuan[@],
Olga V. Tikhonova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: anhsequayve.ru@gmail.com

Abstract

Objectives. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) has become the standard for various high-speed wireless communication systems due to its several advantages, one of which is the efficient use of bandwidth. The main disadvantage of OFDM is the high peak-power-to-average-power ratio (PAPR), which is indicated by an increase in the bit error rate due to the nonlinearity of the power amplifier. The paper sets out to evaluate the possibility of reducing the PAPR value using a limitation method developed by the authors involving an additional compensation signal in a channel with white Gaussian noise, as well as to analyze its main parameters.

Methods. Statistical radio engineering and computer modeling methods are used according to optimal signal reception theory.

Results. The effect of the OFDM signal limitation level and the number of additional signals when using the limitation method with an additional compensation signal on the quality (reduction of transmission losses) of the OFDM signal is analyzed. The results show a decrease in the OFDM signal PAPR value, along with the dependencies of the bit error rate on the signal-to-noise ratio at fixed limitation values and a determined number of additional signals in the channel with white Gaussian noise.

Conclusions. The proposed limitation method with an additional signal when transmitting an OFDM signal in a channel with white Gaussian noise provides compensation for information losses due to signal level limitations in the transmission channel. Increasing the limitation level is shown to increase the PAPR value, while varying the number of additional signals changes PAPR insignificantly. In order to ensure the effective implementation of the limitation method with an additional compensation signal, the parameters of the threshold limitation level and number of additional signals should be selected depending on the predicted signal-to-noise ratio in the system.

Keywords: limitation method with additional signal, peak power to average power ratio, bit error rate, orthogonal frequency division multiplexing, white Gaussian noise

• Submitted: 23.01.2024 • Revised: 29.03.2024 • Accepted: 12.07.2024

For citation: Pham Th.T., Tikhonova O.V. Method for limiting the peak factor using an additional compensation signal in a system with orthogonal frequency division multiplexing for a Gaussian channel. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):42–49. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-42-49>

Financial disclosure: The authors have no financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) в настоящее время применяется для систем цифровой связи с высокой скоростью передачи данных [1–4], в т.ч. для высокоскоростной мобильной связи, беспроводных локальных сетей, видеовещания и высокоскоростной сотовой передачи данных. Одной из проблем, которую необходимо решить для более широкого применения системы OFDM, является уменьшение высокого значения пик-фактора, которое увеличивает вероятность битовых ошибок (ВБО) системы.

В статье оценивается возможность снижения значения пик-фактора с помощью метода ограничения с дополнительным сигналом для системы OFDM в канале с белым гауссовским шумом и изучаются основные параметры метода.

СИГНАЛ OFDM

Сигнал OFDM с дискретным временем может быть математически представлен как набор временных отсчетов сигнала после обратного дискретного преобразования Фурье:

$$S_{\text{OFDM}}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad n = 0, N-1, \quad (1)$$

где N – количество поднесущих, $X(k)$ представляет передаваемую информацию на k -й поднесущей, n – номер отсчета сигнала OFDM, j – мнимая единица.

Для сигнала OFDM с дискретным временем $S_{\text{OFDM}}(n)$ определим величину отношения пиковой мощности к средней мощности – пик-фактора (peak-to-average power ratio, PAPR) как отношение максимальной мощности сигнала к его средней мощности [5, 6], что можно представить в виде:

$$\text{PAPR}(S_{\text{OFDM}}(n)) = \frac{\max_n |S_{\text{OFDM}}(n)|}{P_{\text{сред}} \{ |S_{\text{OFDM}}(n)|^2 \}}, \quad (2)$$

где $\max_n |S_{\text{OFDM}}(n)|^2$ – максимальная мощность сигнала OFDM, $P_{\text{сред}} \{ |S_{\text{OFDM}}(n)|^2 \}$ – средняя мощность

сигнала OFDM, $|S_{\text{OFDM}}(n)|$ – амплитуда n -го отсчета сигнала OFDM.

Параметр PAPR оценивает величину пик-фактора сигнала, т.е. большая его величина – высокий пик-фактор – означает большую максимальную мощность.

МЕТОД ОГРАНИЧЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ СИГНАЛОМ

Разработанный авторами метод ограничения с дополнительным сигналом для OFDM-сигнала является одним из методов снижения пик-фактора [7, 8]. В этом методе амплитуды отсчетов сигнала OFDM ограничиваются при превышении определенного порогового значения, при этом сохраняется исходная фаза n -го отсчета, что можно представить в виде:

$$S_{\text{огр}}(n) = \begin{cases} S_{\text{исх}}(n) & \text{при } |S_{\text{исх}}(n)| \leq C, \\ C e^{j\phi_n} & \text{при } |S_{\text{исх}}(n)| > C, \end{cases} \quad (3)$$

где $S_{\text{огр}}$ – сигнал после ограничения сигнала OFDM; C – пороговое значение или уровень ограничения сигнала, $|S_{\text{исх}}(n)|$ – амплитуда исходного n -го отсчета сигнала, ϕ_n – фазовый угол n -го отсчета сигнала.

В методе ограничения с дополнительным сигналом для сигнала $S_{\text{OFDM}}(n)$ проводится поиск тех позиций (номера позиций обозначим p), где амплитуда сигнала больше, чем пороговое значение C . В этом случае позиции ограничиваются в соответствии с выражением (3). При передаче сигнала, ограниченного таким образом, в некоторых позициях происходит потеря информации. Для компенсации этих потерь передаваемый сигнал $S_{\text{огр}}$ дополняется отсчетами, в которые заносится информация о номерах позиций p и дополнительные данные $S_{\text{доп}}(p)$ как разности между исходными и ограниченными отсчетами, что описывается следующим выражением:

$$S_{\text{доп}}(p) = S_{\text{исх}}(p) - S_{\text{огр}}(p). \quad (4)$$

Таким образом, в передаваемом сигнале $S_{\text{огр}}$ отсутствуют отсчеты, амплитуда которых превосходит пороговое значение C , но потери информации не происходит, т.к. имеется возможность восстановить исходные отсчеты, зная их номера p и дополнительные данные $S_{\text{доп}}(p)$.

Число дополнительных отсчетов, зарезервированных для передачи номеров позиций p и значений $S_{\text{доп}}(p)$, обозначим как число дополнительных сигналов m .

Выбор значений уровня ограничения C и числа дополнительных сигналов m важен для достижения наилучшей производительности системы. Если уровень ограничения сигнала C – значительный (большое число сигналов подвергается преобразованию (3)), а возможное число дополнительных сигналов m мало, то полной компенсации не будет, и в системе будет много битовых ошибок. Большое значение m приведет к увеличению длины передаваемой информации и тем самым – к потере энергии и мощности. При незначительном уровне ограничения C и большом значении m многие дополнительные сигналы не будут нести никакой информации, т.к. число отсчетов сигнала $S_{\text{исх}}$, превосходящих ограничение, будет незначительным.

Исследование влияния параметров уровня ограничения C и числа дополнительных сигналов m на эффективность компенсации сигнала OFDM проведено с помощью математического моделирования на основе приведенных выше формул. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1, использовался математический пакет *MATLAB*¹. При заданных значениях C и m сигналы OFDM модифицируются с использованием метода ограничения с дополнительным сигналом, а затем передаются через канал с белым гауссовским шумом. На приемной

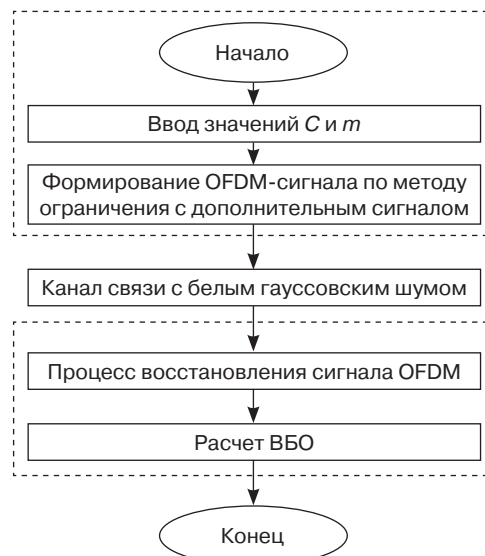


Рис. 1. Блок-схема алгоритма моделирования влияния параметров C и m на качество компенсации сигнала OFDM

стороне выполняется процесс восстановления сигнала OFDM (его демодуляция с учетом дополнительной компенсирующей информации), затем полученный массив данных сравнивается с исходным массивом для получения значения ВБО.

Блок-схема алгоритма расчета пик-фактора представлена на рис. 2. Результаты получены для двух случаев. В первом случае при фиксированной величине $m = 16$ для каждого значения C сигналы OFDM имеют ограничение в соответствии с (3);

¹ <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Дата обращения 29.03.2024. / Accessed March 29, 2024.

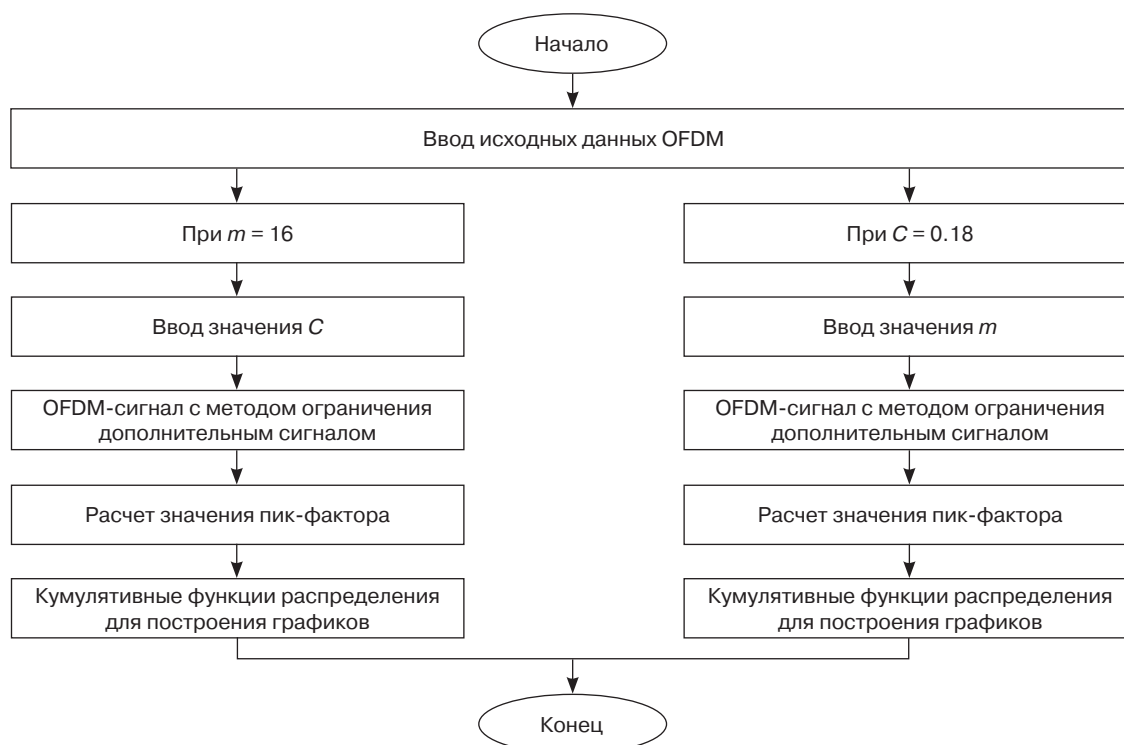


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета пик-фактора

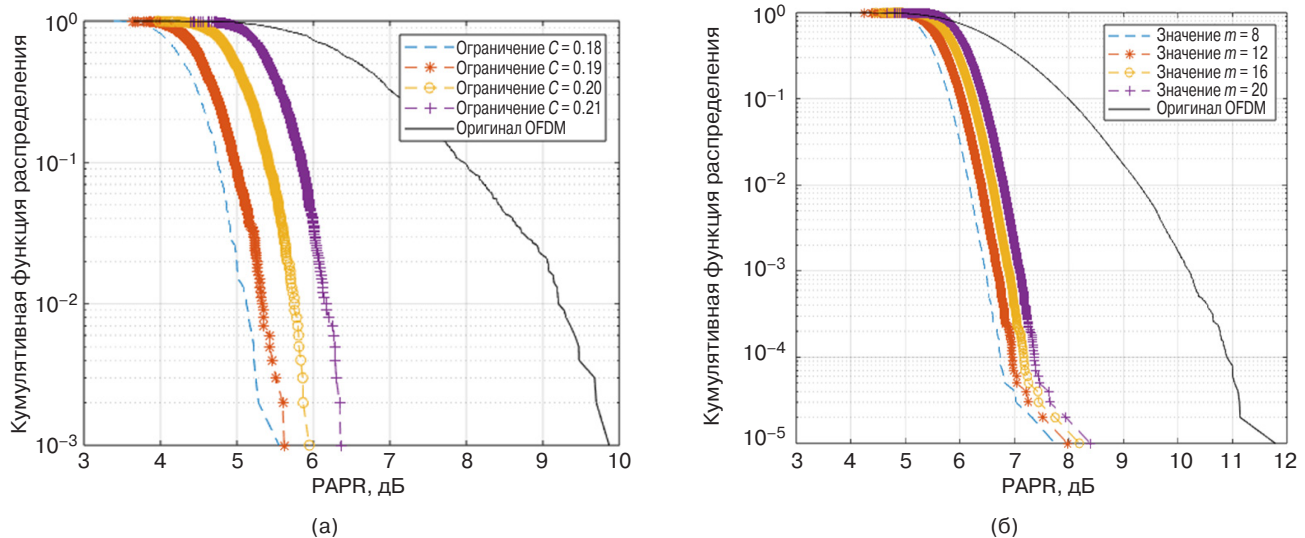


Рис. 3. Результаты снижения пик-фактора сигнала OFDM методом ограничения с дополнительным сигналом: (а) при $m = 16$, (б) при $C = 0.18$

в этом случае значение пик-фактора после ограничения сигнала OFDM рассчитывалось по формуле (2). Во втором случае при фиксированной величине $C = 0.18$ для каждого значения m проведены аналогичные расчеты. Полученные зависимости пик-фактора показаны на рис. 3а и 3б.

В результате моделирования оценено изменение величины ВБО при изменении уровня ограничения C и фиксированном m и аналогично получены зависимости ВБО при изменении значения m при фиксированном уровне C . В модели при $N = 64$ поднесущих максимальная амплитуда OFDM-сигнала равнялась 0.4229 (безразмерная величина, нормированная к 1 В), поэтому значения C выбирались меньше этой величины.

Оценено снижение пиковой мощности сигнала OFDM при ограничении с дополнительным сигналом при различных значениях параметров C и m с помощью параметра пик-фактора из соотношения (2). Для оценки эффективности снижения пик-фактора использована кумулятивная функция распределения, указывающая вероятность того, что пик-фактор сигнала OFDM превысит заданный пороговый уровень PAPR_0 .

На рис. 3а представлены результаты снижения пик-фактора с числом дополнительных сигналов $m = 16$ при различных значениях C , а на рис. 3б – результаты снижения пик-фактора при пороговом значении $C = 0.18$ при варьировании m .

Из рис. 3 видно, что при сохранении числа дополнительных сигналов m чем сильнее ограничение (величина C мала), тем меньше значение пик-фактора. При сохранении порогового значения и изменении числа дополнительных сигналов значение пик-фактора меняется незначительно.

Основным параметром, определяющим качество системы цифровой связи, является ВБО при восстановлении сигнала. Чтобы оценить производительность системы OFDM, необходимо оценить величину ВБО в зависимости от трех основных параметров: величины ограничения C , числа дополнительных сигналов m и отношения сигнал/шум (ОСШ) – отношение мощности сигнала к мощности шума в полосе пропускания) при наличии в канале белого гауссовского шума [9–11].

На рис. 4 представлены результаты расчета ВБО, которые определялись при модуляции 16-QAM сигнала OFDM в гауссовском канале при фиксации порогового значения $C = 0.18$ с различными значениями m в зависимости от уровня шумов. Для сравнения проведена оценка ВБО для стандартного метода ограничения OFDM [12–18].

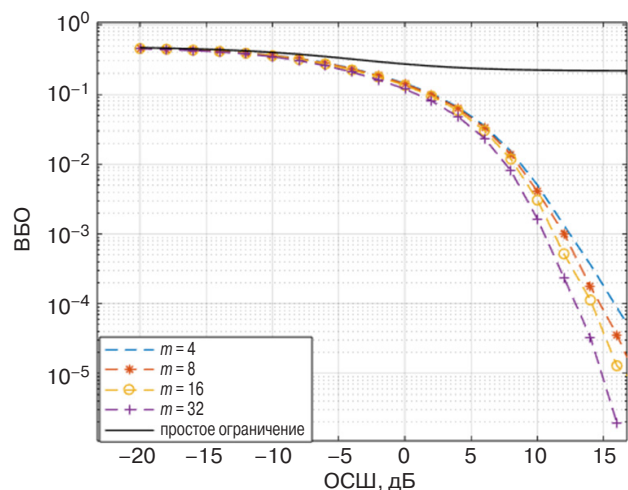


Рис. 4. Зависимость ВБО от ОСШ при фиксированном значении $C = 0.18$

Из рис. 4 видно преимущество метода ограничения с дополнительным сигналом (при уровне ограничения $C = 0.18$, когда максимальная амплитуда неограниченного сигнала равна 0.4229) перед стандартным методом ограничения пик-фактора. При увеличении значения m ВБО уменьшается.

На рис. 5 представлены результаты расчета ВБО при фиксированном числе дополнительных сигналов $m = 16$ с различными величинами порога ограничения C в зависимости от уровня шумов.

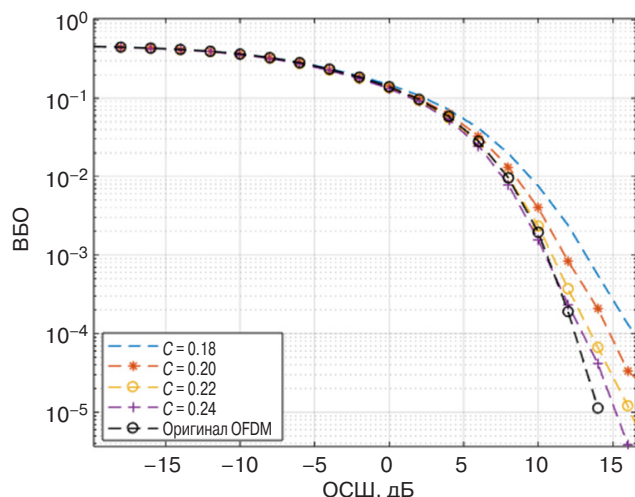
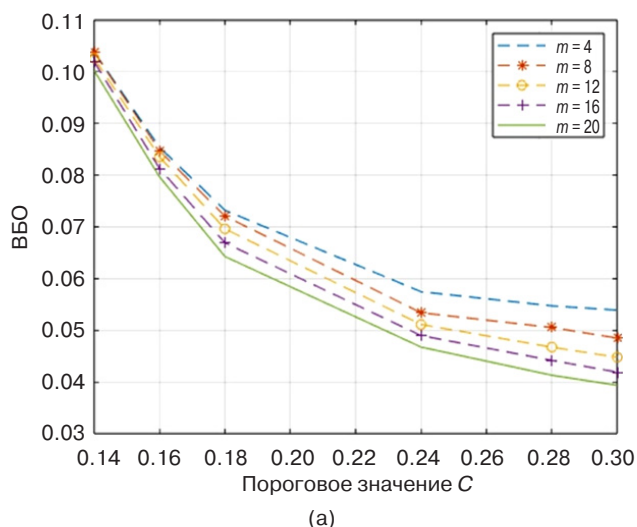


Рис. 5. Зависимость ВБО от ОСШ при фиксированном значении $m = 16$

Из рис. 5 видно, что при увеличении уровня ограничения C уменьшается ВБО. Для сравнения приведены результаты для сигнала OFDM без ограничений (оригинал OFDM). Они, естественно, лучше, но их аппаратная реализация физически неосуществима.



На рис. 6а и 6б приведены зависимости ВБО от порогового значения в гауссовском канале при ОСШ = 10 дБ и ОСШ = 15 дБ.

Анализ полученных результатов показывают, что ВБО снижается при увеличении уровня ограничения C и числа дополнительных сигналов m .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования метода ограничения с дополнительным сигналом компенсации для OFDM-сигнала в канале с белым гауссовским шумом и анализ основных его параметров позволили сделать следующие выводы:

1. При большем уровне ограничений C пик-фактор сигнала уменьшается, а при изменении числа дополнительных сигналов m пик-фактор изменяется незначительно.
2. В канале с белым гауссовским шумом для эффективной реализации метода ограничения с дополнительным сигналом компенсации необходимо выбирать уровень ограничения C и число дополнительных сигналов m в зависимости от прогнозируемого ОСШ в системе.

Вклад авторов

Т.Т. Фам – проведение расчетов, обработка результатов.

О.В. Тихонова – идея исследования, консультации по вопросам проведения всех этапов исследования.

Authors' contributions

Th.T. Pham – making calculations, processing the results.

O.V. Tikhonova – the research idea, consultations on the issues of conducting all stages of the study.

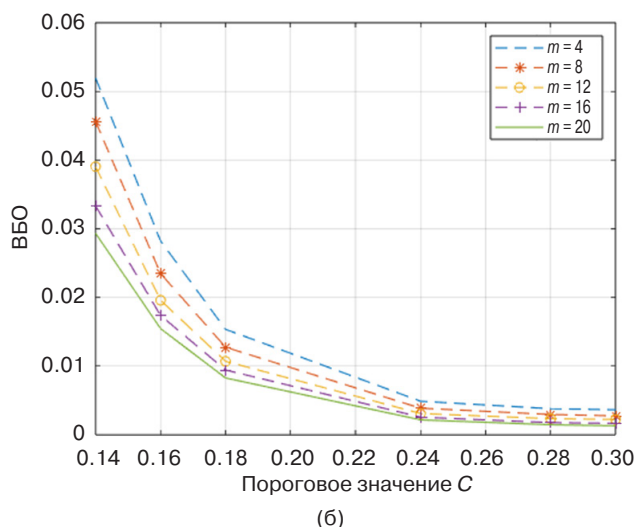


Рис. 6. Зависимость ВБО от уровня ограничения C :
(а) ОСШ = 10 дБ, (б) ОСШ = 15 дБ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев В.В., Селецкая О.Ю., Покаместов Д.А. Формирование и обработка OFDM сигналов. *Молодой ученый*. 2016;14(118):151–154. URL: <https://moluch.ru/archive/118/32800/>
2. Галустов Г.Г., Мелешкин С.Н. *Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов*: учебное пособие. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ; 2012. 80 с.
3. Van Nee R., Prasad R. *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Boston; London: Artech House; 2000. 260 p.
4. Wu Y., Zou W.Y. Orthogonal frequency division multiplexing: A multi-carrier modulation scheme. *IEEE Trans. Consumer Electronics*. 1995;41(3):392–399.
5. Луферчик П.В., Конев А.Н., Богатырев Е.В., Галеев Р.Г. Методы повышения энергетической эффективности OFDM модемов в каналах связи с частотно-селективными замираниями. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2022;23(2):189–196. <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196>
6. Hassan G.M., Mukred M., Gumaei A.H. Modified Method of PAPR Reduction using Clipping and Filtering for Image Transmission with OFDM. *Al-Mustansiriyah Journal of Science*. 2023;34(4):75–86. <https://doi.org/10.23851/mjs.v34i4.1400>
7. Фам Т.Т., Тихонова О.В. Метод ограничения с дополнительным сигналом для уменьшения значения пик-фактора в системе с ортогональным частотным разделением каналов. *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. 2023;193(2):34–38.
8. Фам Т.Т., Тихонова О.В. Метод ограничения пик-фактора сигнала OFDM с дополнительным сигналом. В сб.: Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «Радиоинформ-2023»: Сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции. М.: РТУ МИРЭА; 2023. С. 140–142.
9. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*: пер. с англ. М.: Вильямс; 2017. 1104 с.
10. Прохис Дж. *Цифровая связь*: пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь; 2000. 800 с.
11. Bairwa M.K., Porwal M.K. BER Performance of OFDM System over AWGN channel with Different Modulation Schemes. *Int. J. Eng. Tech. Res. (IJETR)*. 2014;2(8):117–119.
12. Shatrughna P.Y., Subhash C.B. PAPR Reduction using Clipping and Filtering Technique for Nonlinear Communication Systems. In: *International Conference on Computing, Communication and Automation*. IEEE; 2015. P. 1220–1225. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2015.7148590>
13. Kannadhasan S., Karthikeyan G., Indumathi G. PAPR Reduction in OFDM Systems using Adaptive Active Constellation Extension Algorithm. *Int. J. Innov. Res. Computer and Commun. Eng. (IJIRCCE)*. 2013;1(4):950–957.
14. Пукса А.О. Уменьшение пик-фактора OFDM-сигнала с помощью методов, основанных на ограничении сигналов. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017;12(66):124–127. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.145>
15. Wang L., Tellambura C. A simplified clipping and filtering technique for PAPR reduction in OFDM systems. *IEEE Signal Processing Letters*. 2005;12(6):453–456. <https://doi.org/10.1109/LSP.2005.847886>
16. Tellambura C., Jayalath A.D.S. PAR reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences. In: *IEEE 54th Vehicular Technology Conference. VTC Fall 2001. Proceedings*. IEEE; 2001. P. 465–469. <https://doi.org/10.1109/VTC.2001.956642>
17. Kumar P., Ahuja A.K., Chakka R. BCH/hamming/cyclic coding techniques: comparison of PAPR-reduction performance in OFDM systems. In: *International Conference on Intelligent Computing and Applications*. Springer; 2018. P. 557–566. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5520-1_50
18. Han S.H., Lee J.H. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission. *IEEE Wireless Commun.* 2005;12(2):56–65. <https://doi.org/10.1109/MWC.2005.1421929>

REFERENCES

1. Kovalev V.V., Seletskaia O.Yu., Pokamestov D.A. Formation and processing of OFDM signals. *Molodoi uchenyi = Young scientist*. 2016;14(118):151–154 (in Russ.). Available from URL: <https://moluch.ru/archive/118/32800/>
2. Galustov G.G., Meleshkin S.N. *Mul'tipleksirovanie s ortogonal'nym chastotnym razdeleniem signalov (Multiplexing with Orthogonal Frequency Division of Signals)*: textbook. Taganrog: TTI SFU; 2012. 80 p. (in Russ.).
3. Van Nee R., Prasad R. *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Boston; London: Artech House; 2000. 260 p.
4. Wu Y., Zou W.Y. Orthogonal frequency division multiplexing: A multi-carrier modulation scheme. *IEEE Trans. Consumer Electronics*. 1995;41(3):392–399.
5. Luferchik P.V., Konev A.N., Bogatyrev E.V., Galeev R.G. Methods for improving the energy characteristics of OFDM modems in frequency selective fading communication channels. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal = Siberian Aerospace Journal*. 2022;23(2):189–196 (in Russ.). <https://doi.org/10.31772/2712-8970-2022-23-2-189-196>
6. Hassan G.M., Mukred M., Gumaei A.H. Modified Method of PAPR Reduction using Clipping and Filtering for Image Transmission with OFDM. *Al-Mustansiriyah Journal of Science*. 2023;34(4):75–86. <https://doi.org/10.23851/mjs.v34i4.1400>
7. Pham Th.T., Tikhonova O.V. Limitation method with an additional signal to PAPR reduction in the system with orthogonal frequency division of channels. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM = Electromechanical Matters. VNIEM Studies*. 2023;193(2):34–38 (in Russ.).

8. Pham Th.T., Tikhonova O.V. Method for limiting the peak factor of an OFDM signal with an additional signal. In: *Actual Problems and Prospects for the Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems Radioinfocom-2023: Collection of Scientific Articles of the 7th International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2023. P. 140–142 (in Russ.).
9. Sklar B. Tsifrovaya svyaz'. *Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye (Digital Communication. Theoretical Foundations and Practical Application)*: transl. from Engl. Moscow: Vil'yams; 2017. 1100 p. (in Russ.). [Sklar B. *Digital Communication: Fundamentals and Applications*. Prentice-Hall PTR; 2001. 1079 p.]
10. Proakis J. Tsifrovaya svyaz' (Digital Communication): transl. from Engl. Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 800 p. (in Russ.). [Proakis J. *Digital Communications*. N.Y.: McGraw-Hill Publ.; 1995. 928 p.]
11. Bairwa M.K., Porwal M.K. BER Performance of OFDM System over AWGN channel with Different Modulation Schemes. *Int. J. Eng. Tech. Res. (IJETR)*. 2014;2(8):117–119.
12. Shatrughna P.Y., Subhash C.B. PAPR Reduction using Clipping and Filtering Technique for Nonlinear Communication Systems. In: *International Conference on Computing, Communication and Automation*. IEEE; 2015. P. 1220–1225. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2015.7148590>
13. Kannadhasan S., Karthikeyan G., Indumathi G. PAPR Reduction in OFDM Systems using Adaptive Active Constellation Extension Algorithm. *Int. J. Innov. Res. Computer and Commun. Eng. (IJIRCCE)*. 2013;1(4):950–957.
14. Puksa A.O. Reduction of peak-factor of OFDM signal by methods based on signal limitation. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = Int. Res. J.* 2017;12(66):124–127 (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.145>
15. Wang L., Tellambura C. A simplified clipping and filtering technique for PAPR reduction in OFDM systems. *IEEE Signal Processing Letters*. 2005;12(6):453–456. <https://doi.org/10.1109/LSP.2005.847886>
16. Tellambura C., Jayalath A.D.S. PAR reduction of an OFDM signal using partial transmit sequences. In: *IEEE 54th Vehicular Technology Conference. NTC Fall 2001. Proceedings*. IEEE; 2001. P. 465–469. <https://doi.org/10.1109/VTC.2001.956642>
17. Kumar P., Ahuja A.K., Chakka R. BCH/hamming/cyclic coding techniques: comparison of PAPR-reduction performance in OFDM systems. In: *International Conference on Intelligent Computing and Applications*. Springer; 2018. P. 557–566. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5520-1_50
18. Han S.H., Lee J.H. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission. *IEEE Wireless Commun.* 2005;12(2):56–65. <https://doi.org/10.1109/MWC.2005.1421929>

Об авторах

Фам Тхань Туан, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: anhsequayve.ru@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-7430-1779>

Тихонова Ольга Вадимовна, д.т.н., старший научный сотрудник, профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиоэлектроники и информатики, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: o_tikhonova@inbox.ru. Scopus Author ID 57208923772, SPIN-код РИНЦ 3362-9924, <https://orcid.org/0009-0009-4013-9182>

About the authors

Pham Thanh Tuan, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: anhsequayve.ru@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0000-7430-1779>

Olga V. Tikhonova, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: o_tikhonova@inbox.ru. Scopus Author ID 57208923772, RSCI SPIN-code 3362-9924, <https://orcid.org/0009-0009-4013-9182>

УДК 532.6, 53.06, 535.016

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-50-62>

EDN LYDJK



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние обработки поверхностными электромагнитными волнами на рефрактивные свойства тонких пленок на основе оксидов индия и олова с лазерно-осажденными одностенными углеродными нанотрубками

А.С. Тойка ^{1, 2, @},
Н.В. Каманина ^{1, 2, 3, 4}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург, 197022 Россия

² НИЦ Курчатовский институт – Петербургский институт ядерной физики «ПЯФ», Гатчина,
188300 Россия

³ НПО ГОИ им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, 192171 Россия

⁴ ГОИ им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, 199053 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: astoikka.nano@gmail.com

Резюме

Цели. Цель работы – исследование влияния обработки поверхностными электромагнитными волнами (ПЭВ) тонких проводящих пленок на основе оксидов индия и олова (indium tin oxides, ITO) с лазерно-осажденными одностенными углеродными нанотрубками (УНТ) на рефрактивные свойства, оценка эффективной толщины слоя лазерно-осажденных УНТ до и после ПЭВ-обработки.

Методы. Для формирования структур использовался метод лазерно-ориентированного осаждения с применением CO₂-лазера ($\lambda = 10.6$ мкм). Диагностика модификаций тонких пленок ITO осуществлялась при помощи эллипсометра в спектральном диапазоне 300–1000 нм. Для описания оптических свойств подложек крон К8 и тонких пленок ITO использовалась модель Коши. Для интерпретации результатов эллипсометрии модификаций ITO с УНТ была введена модель виртуального слоя с эффективной толщиной. При постобработке поверхности использовался CO₂-маркер ($\lambda = 10.6$ мкм) для генерации ПЭВ. Оценка влияния ПЭВ-обработки на толщину виртуального слоя проводилась при помощи эллипсометрии и атомно-силовой микроскопии в контактном режиме.

Результаты. На основе данных эллипсометрии установлено, что эффективная толщина слоя УНТ находилась в диапазоне 24–26 нм. После ПЭВ-обработки толщина эффективного слоя УНТ снизилась до 4–8 нм. При осаждении УНТ на поверхность ITO и последующей ПЭВ-обработке поверхности снижаются потери на отражение для р-поляризованного излучения. В спектральном диапазоне 400–750 нм при угле падения относительно нормали к плоскости структур 65° наблюдается снижение отражения с 18.5% до 13.5% относительно ITO без УНТ и ПЭВ-обработки, при 71° – снижение с 6.4% до 4.7%, при 77° – снижение с 1.8% до 1.2%.

Выводы. Для тонких пленок на основе ИТО с лазерно-осажденными УНТ доступен метод ПЭВ-обработки, которая позволяет сохранить просветляющие свойства УНТ и обеспечивает прецизионное снижение толщины композитной структуры. Указанные возможности позволяют использовать исследуемые модификации ИТО в задачах оптической электроники, микрофлюидики и биомедицины.

Ключевые слова: оксиды индия и олова, углеродные нанотрубки, лазерное воздействие, обработка поверхностными электромагнитными волнами

• Поступила: 05.02.2024 • Доработана: 14.03.2024 • Принята к опубликованию: 12.07.2024

Для цитирования: Тойкка А.С., Каманина Н.В. Влияние обработки поверхностными электромагнитными волнами на рефрактивные свойства тонких пленок на основе оксидов индия и олова с лазерно-осажденными одностенными углеродными нанотрубками. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):50–62. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-50-62>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Effect of surface electromagnetic wave treatment on the refractive properties of thin films based on indium tin oxides with laser-deposited single-walled carbon nanotubes

Andrei S. Toikka^{1, 2, @},
Natalia V. Kamanina^{1, 2, 3, 4}

¹ St. Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, 197022 Russia

² Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center “Kurchatov institute”, Gatchina, 188300 Russia

³ Scientific and Production Corporation “S.I. Vavilov State Optical Institute”, St. Petersburg, 192171 Russia

⁴ Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg, 199053 Russia

@ Corresponding author, e-mail: astoikka.nano@gmail.com

Abstract

Objectives. The article investigates the effect of surface electromagnetic wave (SEW) treatment on the refractive properties of thin conducting films based on indium tin oxide (ITO) with laser-deposited single-walled carbon nanotubes (CNTs). The effective thickness of the layer of laser-deposited CNTs before and after SEW treatment is evaluated.

Methods. A laser-oriented deposition method employing a CO₂ laser ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) was used to form the structures. Diagnostics of modifications of ITO thin films were carried out using an ellipsometer operating in the spectral range of 300–1000 nm. The Cauchy model was used to describe the optical properties of K8 crown substrates and ITO thin films. To interpret the ellipsometry results of ITO modifications with CNTs, an effective-thickness virtual layer model was introduced. During post-processing of the surface, a CO₂ marker ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) was used to generate SEW. The influence of SEW treatment on the thickness of the virtual layer was assessed using ellipsometry and atomic force microscopy in contact mode.

Results. Based on the ellipsometry data, the effective thickness of the CNT layer was in the range of 24–26 nm. Following SEW treatment, the thickness of the effective CNT layer decreased to 4–8 nm, indicating the possibility of precision processing of the ITO surface with CNTs using SEW. When CNTs are deposited on an ITO surface with subsequent SEW treatment of the surface, reflection losses for p-polarized radiation are reduced. In a spectral range of 400–750 nm at an angle of incidence relative to the normal to the plane of structures $\alpha = 65^\circ$, a decrease in reflection is observed from 18.5% to 13.5% relative to ITO without CNTs and SEW treatment; at $\alpha = 71^\circ$, a decrease from 6.4% to 4.7% is observed; at $\alpha = 77^\circ$, a decrease from 1.8% to 1.2%.

Conclusions. For ITO-based thin films with laser-deposited CNTs, the described SEW treatment method provides a precise reduction in the thickness of the composite structure while preserving the antireflective properties of the CNTs. These capabilities make it possible to use the studied ITO modifications in solving problems in optical electronics, microfluidics, and biomedicine.

Keywords: indium tin oxides, carbon nanotubes, laser exposure, surface electromagnetic wave treatment

• Submitted: 05.02.2024 • Revised: 14.03.2024 • Accepted: 12.07.2024

For citation: Toikka A.S., Kamanina N.V. Effect of surface electromagnetic wave treatment on the refractive properties of thin films based on indium tin oxides with laser-deposited single-walled carbon nanotubes. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):50–62. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-50-62>

Financial disclosure: The authors have no financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Оксиды индия и олова (indium tin oxides, ИТО) – это вырожденные полупроводники с проводимостью n -типа [1–3]. Их свойства в значительной степени зависят от стехиометрического состава $(\text{In}_2\text{O}_3)_x-(\text{SnO}_2)_{1-x}$. Известно, что SnO_2 используется для увеличения концентрации электронов (N). Было показано [1], что в чистой матрице In_2O_3 ($x = 0$) концентрация электронов $n_e = 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. В диапазоне $0.02 < x < 0.15$ значение N возрастает вплоть до $9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Дальнейшее увеличение содержания SnO_2 не является целесообразным, т.к. снижается подвижность носителей заряда μ [1].

Критерий сравнения параметров пленок ИТО зависит от области применения. При рассмотрении ИТО в качестве электрических контактов необходимо минимизировать удельное сопротивление ρ . В случае ИТО значение данного параметра варьируется в пределах 10^{-4} – $10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ [1–3]. Помимо варьирования стехиометрического состава ИТО, для оптимизации электрических свойств могут использоваться варьирование нагрева подложек при осаждении [2], выбор типов рабочих газов и их парциальных давлений [3–5], а также использование разных мишеней [6].

В ряде случаев, например, в фотовольтаике [7] и в жидкокристаллической оптике [8], к низкому электрическому сопротивлению добавляется требование высокого оптического пропускания. В видимой и ближней инфракрасных (ИК) областях спектра данное требование выполняется, т.к. ИТО в этом диапазоне обладает относительно низким коэффициентом экстинкции k , а оптические потери обусловлены, в основном, отражением [9].

Оксиды индия и олова являются также востребованными структурами в ИК-оптике в виду наличия плазменного резонанса электронного газа в этом диапазоне. Отметим, что плазменная частота $\omega_{\text{пл}}$ и частота демпфирования γ зависят от концентрации и подвижности носителей заряда, соответственно [10]. При варьировании указанных параметров доступно получение спектральных областей с отрицательным значением диэлектрической проницаемости, что находит ряд применений: в модуляторах [11], солнечных элементах [12] и сенсорах [13].

Таким образом, применение ИТО в значительной степени определяется концентрацией и подвижностью электронов. Одной из стратегий для улучшения характеристик ИТО является использование композитных материалов с наноструктурами, при помощи которых удастся снизить электрическое сопротивление и перестраивать ширину запрещенной зоны [14–16].

Существенных результатов удалось добиться при лазерно-ориентированном осаждении углеродных нанотрубок (УНТ) на поверхность ИТО [17–19]. Было показано, что УНТ способствуют увеличению оптического пропускания, улучшению механической и лазерной прочности, а также снижению электрического сопротивления тонких пленок ИТО. На основе данных атомно-силовой микроскопии [19] было определено, что УНТ осаждаются в виде кластеров.

Для моделирования разрабатываемых электрооптических устройств, где одним из ключевых элементов является структурированный ИТО-слой, необходимо учитывать базовые свойства слоя УНТ, в т.ч. и его толщину. Так как данный материал осаждается не в виде сплошного слоя, то возникает необходимость

проведения отдельного исследования, посвященного определению толщины слоя УНТ. В настоящей работе в качестве метода диагностики была выбрана эллипсометрия, поскольку данный подход является неразрушающим и может исследовать относительно большие апертуры. В ходе текущего исследования также исследовался вопрос прецизионного изменения толщины слоя УНТ. В качестве механизма изменения толщины была выбрана обработка поверхностными электромагнитными волнами (ПЭВ).

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Формирование тонких пленок ИТО на стеклянных подложках марки крон К8 (АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Россия) осуществлялось методом лазерно-ориентированного осаждения [17] с использованием CO₂-лазера (Лазерный центр, Россия), длина волны $\lambda = 10.6$ мкм; мощность $P \approx 30$ Вт, диаметр пучка $d = 5$ мм). Источником ИТО служили гранулы марки Segas, Inc. (США) со стехиометрическим составом (In₂O₃)_{0.9}–(SnO₂)_{0.1}. Средняя толщина рассматриваемых ИТО пленок составляла 80–100 нм со среднеквадратичной шероховатостью Sq менее 2 нм. Затем на часть образцов с пленками ИТО методом лазерно-ориентированного осаждения наносились одностенные УНТ марки Aldrich (США), No. 704121, хиральность $<7.6>$. В процессе осаждения УНТ использовалось управляющее поле со средней напряженностью 100 В/см. Это необходимо для увеличения кинетической энергии УНТ и для их последующей имплантации на поверхность материала [17–19].

Контроль толщины и шероховатости пленок осуществлялся при помощи атомно-силового микроскопа NT-MDT Solver Next (НТ-МДТ, Россия) контактный режим, частота сканирования 1 Гц. Исследование рефрактивных свойств проходило на эллипсометре J.A. Woolam M-2000RCE (J.A. Woolam, США) со встроенным программным обеспечением CompleteEASE¹ (версия 4.91). Для этого в диапазоне 300–1000 нм измерялись комплексные показатели отражения для s- и p-поляризованного излучения (r_p и r_s соответственно). Затем, согласно уравнению эллипсометрии (1), определялись эллипсометрические параметры ψ и Δ на основе измеренных комплексных коэффициентов отражения $\dot{r}_p$ и $\dot{r}_s$ и разности фаз при отражении от границы раздела δ_p и δ_s [20]²:

$$\frac{\dot{r}_p}{\dot{r}_s} = \frac{|\dot{r}_p|}{|\dot{r}_s|} e^{j(\delta_p - \delta_s)} = \operatorname{tg} \psi e^{j\Delta}. \quad (1)$$

Данное выражение используется в формализме Джонса, а параметры r_p и r_s соответствуют диагональным элементам матрицы Джонса [20], которые справедливы для полностью поляризованного излучения. Во избежание излишних артефактов при интерпретации результатов эллипсометрии был использован формализм Стокса – Мюллера, который позволяет учитывать степень P при взаимодействии излучения с исследуемыми образцами [20]. При данном подходе матрицы Стокса выходного и входного излучения связаны при помощи матрицы Мюллера $\mathbf{M}^2$:

$$\mathbf{M} = R \begin{bmatrix} 1 & -PN & 0 & 0 \\ -PN & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & PC & PS \\ 0 & 0 & -PS & PC \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Параметры N , C , S связаны с эллипсометрическими углами ψ и Δ ²:

$$\begin{cases} N = \cos 2\psi, \\ C = \sin 2\psi \cos \Delta, \\ S = \sin 2\psi \sin \Delta. \end{cases} \quad (3)$$

Нормировка указанных параметров происходит по коэффициенту отражения по интенсивности:

$$R = \frac{1}{2} (\dot{r}_s \dot{r}_s^* + \dot{r}_p \dot{r}_p^*) = \frac{R_s + R_p}{2}. \quad (4)$$

В выражении (3) R_s и R_p соответствуют коэффициентам отражения по интенсивности для s- и p-типа поляризации соответственно. При анализе спектральных зависимостей $\dot{r}_p$ и $\dot{r}_s$, а также их комплексно сопряженных величин $\dot{r}_p^*$ и $\dot{r}_s^*$, необходимо учитывать комплексные показатели преломления ($\dot{n}_i$) соответствующих сред [20]:

$$\begin{cases} \dot{n}_i = n_i + jk_i, \\ \dot{r}_p = \frac{\dot{n}_1 \cos \varphi_0 - \dot{n}_0 \cos \varphi_1}{\dot{n}_1 \cos \varphi_0 + \dot{n}_0 \cos \varphi_1} = |\dot{r}_p| e^{j\delta_p}, \\ \dot{r}_s = \frac{\dot{n}_1 \cos \varphi_0 - \dot{n}_1 \cos \varphi_1}{\dot{n}_1 \cos \varphi_0 + \dot{n}_1 \cos \varphi_1} = |\dot{r}_s| e^{j\delta_s}. \end{cases} \quad (5)$$

Параметр n – показатель преломления среды, k – коэффициент экстинкции. Излучение распространяется в среде с $i = 0$ и отражается от границы раздела с $i = 1$, где i – порядковый номер среды. Таким образом, комплексный показатель исследуемых структур связан с амплитудами и фазами

¹ <https://www.jawoolam.com/ellipsometry-software/completeease>. Дата обращения 21.04.2024. / Accessed April 21, 2024.

² Complete EASE: Data Analysis Manual (version 4.63). J.A. Wollam Co., Inc. 2011. 410 p.

комплексных коэффициентов отражения (4), которые измеряются эллипсометром. При помощи выражения (1) определяются эллипсометрические параметры ψ и Δ , которые позволяют определить компоненты матрицы Мюллера (2)–(3). Для определения показателей преломления подложек крон К8, тонких пленок ИТО и их модификаций необходимо решить обратную задачу эллипсометрии. Задача сводится к подбору таких значений параметров показателей преломления, коэффициентов экстинкции и толщин материалов, при которых значения N , C , S , полученные с помощью выбранной модели, будут иметь наименьшее расхождение с экспериментальными данными. Для этого была использована минимизация среднеквадратичной ошибки (mean square error, MSE) (сноска 2):

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{3n-m} \times \sum_{l=1}^n [(N_l^{\text{мод}} - N_l^{\text{эксп}})^2 + (C_l^{\text{мод}} - C_l^{\text{эксп}})^2 + (S_l^{\text{мод}} - S_l^{\text{эксп}})^2]} \quad (6)$$

Параметр n – соответствует количеству итераций (в спектральном диапазоне 300–1000 нм источники на эллипсометре имеют 710 итераций длин волн), m – количество параметров заполнения. Для характеристики подложек крон К8 необходимо знать зависимости показателя преломления и экстинкции, а также шероховатость ($m = 3$). Для модификаций ИТО, помимо перечисленных параметров, неизвестна также толщина ($m = 4$). Индекс l – номер итерации, «мод» и «эксп» – обозначение данных на основе аппроксимации (модели) и эксперимента, соответственно.

Для аппроксимации показателя преломления подложек крон К8 и ИТО в спектральном диапазоне 300–1000 нм была выбрана модель Коши [21]:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}. \quad (7)$$

Данная модель с высокой степенью достоверности описывает показатель преломления ИТО в выбранном диапазоне [22].

При осаждении УНТ на поверхность ИТО необходимо учесть, что данные наночастицы наносятся кластерами, а не в виде сплошных слоев [19]. Однако для интерпретации результатов необходимо значение толщины слоя УНТ. Для этого введем значение эффективной толщины $h_{\text{эфф}}$ слоя УНТ со следующими допущениями:

1. Параметр эффективной толщины $h_{\text{эфф}}$ возрастает с увеличением плотности осаждения и со снижением расстояния между осажденными кластерами УНТ;
2. Экстинкция $k = f(\lambda)$ и показатель преломления $n = f(\lambda)$ данного слоя фиксированы и не зависят от обработки;
3. Оптические свойства на границе раздела «виртуальный слой – ИТО» изменяются скачкообразно.

Указанный подход можно сопоставить с приближением сплошной среды (effective media approximation, ЕМА) Брюггемана, в которой толщина слоя $h_{\text{ЕМА}}$ фиксируется, а варьируемым параметром является процентное содержание компонентов, в частности, компонент 1 – воздух, компонент 2 – материал [20]. В приближении эффективной толщины содержание компонента принимается за 100% ($P_{\text{УНТ}} = 1$), а варьируемым параметром является эффективная толщина $h_{\text{эфф}}$. Наглядное сравнение подходов представлено на рис. 1.

В качестве референтных данных для описания n и k УНТ были использованы результаты работы [23]. Интерпретация результатов эллипсометрии структур УНТ/ИТО/крон К8 выполнялась после определения параметров заполнения структур крон К8 и ИТО/крон К8. При работе со слоем УНТ была использована модель виртуального слоя, показатель преломления и коэффициенты экстинкции в диапазоне 300–1000 нм были импортированы из данных [23], параметром заполнения служила толщина эффективного слоя.

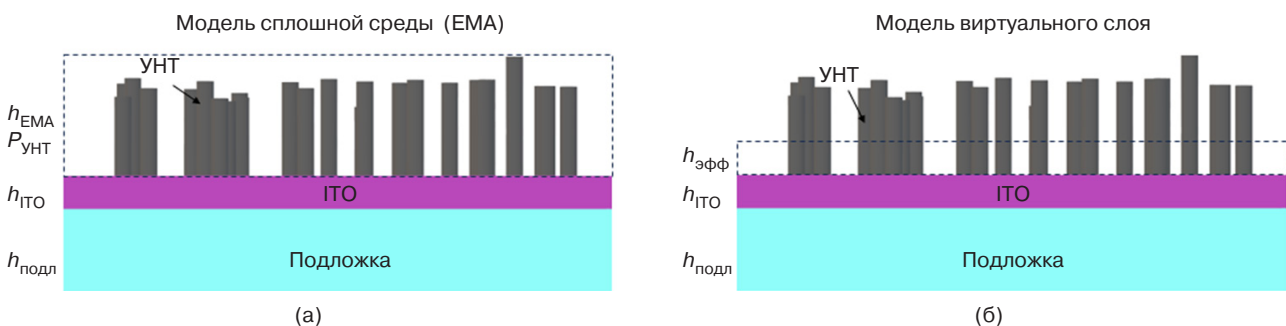


Рис. 1. Интерпретация слоев на основе УНТ:
(а) модель сплошной среды, (б) модель виртуального слоя.
 $h_{\text{ИТО}}$ – толщина тонкой пленки ИТО, $h_{\text{подл}}$ – толщина подложки

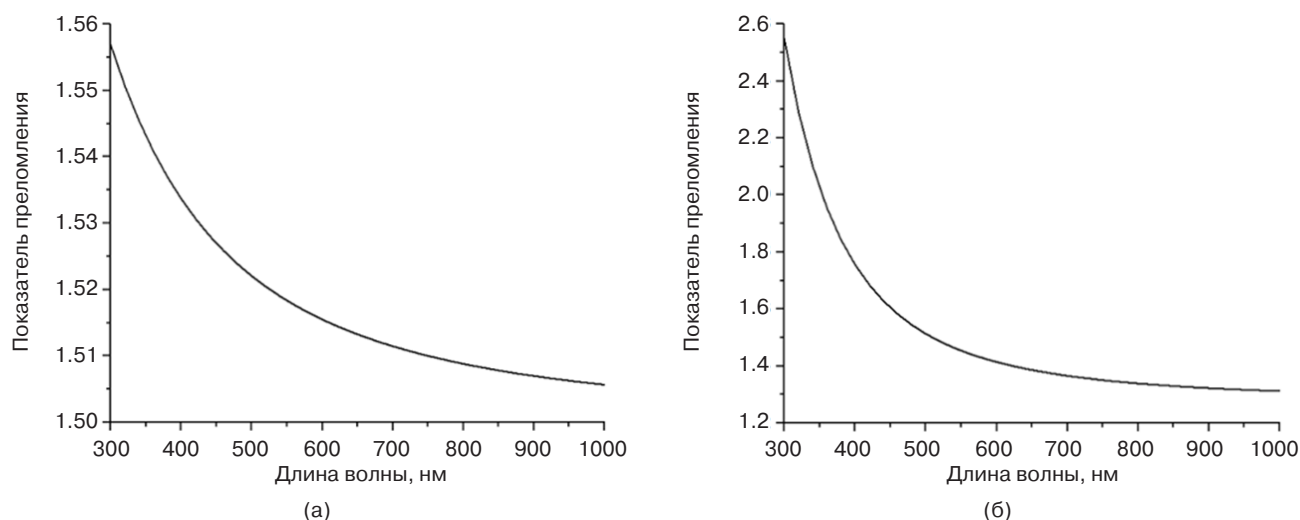


Рис. 2. Спектральные зависимости показателя преломления:
(а) подложек крон К8, (б) тонких пленок ИТО

После диагностики структур на основе ИТО с УНТ часть образцов подвергалась лазерной обработке на CO_2 -маркере ($\lambda = 10.6$ мкм, частота модуляции – 1 кГц, диаметр пучка – 150 мкм, частота обработки – 50 мм/с, мощность – 21 Вт).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно ранее описанным процедурам были последовательно определены спектральные зависимости показателя преломления подложек крон К8 и тонких пленок ИТО, осажденных на подложки крон К8 (рис. 2). В спектральном диапазоне 300–1000 нм параметры заполнения Коши для подложек крон К8 равнялись: $A = 1.550$, $B = 0.00541$ и $C = -9.153 \cdot 10^{-7}$ (рис. 2а), для тонких пленок ИТО: $A = 1.506$, $B = 0.085$ и $C = -3.72 \cdot 10^{-8}$ (рис. 2б). На основе рис. 2а можно сделать вывод, что дисперсия показателя преломления отрицательная, в видимом диапазоне показатель преломления варьируется в диапазоне 1.51–1.54, что является типичным для стекол марки «крон»³. Отметим, что оптические параметры ИТО зависят от стехиометрического состава, способов и режимов нанесения, температуры отжига, а также от постобработки. Несмотря на это, данные на рис. 2б можно качественно сопоставить с результатами, полученными в [22], и найти близкое соответствие.

Исследуемые структуры ИТО являются тонкопленочными, что проявляется в виде интерференционных экстремумов (рис. 3). Спектральные зависимости измерялись при трех углах падения ($\alpha = 65^\circ$, 71° и 77°), которые превышают угол Брюстера $\theta_{\text{Бр}}$. В случае ИТО значение $\theta_{\text{Бр}}$ в видимом диапазоне спектра варьируется

в пределах 60.6° – 64.1° . Подобный выбор углов падения позволяет работать с крутым участком зависимости $R_p = f(\alpha)$, снизить соотношение «шум/отраженный сигнал», и тем самым, более достоверно интерпретировать результаты эллипсометрии.

Данные на рис. 3 иллюстрируют только амплитудные значения коэффициентов отражения, которыми оперируют при сравнении структур в контексте их применения. Для определения толщины пленок ИТО оптическим методом, воспользуемся эллипсометрическими параметрами ψ и Δ (рис. 4), а также выполним процедуры, указанные в п. 1.

На основе измеренных зависимостей коэффициентов отражения (рис. 3), рассчитанных эллипсометрических параметров (рис. 4), известных рефрактивных свойств (рис. 2), было установлено, что минимуму MSE соответствует толщина ИТО, равная 87 нм.

При осаждении УНТ количество экстремумов в спектральных зависимостях коэффициентов отражения увеличивается (рис. 5), что связано с увеличением оптической длины.

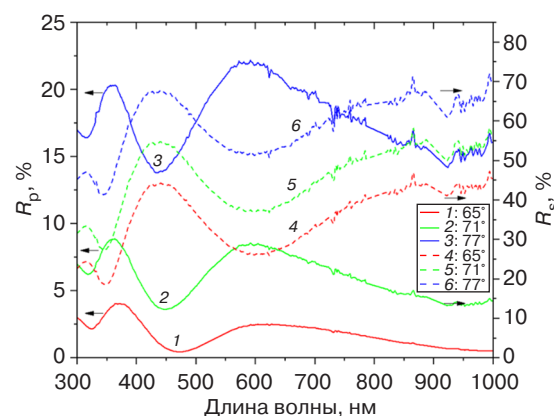


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициентов отражения тонких пленок ИТО на стекле в диапазоне 300–1000 нм при разных углах падения: 65° , 71° и 77°

³ GLASS – glasses, Refractive index database. <https://refractiveindex.info/>. Дата обращения 21.04.2024. / Accessed April 21, 2024.

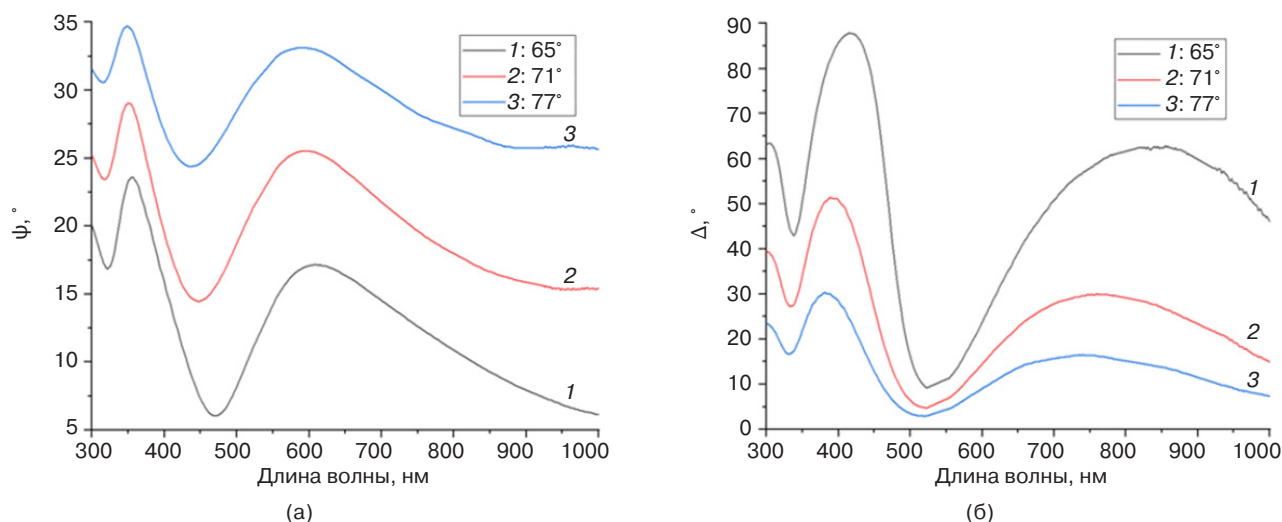


Рис. 4. Спектральные зависимости эллипсометрических параметров ψ (а) и Δ (б) пленок ИТО на подложке крон К8 в диапазоне 300–1000 нм при разных углах падения: 65°, 71° и 77°

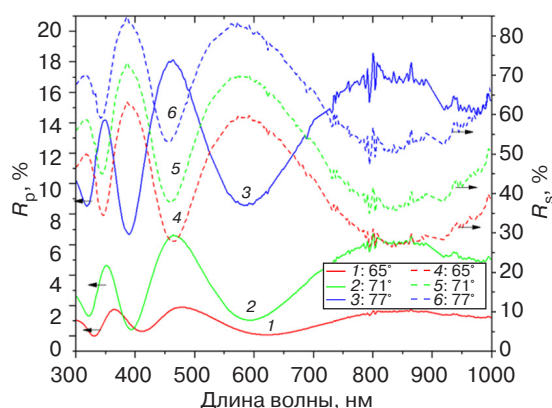


Рис. 5. Спектральные зависимости коэффициентов отражения тонких пленок ИТО с лазерно-осажденными УНТ на подложке крон К8 в диапазоне 300–1000 нм при разных углах падения: 65°, 71° и 77°

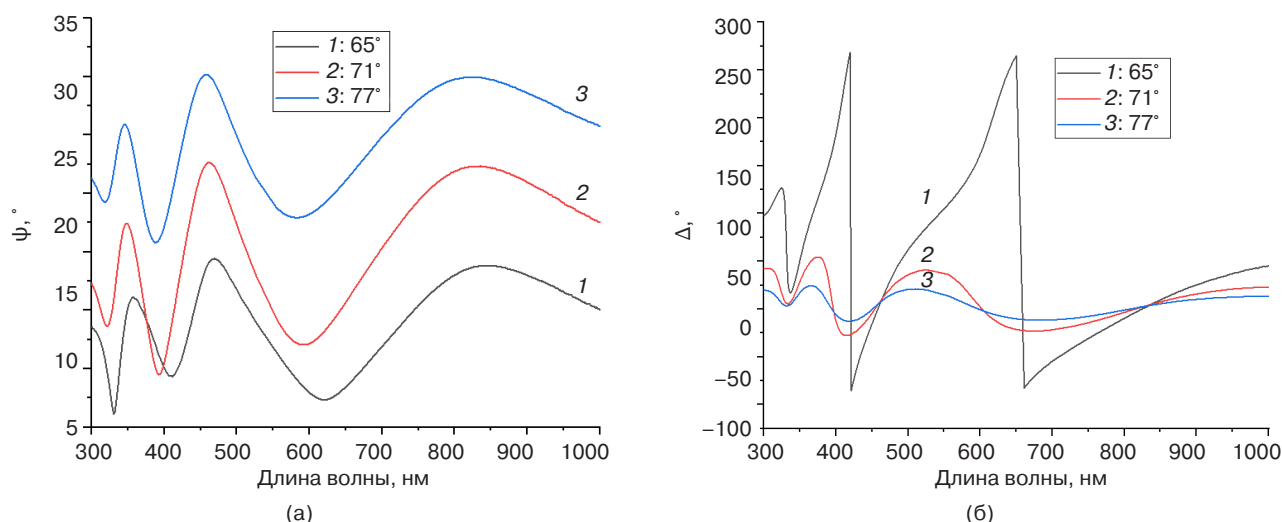


Рис. 6. Спектральные зависимости эллипсометрических параметров ψ (а) и Δ (б) пленок ИТО с УНТ на подложке крон К8 в диапазоне 300–1000 нм при разных углах падения: 65°, 71° и 77°

Примечательно, что значение коэффициента отражения при осаждении УНТ снижается. Так, например, значения локальных максимумов R_p при $\alpha = 65^\circ$ в случае ИТО составляли 20.3% ($\lambda = 358.3$ нм) и 22.0% ($\lambda = 591.4$ нм), а в случае ИТО с УНТ – 14.2% ($\lambda = 348.5$ нм) и 18.1% ($\lambda = 463.3$ нм). Более подробное сравнение приведено в таблице.

Для определения эффективной толщины слоя УНТ необходимо учесть эллипсометрические параметры (рис. 6). Затем принять во внимание толщину слоя ИТО (87 нм), посчитанную на предыдущем этапе, а также выполнить процедуру, описанную в п. 1. Минимуму MSE в данном случае соответствует эффективная толщина слоя УНТ в диапазоне 22–24 нм.

Отметим, что эффективная толщина слоя УНТ зависит от плотности осаждения кластеров и их размеров, которые определяются режимом их нанесения на поверхность ИТО. Требуемый эффект от

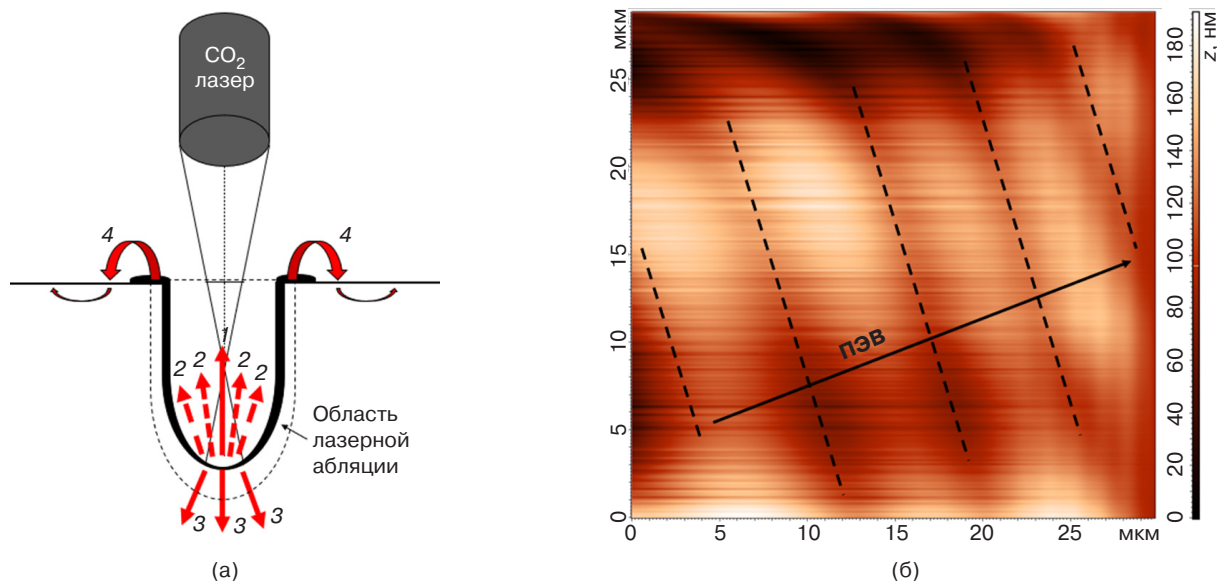


Рис. 7. Обработка ПЭВ: (а) схема обработки: 1 – зеркально-отраженный поток, 2 – диффузно-отраженный поток, 3 – поток преломленного излучения, 4 – ПЭВ; (б) профиль атомно-силовой микроскопии поверхности ИТО в области ПЭВ-обработки

слоя УНТ на поверхности ИТО может быть разным, а именно, перестройка спектральных свойств, формирование ориентирующего эффекта или изменение свободной поверхностной энергии [17, 24]. Как правило, изменяются сразу несколько параметров, например, поверхностная энергия и коэффициент пропускания (в т.ч. за счет интерференции и формирования комплекса с переносом заряда). Иногда требуется обратная процедура – уменьшение толщины тонких пленок, например, исходя из требований к оптическому согласованию функциональных слоев оптоэлектронных устройств.

В ряде случаев становится возможным обрабатывать поверхность ИТО при помощи ПЭВ [25]. При данном методе обработки ПЭВ распространяется вдоль границы раздела поверхности ИТО с воздухом. Если обозначить диэлектрическую проницаемость модификации ИТО за ϵ_2 , а граничащего слоя (воздуха) – за ϵ_1 , то оценить глубину затухания ПЭВ l_2 в ИТО можно следующим образом [25]:

$$l_2 = \frac{c}{\omega} \sqrt{-\frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{\epsilon_2^2}}. \quad (8)$$

Здесь c и ω – скорость распространения в вакууме и частота излучения электромагнитных волн соответственно. Данный подход предъявляет требования к диэлектрической проницаемости обрабатываемого материала: $|\epsilon_2| > \epsilon_1$ и $\epsilon_2 < 0$. Ранее, во Введении, обсуждалось, что данное условие может быть выполнено вблизи резонансных частот $\omega_{\text{пл}}$.

Следует отличать ПЭВ-обработку от лазерной абляции при прямом попадании излучения. Для

генерации ПЭВ использовалось входное излучение от CO_2 -лазера, значительная часть которого поглощалась тонкой пленкой на основе ИТО с образованием каверн, а малая часть диффузно отражалась. Следовательно, ПЭВ-обработке подвергаются области **вокруг** зон прямой лазерной абляции, причем плотности энергии для ПЭВ-воздействия существенно меньше, чем плотность энергии, требуемая для активации лазерной абляции. Схематичные отличия, а также профиль поверхности модификаций ИТО после ПЭВ-обработки представлены на рис. 7.

Спектральные зависимости коэффициентов отражения поверхности тонких пленок ИТО с УНТ в областях ПЭВ-обработки представлены на рис. 8.

По положению пиков интерференции, можно судить, что оптическая длина снизилась относительно

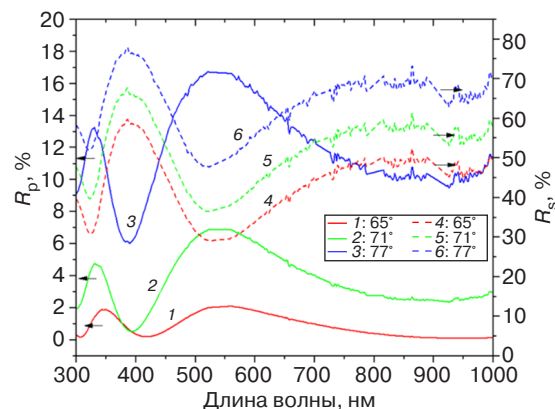
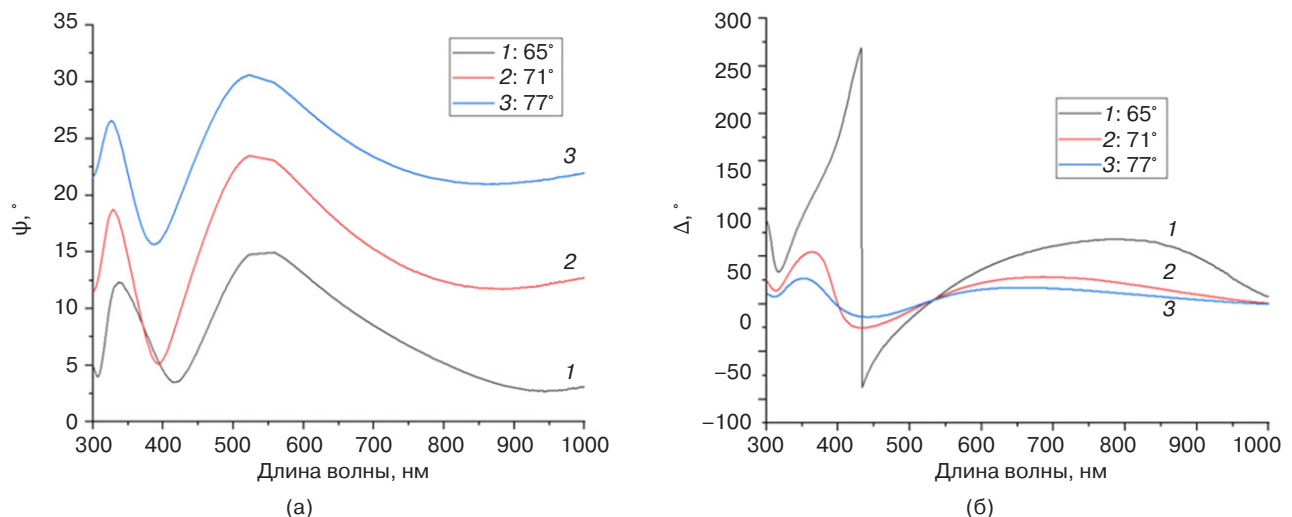
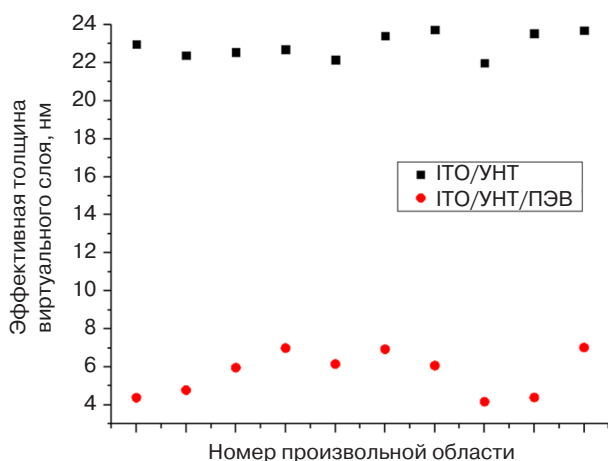


Рис. 8. Спектральные зависимости коэффициентов отражения тонких пленок ИТО с лазерно-осажденными УНТ на подложке крон К8 после ПЭВ-обработки в диапазоне 300–1000 нм при разных углах падения: 65°, 71° и 77°

Таблица. Сравнение рефрактивных свойств модификаций ИТО для р-поляризации

Параметр	Модификация ИТО		
	ИТО	ИТО с УНТ	ИТО с УНТ и ПЭВ
Параметры экстремумов при $\alpha = 77^\circ$: λ (нм) / R_p (%)			
Максимум 1	358.3 нм / 20.3%	348.5 нм / 14.2%	330.6 нм / 13.2%
Минимум 1	437.3 нм / 13.9%	390.9 нм / 6.8%	387.2 нм / 6.1%
Максимум 2	593.3 нм / 22.2%	463.3 нм / 18.1%	535.7 нм / 16.7%
Минимум 2	Данные неприменимы для указанных условий	590.6 нм / 8.6%	Данные неприменимы для указанных условий
Максимум 3	Данные неприменимы для указанных условий	832.9 нм / 16.9%	Данные неприменимы для указанных условий
Среднее значение R_p (%) в видимом диапазоне (400–750 нм) при разных α			
$\alpha = 65^\circ$	18.5%	12.8%	13.5%
$\alpha = 71^\circ$	6.4%	3.4%	4.7%
$\alpha = 77^\circ$	1.8%	0.8%	1.2%

**Рис. 9.** Спектральные зависимости эллипсометрических параметров ψ (а) и Δ (б) пленок ИТО с УНТ на подложке крон К8 после ПЭВ-обработки в диапазоне 300–1000 нм при разных углах падения: 65° , 71° и 77° **Рис. 10.** Толщина эффективного слоя УНТ до и после ПЭВ-обработки, определенная на основе метода эллипсометрии

пленок ИТО с УНТ. При этом численные значения коэффициентов отражения ниже, чем в случае с исходным ИТО. Сравнительные данные представлены в таблице.

Для оценки эффективной толщины слоя УНТ после ПЭВ-обработки также использовались спектральные зависимости эллипсометрических параметров (рис. 9) с последующей статистической обработкой, описанной в п. 1.

На основе данных, приведенных на рис. 8, 9, можно констатировать, что минимуму MSE соответствует $h_{эфф} \approx 6$ нм. Подобные процедуры проводились для 10 областей структур ИТО/УНТ и ИТО/УНТ/ПЭВ. Было установлено, что $h_{эфф}$ при ПЭВ-обработке снижается с 22–24 нм до 4–8 нм (рис. 10).

На первый взгляд (рис. 10), возникает сомнение в наличии УНТ после ПЭВ-обработки. В макромасштабе маркерами УНТ являются сниженный уровень

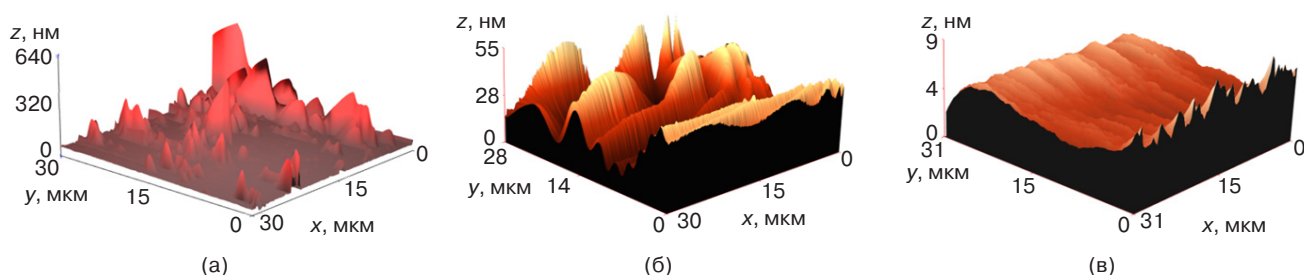


Рис. 11. Влияние ПЭВ-обработки на поверхность УНТ, осажденных на пленки ИТО:
(а) до обработки; (б) ПЭВ-обработка области с высокой плотностью осаждения УНТ;
(в) ПЭВ-обработка области с низкой плотностью осаждения УНТ

потерь на отражение (связан с просветляющим эффектом УНТ по отношению к ИТО) и увеличенный контактный угол смачивания (связан с формированием состояний Венцеля и Касси – Бакстера на каркасе УНТ) [19, 24]. Сравнение потерь на отражение было приведено ранее и наглядно представлено в таблице. Подробный анализ механизмов смачивания исходных структур рассматривался отдельно в работе [19]. Поверхности ИТО с УНТ и ПЭВ-обработкой, преимущественно обладают контактными углами θ в диапазоне от 100° до 110° , в то время как у поверхностей ИТО с ПЭВ этот диапазон равен 80° – 90° , у ИТО с УНТ – в пределах 115° – 125° . Таким образом, данные об изменении рефрактивных свойств, представленные в текущем исследовании, а также отдельное исследование, посвященное механизмам смачивания при лазерной абляции и ПЭВ-обработке [26], свидетельствуют о том, что при выбранном режиме ПЭВ-обработки часть кластеров УНТ остается на поверхности ИТО, приводя к варьированию толщины. Также некоторая информация о влиянии ПЭВ-обработки может быть получена из атомно-силовой микроскопии.

На рис. 11а представлен профиль поверхности УНТ на пленке ИТО до ПЭВ-обработки. Среднеквадратичная шероховатость Sq составляет 41.2 нм, максимальная высота и глубина относительно линии нулевого уровня $h_{\max} = 573.9$ нм и $h_{\min} = -65.9$ нм соответственно. Необходимо понимать, что УНТ осаждаются кластерами разной высоты и с разной плотностью, поэтому в разных областях поверхности параметры Sq , $h_{\max}$, $h_{\min}$ отличаются. Однако при обработке ПЭВ можно выделить тенденцию уменьшения шероховатости. Случай, показанный на рис. 11б, соответствует ПЭВ-обработке УНТ с высокой плотностью осаждения: наблюдаются впадины, которые могут быть связаны, как с утонением кластеров УНТ, так и с частичным удалением материала ИТО. При этом наблюдается снижение величины Sq до 11.0 нм, $h_{\max} = 32.2$ нм, $h_{\min} = -22.9$ нм. В случаях, когда плотность осажденных УНТ ниже, например, когда на поверхности ИТО осаждаются одиночные трубки малого размера,

ПЭВ в большей степени обрабатывает поверхность ИТО, а не УНТ (рис. 11в). Данные области являются еще более гладкими: $Sq = 0.9$ нм, $h_{\max} = 32.2$ нм, $h_{\min} = -22.9$ нм.

Для оценки влияния ПЭВ на толщину слоя УНТ метод атомно-силовой микроскопии имеет ограничение, связанное с соотношением размеров зондов (до 3–5 мкм) и сканируемых объектов (диаметр одиночных УНТ 1–2 нм). Также необходимо учитывать адгезию зондов к кластерам УНТ, что вызывает дополнительные ошибки при измерениях. Поэтому бесконтактный метод эллипсометрии для решения данной задачи является более предпочтительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были получены два важных научно-методических результата:

1. Определена эффективная толщина $h_{\text{эфф}}$ слоя лазерно-осажденных одностенных УНТ на поверхность ИТО. При величине напряженности управляющего поля 100 В/см в процессе осаждения УНТ на поверхность ИТО оптическим неразрушающим методом были определены значения $h_{\text{эфф}}$, которые находятся в диапазоне 22–24 нм. Знание численного значения данного параметра позволяет более эффективно выполнять расчеты при разработке электрооптических устройств.
2. Определено, что эффективную толщину слоя УНТ на поверхности ИТО можно прецизионно уменьшать при помощи обработки ПЭВ. Так, например, в текущем исследовании удалось снизить $h_{\text{эфф}}$ с 22–24 нм до 4–8 нм. Это важное применение наноплазмоники в контексте обработки поверхности ИТО, поскольку точность прямой лазерной абляции напрямую зависит от **технических параметров** оптической системы (расходимости луча, фокусного расстояния, диаметра, шага сканатора и т.д.), а точность ПЭВ-обработки определяется **свойствами материала** (n , μ , $\omega_{\text{пл}}$).

Проведенное исследование и выполненный анализ способствуют расширению материаловедческой базы данных систем фотоники и функциональных материалов оптоэлектроники.

Таким образом, эффективную толщину слоя УНТ на поверхности ИТО можно как увеличивать (при помощи дополнительного ориентированного осаждения), так и прецизионно уменьшать – при помощи ПЭВ-обработки. Это позволяет перестраивать интерференционные пики тонких пленок на основе ИТО с УНТ, что необходимо для оптимизации параметров электрооптических устройств по отношению к требуемому спектральному диапазону. При этом сохраняются полезные свойства УНТ – увеличение прочности покрытий, перестройка механизмов смачивания, оптическое просветление, увеличение электрической проводимости.

Благодарности

Данное исследование было частично поддержано грантом Российского научного фонда № 24-23-00021.

Aknowledgments

This research was partially supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-23-00021.

Вклад авторов

А.С. Тойкка – постановка и выполнение экспериментов, интерпретация результатов, концептуализация, написание и редактирование статьи.

Н.В. Каманина – интерпретация результатов, концептуализация, редактирование статьи.

Authors' contributions

A.S. Toikka – setting up and conducting experiments, interpretation of the results, conceptualizing, drafting and editing the article.

N.V. Kamanina – interpretation of the results, conceptualization, editing the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kim H., Gilmore C.M., Piquie A., Horwitz J.S., Mattoussi H., Murata H., Kafafi Z.H., Chrisey D.B. Electrical, optical, and structural properties of indium–tin–oxide thin films for organic light-emitting devices. *J. Appl. Phys.* 1999;86(11): 6451–6461. <https://doi.org/10.1063/1.371708>
2. Adurodija F.O., Izumi H., Ishihara T., Yoshioka H., Motoyama M., Murai K. Influence of substrate temperature on the properties of indium oxide thin films. *J. Vac. Sci. Technol. A*. 2000;18:814–818. <https://doi.org/10.1116/1.582260>
3. Zhang K., Zhu F., Huan C.H.A., Wee T.S. Effect of hydrogen partial pressure on optoelectronic properties of indium tin oxide thin films deposited by radio frequency magnetron sputtering method. *J. Appl. Phys.* 1999;86(2):974–980. <https://doi.org/10.1063/1.370834>
4. Kerkache L., Layadi A., Mosser A. Effect of oxygen partial pressure on the structural and optical properties of dc sputtered ITO thin films. *J. Alloys Compd.* 2019;18(1):46–50. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.06.103>
5. Kim J.-H., Lee J.-H., Heo Y.-W., Kim J.-J., Park J.-O. Effects of oxygen partial pressure on the preferential orientation and surface morphology of ITO films grown by RF magnetron sputtering. *J. Electroceram.* 2009;23:169–174. <https://doi.org/10.1007/s10832-007-9351-8>
6. Yang S., Sun B., Liu Y., Zhu J., Song J., Hao Z., Zeng X., Zhao X., Shu Y., Chen J., Yi J., He J. Effect of ITO target crystallinity on the properties of sputtering deposited ITO films. *Ceram. Int.* 2020;46(5):6342–6350. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.110>
7. Chen Y., Du C., Sun L., Fu T., Zhang R., Rong W., Cao S., Li X., Shen H., Shi D. Improved optical properties of perovskite solar cells by introducing Ag nanoparticles and ITO AR layers. *Sci. Rep.* 2011;11:14550 <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93914-1>
8. Chu F., Wang D., Liu C., Li L., Wang W.H. Multi-View 2D/3D Switchable Display with Cylindrical Liquid Crystal Lens Array. *Crystals*. 2021;11(6):715. <https://doi.org/10.3390/cryst11060715>
9. Rasheed M., Barille R. Optical constants of DC sputtering derived ITO, TiO₂ and TiO₂:Nb thin films characterized by spectrophotometry and spectroscopic ellipsometry for optoelectronic devices. *J. Non. Cryst. Solids*. 2017;476:1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.04.027>
10. Losego M.D., Efremenko A.Y., Rhodes C.L., Cerruti M.G., Franzen S., Maria J.P. Conductive oxide thin films: Model systems for understanding and controlling surface plasmon resonance. *J. Appl. Phys.* 2009;106(2):024903. <https://doi.org/10.1063/1.3174440>
11. Amin R., Maiti R., Gui Y., Suer C., Miscuglio M., Heidari E., Khurgin J.B., Chen R.T., Dalir H., Sorger V.J. Heterogeneously integrated ITO plasmonic Mach–Zehnder interferometric modulator on SOI. *Sci. Rep.* 2021;11:1287. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80381-3>
12. Dong W.J., Yu H.K., Lee J.L. Abnormal dewetting of Ag layer on three-dimensional ITO branches to form spatial plasmonic nanoparticles for organic solar cells. *Sci. Rep.* 2020;10:12819. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69320-4>
13. Liu C., Wang J., Wang F., Su W., Yang L., Lv J., Fu G., Li X., Liu Q., Sun T., Chu P.K. Surface plasmon resonance (SPR) infrared sensor based on D-shape photonic crystal fibers with ITO coatings. *Opt. Commun.* 2020;464:125496. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.125496>
14. El Nahrawy A.M., Abou Hammad A.B., Youssef A.M., Mansour A.M., Othman A.M. Thermal, dielectric and antimicrobial properties of polystyrene-assisted/ITO:Cu nanocomposites. *Appl. Phys. A*. 2019;125:46. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2351-5>

15. Mei F., Huang J., Yuan T., Li R. Effect of cerium doping on the microstructure and photoelectric properties of Ce-doped ITO films. *Appl. Surf. Sci.* 2020;509:144810. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144810>
16. Taha H., Jiang Z.T., Yin C.Y., Henry D.J., Zhao X., Trotter G., Amri A. A Novel Approach for Fabricating Transparent and Conducting SWCNTs/ITO Thin Films for Optoelectronic Applications. *J. Phys. Chem. C*. 2018;122(5):3014–3027. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b10977>
17. Каманина Н.В., Васильев П.Я., Студенов В.И., Усанов Ю.Е. Упрочнение прозрачных проводящих покрытий и «мягких» материалов ИК диапазона спектра при применении нанотехнологий. *Оптический журнал*. 2008;75(1):83–84.
[Kamanina N.V., Vasil'ev P.Ya., Studeonov V.I., Usanov Yu.E. Strengthening transparent conductive coatings and “soft” materials of the IR range when nanotechnologies are used. *J. Opt. Technol.* 2008;75(1):67–68. <https://doi.org/10.1364/JOT.75.000067>]
[Original Russian Text: Kamanina N.V., Vasil'ev P.Ya., Studeonov V.I., Usanov Yu.E. Strengthening transparent conductive coatings and “soft” materials of the IR range when nanotechnologies are used. *Opticheskii zhurnal*. 2008;75(1):83–84 (in Russ.).]
18. Kamanina N., Toikka A., Gladysheva I. ITO conducting coatings properties improvement via nanotechnology approach. *Nano Express*. 2021;2(1):010006. <https://doi.org/10.1088/2632-959X/abd90c>
19. Kamanina N., Toikka A., Valeev B., Kvashnin D. Carbon Nanotubes Use for the Semiconductors ZnSe and ZnS Material Surface Modification via the Laser-Oriented Deposition Technique. *C – Journal of Carbon Research*. 2021;7(4):84. <https://doi.org/10.3390/c7040084>
20. Garcia-Caurel E., De Martino A., Gaston J.P., Yan L. Application of Spectroscopic Ellipsometry and Mueller Ellipsometry to Optical Characterization. *Appl. Spectroscopy*. 2013;67(1):1–21. <https://doi.org/10.1366/12-06883>
21. Fujiwara H. *Spectroscopic Ellipsometry*. The Atrium, Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons; 2007. 369 p.
22. König T.A.F., Ledin P.A., Kerszulis J., Mahmoud M.A., El-Sayed M.A., Reynolds J.R., Tsukruk V.V. Electrically Tunable Plasmonic Behavior of Nanocube–Polymer Nanomaterials Induced by a Redox-Active Electrochromic Polymer. *ACS Nano*. 2014;8(6):6182–6192. <https://doi.org/10.1021/nn501601e>
23. Ermolaev G.A., Tsapenko A.P., Volkov V.S., Anisimov A.S., Gladush Y.G., Nasibulin A.G. Express determination of thickness and dielectric function of single-walled carbon nanotube films. *Appl. Phys. Lett.* 2020;116:231103. <https://doi.org/10.1063/5.0012933>
24. Тойкка А.С., Федорова Л.О., Каманина Н.В. Влияние лазерно-осажденных углерод-содержащих наночастиц на ориентирующие свойства проводящего слоя на основе оксида индия и олова для жидкокристаллических устройств. *Оптический журнал*. 2024;91(1):91–100. <https://www.doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-91-100>
[Toikka A.S., Fedorova L.O., Kamanina N.V. Influence of laser-deposited carbon-containing nanoparticles on the orienting properties of indium-tin-oxide-based conducting layers for liquid crystal devices. *J. Opt. Technol.* 2024;91(1):55–60. <https://doi.org/10.1364/JOT.91.000055>]
[Original Russian Text: Toikka A.S., Fedorova L.O., Kamanina N.V. Influence of laser-deposited carbon-containing nanoparticles on the orienting properties of indium-tin-oxide-based conducting layers for liquid crystal devices. *Opticheskii zhurnal*. 2024;91(1):91–100 (in Russ.).]
25. Bonch-Bruevich A.M., Libenson M.N., Makin V.S., Trubaev V.V. Surface electromagnetic waves in optics. *Opt. Eng.* 1992;31(4):718–730. <https://www.doi.org/10.1117/12.56133>
26. Toikka A.S., Kamanina N.V. Formation of the anisotropic ITO-based orienting layers for the liquid crystal devices. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2023;16(3.2):244–248. <https://www.doi.org/10.18721/JPM.163.242>

Об авторах

Тойкка Андрей Сергеевич, аспирант, кафедра фотоники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») (197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5); младший научный сотрудник, отдел перспективных разработок, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова «ПЯИФ» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (188300, Россия, Ленинградская обл., Гатчина, Орлова роща, д. 1). E-mail: astoikka.nano@gmail.com. Scopus Author ID 57216272706, SPIN-код РИНЦ 1261-2571, <https://orcid.org/0000-0002-8694-8497>

Каманина Наталия Владимировна, д.ф.-м.н., заведующая отделом фотофизики наноструктурированных материалов и устройств, АО «Научно-производственное объединение «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (192171, Россия, Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, д. 36); заведующая лабораторией фотофизики сред с нанообъектами, АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (199053, Россия, Санкт-Петербург, Кадетская линия В.О., д. 5); профессор, кафедра фотоники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») (197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5); ведущий научный сотрудник, отдел перспективных разработок, ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова «ПЯИФ» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (188300, Россия, Ленинградская обл., Гатчина, Орлова роща, д. 1). E-mail: nvkamanina@mail.ru. Scopus Author ID 55980751700, SPIN-код РИНЦ 1231-5045, <https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>

About the authors

Andrei S. Toikka, Postgraduate Student, Photonics Department, St. Petersburg Electrotechnical University “LETI” (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197022 Russia); Junior Researcher, Advanced Development Division, B.P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center “Kurchatov Institute” (1, Orlova Roshcha, Gatchina, Leningradskaya oblast, 188300 Russia). E-mail: astoikka.nano@gmail.com. Scopus Author ID 57216272706, RSCI SPIN-code 1261-2571, <https://orcid.org/0000-0002-8694-8497>

Natalia V. Kamanina, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory of Photophysics of Nanostructured Materials and Devices, Research and Production Corporation “S.I. Vavilov State Optical Institute” (36, Babushkina ul., St. Petersburg, 192171 Russia); Head of the Laboratory of Photophysics of Media with Nanoobjects, Vavilov State Optical Institute (5, Kadetskaya Liniya V.O., St. Petersburg, 199053 Russia), Professor, Photonics Department, St. Petersburg Electrotechnical University “LETI” (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197022 Russia); Lead Researcher of Advanced Development Division, B.P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center “Kurchatov Institute” (1, Orlova Roshcha, Gatchina, Leningradskaya oblast, 188300 Russia). E-mail: nvkamanina@mail.ru. Scopus Author ID 55980751700, RSCI SPIN-code 1231-5045, <https://orcid.org/0000-0002-2903-2685>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 681.5.015

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-63-76>

EDN OIBKMA



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Об идентификации взаимосвязанных систем

Н.Н. Карабутов[®]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме

Цели. Проблеме идентификации взаимосвязанных систем до настоящего времени уделялось недостаточно внимания. Взаимосвязанные системы управления широко применяются в различных технических системах. Как правило, применяются многоканальные системы. Из-за сложности их описания применяют упрощенные модели, которые не всегда отражают специфику объекта. Поэтому задача синтеза математических моделей является актуальной. Целью настоящей работы является разработка подхода к получению моделей в условиях неполной априорной информации. Для решения задачи применяется адаптивный подход. На примере двухканальных систем (ДС) с перекрестными связями и идентичными каналами разрабатывается метод получения математической модели. Рассматривается случай асимметричных перекрестных связей, и получены оценки их влияния на качество работы адаптивной системы идентификации. В рамках предлагаемой постановки ставится задача оценки идентифицируемости параметров двухканальной системы на основе имеющейся экспериментальной информации и последующем синтезе адаптивной системы. Дается обобщение предлагаемого подхода на случай многосвязной системы.

Методы. Применяются метод адаптивной идентификации системы, неявное идентификационное представление для модели, метод векторных функций Ляпунова.

Результаты. Предложен подход к оценке идентифицируемости двухканальных систем с перекрестными связями. Показано влияние постоянства возбуждения на оценки параметров двухканальной системы. Предложен метод синтеза адаптивных алгоритмов оценки параметров для двухканальных систем с перекрестными связями по данным «вход-выход». Дано обобщение подхода на случай взаимосвязанных систем. Результаты применены для построения моделей системы слежения и двухканального корректора для систем автоматического регулирования.

Выводы. Рассмотрены особенности адаптивной идентификации двухканальных систем с идентичными каналами, перекрестными и обратными связями. Получены условия идентифицируемости ДС. Синтезированы адаптивные алгоритмы оценивания параметров ДС. Дано обобщение предлагаемого подхода на случай неидентичных каналов и многосвязных систем. Доказана экспоненциальная диссипативность адаптивной системы идентификации. Предлагаемые методы могут использоваться при разработке систем идентификации и управления сложными динамическими системами.

Ключевые слова: адаптивная идентификация, идентифицируемость, устойчивость, двухканальная система, векторная функция Ляпунова, многосвязная система, постоянство возбуждения

• Поступила: 25.01.2024 • Доработана: 29.03.2024 • Принята к опубликованию: 15.07.2024

Для цитирования: Карабутов Н.Н. Об идентификации взаимосвязанных систем. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):63–76. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-63-76>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

On identification of interconnected systems

Nikolay N. Karabutov [@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. Interconnected control systems are widely used in various technical contexts, generally involving multichannel systems. However, due to the complexity of their description, the problem of identifying interconnected systems has received insufficient attention. As a result, simplified models are commonly used, which do not always reflect the specifics of the object. Thus, the synthesis of mathematical models for the description of interconnected control systems becomes a relevant endeavor. The paper sets out to develop an approach to obtaining models under conditions of incomplete a priori information. A mathematical model is developed on the example of two-channel systems (TCSs) having cross-connections and identical channels. The case of asymmetric cross-connections is considered, along with estimates of their influence on the quality of the adaptive identification system. The problem of estimating the identifiability of the parameters of a TCS is formulated on the basis of available experimental information and subsequent synthesis of the adaptive system. The proposed approach is then generalized to the case of an interconnected system.

Methods. The adaptive system identification and Lyapunov vector function methods are used along with implicit identification representation for the model.

Results. The influence of excitation constancy on estimates of the TCS parameters is demonstrated on the basis of the proposed approach for estimating the identifiability of TCS with cross-connections. The synthesis of adaptive algorithms of parameter estimation for TCSs with cross-connections based on input-output data is generalized to the case of interconnected systems. The results are applied to building models of tracking system and two-channel corrector for automatic control systems.

Conclusions. The features of adaptive identification of TCSs with identical channels, cross-connections and feedbacks are considered. The conditions for the TCS identifiability are obtained. Adaptive algorithms for estimating TCS parameters are synthesized. The proposed approach is generalized to the case of nonidentical channels and multi-connected systems. The exponential dissipativity of the adaptive identification system is verified. The proposed methods can be used in the development of systems for identification and control of complex dynamic systems.

Keywords: adaptive identification, identifiability, stability, two-channel system, Lyapunov vector function, multiconnected system, excitation constant

• Submitted: 25.01.2024 • Revised: 29.03.2024 • Accepted: 15.07.2024

For citation: Karabutov N.N. On identification of interconnected systems. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):63–76. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-63-76>

Financial disclosure: The author has no financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Многосвязные системы (МС) широко применяются в системах управления [1–5]. Наиболее часто их используют для управления приводами роботов и манипуляторов [6, 7], а также различными техническими системами [8, 9].

В [10] рассматривается возможность применения адаптивной идентификации для МС. Предлагается применение итеративно-вероятностного метода. В [11] предложен метод идентификации модели «черного ящика» для многосвязных нестационарных динамических объектов с неопределенностью. Разработка адаптивных алгоритмов децентрализованного робастного управления с эталонной моделью для взаимосвязанных систем с временной задержкой рассматривается в [12]. Обоснована асимптотическая устойчивость системы. Вопросы идентифицируемости замкнутой многосвязной стохастической системы рассмотрены в [13]. Предложена декомпозиция системы на подсистемы. Рассмотрена идентифицируемость как отдельных элементов системы, так и отдельных замкнутых контуров без одновременной идентификации остальных элементов и контуров системы. Получены достаточные условия сходимости почти наверное оценок параметров правдоподобия. Высокомодульный нормализованный адаптивный решеточный алгоритм для многоканальной фильтрации на основе метода наименьших квадратов предложен в [14].

В [15] представлен алгоритм идентификации моделей в виде передаточных функций для двумерных пространственно взаимосвязанных систем, которые являются причинными как для разомкнутого, так и замкнутого контура, с использованием нейронной сети. В [16] рассмотрена децентрализованная робастная адаптивная стабилизация с обратной связью по выходу. Синтез законов управления основан на адаптивном нелинейном демпфировании и применении робастного адаптивного наблюдателя состояния и функций Ляпунова (ФЛ). Близкие результаты получены в [17, 18]. В [19] представлен метод идентификации взаимосвязанной системы в рациональной форме с использованием данных ввода-вывода. Изучается модель в форме Рассера.

Адаптивное управление классом крупномасштабных систем, состоящих из произвольного числа

взаимодействующих подсистем с неизвестными параметрами, нелинейностями и ограниченными возмущениями рассмотрено в [20]. Применен метод эталонной модели. В [21] рассматривается топологическая структурная идентификация крупномасштабных подсистем, но с редкими потоками взаимосвязанных динамических систем на основе небольшого объема данных. В [22] описывается подход к слепой идентификации двухканальной системы (ДС) с конечным импульсным откликом по ограниченному числу выходных измерений при наличии аддитивного белого шума. Предложенный подход основан на данных в частотной области и позволяет проводить оценку по частоте. В [23] рассмотрены некоторые фундаментальные проблемы слепой многоканальной идентификации и дан анализ некоторых современных адаптивных алгоритмов.

Обзор [24] охватывает некоторые современные подходы, основанные на декомпозиции задачи идентификации систем с несколькими входами / одним выходом. Предлагаются процедуры идентификации в виде комбинаций малоразмерных решений, а также итеративной версии фильтра Винера. Вопросы идентификации стационарных линейных систем такого класса рассматривались в [13, 25, 26]. В [25] предложен способ идентификации многомерных систем в частотной области с помощью корреляционного подхода. Получена параметрическая модель в виде векторно-разностного уравнения и выполнено преобразование этой модели в соответствующую модель в частотной области. Вопросы идентифицируемости многомерных дискретных динамических систем рассмотрены в [26], где предложены априорные оценки идентифицируемости коэффициентов на основе числовых характеристик нижней границы асимптотической дисперсии оценок коэффициентов.

Итак, для исследования процессов в МС применяются модели как в виде передаточных функций, так и в пространстве состояний. Для синтеза алгоритмов управления используются адаптивные процедуры. Разработаны адаптивные алгоритмы управления при наличии немодулируемой динамики и действия возмущений. Такое состояние можно объяснить недостаточной информацией о состоянии и параметрах системы или объекта, а также сложностью учета взаимосвязей в системе. Идентификация параметров многомерных систем основана на применении статистических

процедур, частотных методов и нейросетевых технологий. Ряд работ посвящен применению адаптивных методов. В основном они применяются для настройки (идентификации) параметров устройства управления. Возникающие при этом параметрические неопределенности компенсируются за счет выбора соответствующих алгоритмов управления. Идентификации ДС посвящено немного публикаций.

В работе предлагается подход к адаптивной идентификации МС, основанный на использовании результатов измерений. Сначала рассматриваются ДС с перекрестными связями. Предлагается подход к их идентифицируемости при различных предположениях относительно параметров перекрестных связей. Получены оценки идентифицируемости. Доказывается устойчивость адаптивной системы. Далее рассматривается подход к идентификации МС.

1. ДВУХКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

1.1. Постановка задачи

Рассмотрим ДС с перекрестными связями. Звенья в каналах считаем идентичными. Для анализа ДС применяют передаточные функции [27]. Для задач идентификации ДС удобнее описывать в пространстве состояний. Пусть система содержит n последовательно взаимосвязанных вертикальных слоев:

1) первый слой

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_{11} = \mathbf{A}_1 \mathbf{X}_{11} + \mathbf{B}_1 v_{11}, \\ y_{11} = \mathbf{C}_1^T \mathbf{X}_{11}, \\ \dot{\mathbf{X}}_{21} = \mathbf{A}_1 \mathbf{X}_{21} + \mathbf{B}_1 v_{21}, \\ y_{21} = \mathbf{C}_1^T \mathbf{X}_{21}, \end{cases} \quad (1)$$

2) k -й слой ($1 < k \leq n$)

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_{1,k} = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_{1,k} + \mathbf{B}_k u_{1,k}, \\ y_{1,k} = \mathbf{C}_k^T \mathbf{X}_{1,k}, \\ u_{1,k} = y_{1,k-1} + v_{1,k-1}, \\ v_{1,k-1} = d_{k-1}(y_{2,k-1} + d_{k-2}v_{2,k-1}), \\ \dot{\mathbf{X}}_{2,k} = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_{2,k} + \mathbf{B}_k u_{2,k}, \\ y_{2,k} = \mathbf{C}_k^T \mathbf{X}_{2,k}, \\ u_{2,k} = y_{2,k-1} + v_{2,k-1}, \\ v_{2,k-1} = d_{k-1}(y_{1,k-1} + d_{k-2}v_{1,k-1}), \end{cases} \quad (2)$$

где $v_{11} = g_1 - y_{1,n}$, $v_{21} = g_2 - y_{2,n}$, $v_{i,k-1}$ – выход перекрестной связи i -го канала, $i = 1, 2$; $\mathbf{X}_{i,k} \in \mathbb{R}^q$ –

вектор состояния k -го слоя i -го канала ДС; $\mathbf{A}_k \in \mathbb{R}^{q_k \times q_k}$, $\mathbf{C}_k \in \mathbb{R}^{q_k}$, $\mathbf{B}_k \in \mathbb{R}^{q_k}$, $y_{i,k} \in \mathbb{R}$ – выход k -го слоя i -го канала; $v_{i,k-1}$ – выход перекрестной связи, $g_i(t) \in \mathbb{R}$ – вход (задающее воздействие) системы. Матрица $\mathbf{A}_k$ является гурвицевой.

Параметр d_{k-1} представляет собой оператор. В зависимости от задач, решаемых ДС, d_{k-1} может быть постоянным, нелинейной функцией или дифференциальным оператором.

Информационное множество для системы (1), (2) имеет вид

$$\mathbb{I}_0 = \{g_i(t), y_{i,k}(t) \forall (i=1,2) \& (k=\overline{1,n}), t \in J = [t_0, t_e]\}, \quad (3)$$

где J – интервал съема данных; t – время; t_0, t_e – начало и конец временного интервала.

Для идентификации системы применяется модель со структурой, аналогичной (1), (2) и выходами $\hat{y}_{i,k} \in \mathbb{R}$, $i = 1, 2$; $k = \overline{1,n}$.

Задача сводится к выбору алгоритмов настройки параметров модели таким образом, чтобы

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\hat{y}_{i,k} - y_{i,k}| \leq \delta_{i,k}, \quad (4)$$

где $\delta_{i,k} \geq 0$ – заданная величина.

1.2. О структурных аспектах системы

Идентификация системы (1), (2) существенно зависит от возможности оценки ее параметров.

Введем модель для ДС (1):

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{X}}}_{1,1} = \mathbf{K}_1(\hat{\mathbf{X}}_{1,1} - \mathbf{X}_{1,1}) + \hat{\mathbf{A}}_1 \mathbf{X}_{1,1} + \hat{\mathbf{B}}_1 v_{1,1}, \\ \hat{y}_{1,1} = \mathbf{C}_1^T \hat{\mathbf{X}}_{1,1}, \\ \dot{\hat{\mathbf{X}}}_{2,1} = \mathbf{K}_1(\hat{\mathbf{X}}_{2,1} - \mathbf{X}_{2,1}) + \hat{\mathbf{A}}_1 \mathbf{X}_{2,1} + \hat{\mathbf{B}}_1 v_{2,1}, \\ \hat{y}_{2,1} = \mathbf{C}_1^T \mathbf{X}_{2,1}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\mathbf{K}_1 \in \mathbb{R}^{q_1 \times q_1}$ – известная устойчивая матрица (эталонная модель); $\hat{\mathbf{A}}_1 \in \mathbb{R}^{q_1 \times q_1}$, $\hat{\mathbf{B}}_1 \in \mathbb{R}^{q_1}$ – матрица модели (5), $\hat{\mathbf{X}}_{i,1}$ – вектор состояния.

Обозначим $\mathbf{E}_{1,1} \triangleq \hat{\mathbf{X}}_{1,1} - \mathbf{X}_{1,1}$, $\mathbf{E}_{2,1} \triangleq \hat{\mathbf{X}}_{2,1} - \mathbf{X}_{2,1}$. Тогда для первого слоя

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{E}}_{1,1} = \mathbf{K}_1 \mathbf{E}_{1,1} + \Delta \mathbf{A}_1 \mathbf{X}_{1,1} + \Delta \mathbf{B}_1 v_{1,1}, \\ \dot{\mathbf{E}}_{2,1} = \mathbf{K}_1 \mathbf{E}_{2,1} + \Delta \hat{\mathbf{A}}_1 \mathbf{X}_{2,1} + \Delta \mathbf{B}_1 v_{2,1}, \end{cases} \quad (6)$$

где $\Delta \mathbf{A}_1 \triangleq \hat{\mathbf{A}}_1 - \mathbf{A}_1$, $\Delta \mathbf{B}_1 \triangleq \hat{\mathbf{B}}_1 - \mathbf{B}_1$ – матрицы параметрических невязок.

Аналогично получаем уравнения ошибок для остальных слоев ДС:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{E}}_{1,k} &= \mathbf{K}_k \mathbf{E}_{1,k} + \Delta \mathbf{A}_k \mathbf{X}_{1,k} + \Delta \mathbf{B}_k u_{1,k}, \\ \dot{\mathbf{E}}_{2,k} &= \mathbf{K}_k \mathbf{E}_{2,k} + \Delta \mathbf{A}_k \mathbf{X}_{2,k} + \Delta \mathbf{B}_k u_{2,k}.\end{aligned}\quad (7)$$

Пусть вход $g_i(t)$, $i = 1, 2$ удовлетворяет условию постоянства возбуждения (ПВ):

$$\mathcal{E}_{\underline{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i} : \underline{\alpha}_i \leq g_i^2(t) \leq \bar{\alpha}_i \quad \forall t \in [t_0, t_0 + T], \quad (8)$$

где $\underline{\alpha}_i$, $\bar{\alpha}_i$ – положительные числа, $T > 0$. Далее условие (8) будем записывать в виде $g_i(t) \in \mathcal{E}_{\underline{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i}$. Если $g_i(t)$ не имеет свойства ПВ, то будем писать $g_i(t) \notin \mathcal{E}_{\underline{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i}$.

Теорема 1. Пусть выполняются условия: 1) $g_i(t) \in \mathcal{E}_{\underline{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i}$, где $(\underline{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i) > 0$; 2) система (5) является устойчивой и обнаруживаемой; 3) матрица $\mathbf{K}_1 \in \mathbb{R}^{q_1 \times q_1}$ является гурвицевой; 4) входы $v_{i1}(t) \in \mathcal{E}_{\underline{\sigma}_{i1}, \bar{\sigma}_{i1}}$, где $\underline{\sigma}_{i1} > 0$, $\bar{\sigma}_{i1} > 0$, $i = 1, 2$; 5) $\mathbf{X}_{i,1}(t) \in \mathcal{E}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_{i,1}}, \bar{\alpha}_{\mathbf{X}_{i,1}}}$, где $(\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_{i,1}}, \bar{\alpha}_{\mathbf{X}_{i,1}}) > 0$. Тогда система (5) является идентифицируемой, если

$$\pi_{12} \|\Delta \mathbf{A}_1\|^2 + 0.5 v_{12} \|\Delta \mathbf{B}_1\|^2 \leq (\lambda - 0.5) V_1, \quad (9)$$

где $\lambda_1 > 0.5$, $\pi_{12} = 2 \max(\bar{\alpha}_{X_{11}}, \bar{\alpha}_{X_{12}})$, $v_{12} = \bar{\sigma}_{11} + \bar{\sigma}_{21}$, $\|\Delta \mathbf{A}_1\|^2 = \text{tr}(\Delta \mathbf{A}_1^T \Delta \mathbf{A}_1)$, tr – след матрицы, $V_1(t) = 0.5 \mathbf{E}_{11}^T(t) \mathbf{R}_1 \mathbf{E}_{11}(t) + 0.5 \mathbf{E}_{21}^T(t) \mathbf{R}_1 \mathbf{E}_{21}(t)$, $\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_1^T > 0$ – симметричная матрица.

Если выполняется условие (9), то систему (5) будем называть параметрически $\mathcal{E}_{1,X}$ -идентифицируемой на множестве переменных состояния. Идентифицируемость слоя подсистемы (1) зависит от свойств выхода ДС.

Рассмотрим систему (7). Введем ФЛ:

$$\begin{aligned}V_k(t) &= 0.5 \mathbf{E}_{1,k}^T(t) \mathbf{R}_k \mathbf{E}_{1,k}(t) + \\ &+ 0.5 \mathbf{E}_{2,k}^T(t) \mathbf{R}_k \mathbf{E}_{2,k}(t).\end{aligned}\quad (10)$$

Теорема 2. Пусть выполняются условия: 1) матрица $\mathbf{K}_k \in \mathbb{R}^{q_k \times q_k}$ является гурвицевой; 2) $\|\mathbf{X}_{1,k}\|^2 \in \mathcal{E}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_{1,k}}, \bar{\alpha}_{\mathbf{X}_{1,k}}}$, $\|\mathbf{X}_{2,k}\|^2 \in \mathcal{E}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_{2,k}}, \bar{\alpha}_{\mathbf{X}_{2,k}}}$; $\pi_k = \max(\bar{\alpha}_{\mathbf{X}_{1,k}}, \bar{\alpha}_{\mathbf{X}_{2,k}})$, $y_{2,k-1} \in \mathcal{E}_{\underline{\alpha}_{y_{2,k-1}}, \bar{\alpha}_{y_{2,k-1}}}$; 3) система (5) является $\mathcal{E}_{1,X}$ -идентифицируемой; 4) система (7) является устойчивой и обнаруживаемой; 5) $v_{2,k-1}^2 \in \mathcal{E}_{\underline{\alpha}_{v_{2,k-1}}, \bar{\alpha}_{v_{2,k-1}}}$; 6) оператор d_{k-1} является постоянным: $d_k \leq \omega_k \leq \omega$, где ω – некоторое число; 7) $\lambda_k \geq 0.5$. Тогда система (7) является $\mathcal{E}_{k,X}$ -идентифицируемой, если

$$\begin{aligned}&0.5 \pi_{k,i} \|\Delta \mathbf{A}_k\|^2 + 0.5 \|\Delta \mathbf{B}_k\|^2 \times \\ &\times (\tilde{\alpha}_k + 2\omega^2(\tilde{\alpha}_k + 2\omega^2 \beta_k)) \leq (\lambda_k - 0.5) V_k,\end{aligned}\quad (11)$$

где $\pi_{k,i} = 2 \max(\bar{\alpha}_{X_{1,k}}, \bar{\alpha}_{X_{2,k}})$,

$\tilde{\alpha}_k = 2 \max(\bar{\alpha}_{y_{2,k-1}}, \bar{\alpha}_{y_{1,k-1}})$,

$\beta_k = \max_i(\bar{\alpha}_{y_{i,k-1}} + \omega^2 \bar{\alpha}_{v_{i,k-1}})$.

Замечание 1. Условия $\|\mathbf{X}_{i,k}\|^2 \in \mathcal{E}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{X}_{i,k}}, \bar{\alpha}_{\mathbf{X}_{i,k}}}$, $i = 1, 2$ следуют из $v_{i1}(t) \in \mathcal{E}_{\underline{\alpha}_{v_{i1}}, \bar{\alpha}_{v_{i1}}}$.

Замечание 2. Идентифицируемость k -го слоя (7) зависит от свойств предыдущих слоев системы (1), (2) и перекрестных связей. Параметры перекрестных связей должны выбираться таким образом, чтобы выполнялось условие (11).

Рассмотрим случай, когда оператор d_k является дифференцирующим.

Теорема 3. Пусть выполняются условия теоремы 2 и: 1) оператор d_{k-1} является дифференцирующим, т. е. $v_{1,k-1} = d(y_{2,k-1} + d_{k-2} v_{2,k-1})/dt$; 2) система (1), (2) является устойчивой, обнаруживаемой и восстанавливаемой. Тогда система (7) является $\mathcal{E}_{k,X}$ -идентифицируемой, если

$$\begin{aligned}&0.5 \pi_{k,i} \|\Delta \mathbf{A}_k\|^2 + 0.5 \|\Delta \mathbf{B}_k\|^2 \times \\ &\times (\tilde{\alpha}_{k,y} + 2(\bar{\alpha}_{\dot{y}} + \tilde{\alpha}_{\ddot{y}})) \leq (\lambda_k - 0.5) V_k,\end{aligned}\quad (12)$$

где $\tilde{\alpha}_{k,y} = 2 \max_i \bar{\alpha}_{\dot{y}_{2,k-1}}$, $\tilde{\alpha}_{k,\ddot{y}} = 2 \max_i \bar{\alpha}_{\ddot{y}_{i,k-1}}$, $\pi_{k,i} = 2 \max(\bar{\alpha}_{\mathbf{X}_{1,k}}, \bar{\alpha}_{\mathbf{X}_{2,k}})$, $V_k(t)$ имеет вид (10).

Итак, полученные результаты позволяют оценить идентифицируемость системы (1), (2) при измеримости вектора состояния элементов всех слоев ДС. Чаще всего для наблюдения доступно только множество (3). В этом случае необходимо оперировать доступной информацией для оценки идентифицируемости ДС.

Преобразуем ДС к виду, удобному для использования множества $\mathbb{I}_0$ [28, 29]. Рассмотрим систему (1). Пусть $\mathbf{A}_1$ является матрицей Фробениуса с вектором параметров $\mathbf{A}_{1,s} \in \mathbb{R}^{q_1}$, $\mathbf{A}_{1,s} = [a_{1,s,1}, a_{1,s,2}, \dots, a_{1,s,q_1}]^T$, $\mathbf{C}_1 = [1, 0, \dots, 0]^T$, $\mathbf{B}_1 = [0, \dots, 0, b_{1,s}]^T$. В пространстве (v_{11}, y_{11}) системе (1) соответствует представление

$$\dot{y}_{1,1} = \bar{\mathbf{A}}_{1,1}^T \mathbf{P}_{1,1}, \quad (13)$$

где $\bar{\mathbf{A}}_{1,1}^T = [-a_{1,1,1}, a_{1,1,2}, \dots, a_{1,1,q_1}; b_{1,s}, b_{1,2}, \dots, b_{1,q_1}]$, $\bar{\mathbf{A}}_{1,1} \in \mathbb{R}^{2q_1}$, $\mathbf{P}_{1,1} \in \mathbb{R}^{2q_1}$.

Учитывая (13), систему (1) в пространстве «вход-выход» преобразуем к виду

$$\begin{cases} \dot{y}_{1,1} = \bar{\mathbf{A}}_{1,1}^T \mathbf{P}_{1,1}, \\ \dot{y}_{2,1} = \bar{\mathbf{A}}_{1,1}^T \mathbf{P}_{2,1}. \end{cases} \quad (14)$$

Оценим идентифицируемость системы (14) по выходу ($\mathcal{E}_{1,y}$ -идентифицируемость). Рассмотрим модель

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}}_{1,1} = -\chi e_{1,1} + \hat{\mathbf{A}}_{1,1}^T \mathbf{P}_{1,1}, \\ \dot{\hat{y}}_{2,1} = -\chi e_{2,1} + \hat{\mathbf{A}}_{1,1}^T \mathbf{P}_{2,1}, \end{cases} \quad (15)$$

где $\chi_1 > 0$, $e_{i,1} = \hat{y}_{i,1} - y_{i,1}$ – ошибка прогнозирования $y_{i,1}$ -го выхода, $i = 1, 2$. Для $e_{i,1}$ получаем уравнение

$$\dot{e}_{i,1} = -\chi_1 e_{i,1} + \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}^T \mathbf{P}_{i,1}, \quad \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1} = \hat{\mathbf{A}}_{1,1} - \bar{\mathbf{A}}_{1,1}. \quad (16)$$

Рассмотрим ФЛ $V_{1,2}(e_{1,1}, e_{2,1}) = 0.5(e_{1,1}^2 + e_{2,1}^2)$. Для $\dot{V}_{1,2}$ получим

$$\begin{aligned} \dot{V}_{1,2} &= -2\chi_1 V_{1,2} + \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}^T (\mathbf{P}_{1,1} e_{1,1} + \mathbf{P}_{2,1} e_{2,1}) \leq \\ &\leq -\frac{\chi_1}{2} V_{1,2} + \frac{1}{2\chi_1} \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{P}_1^T \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}, \end{aligned}$$

где $\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_1^T = \mathbf{P}_{1,1} \mathbf{P}_{1,1}^T + \mathbf{P}_{2,1} \mathbf{P}_{2,1}^T$.

Из (16) следует, что $\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1} = 0$, если вектор $\mathbf{P}_i(t)$ является предельно невырожденным, т. е. $\mathbf{P}_i(t) \in \mathcal{E}_{\mathbf{P}_i, \bar{\mathbf{A}}_{1,1}} (i = 1, 2)$ и подсистема (1) является параметрически $\mathcal{E}_{1,y}$ -идентифицируемой по выходу. $\mathcal{E}_{1,y}$ -идентифицируемость подсистем (2) обосновывается аналогично.

Для k -го слоя (система (2)) можно получить представление, аналогичное (13):

$$\begin{cases} \dot{y}_{1,k} = \bar{\mathbf{A}}_{1,k}^T \mathbf{P}_{1,k}, \\ \dot{y}_{2,k} = \bar{\mathbf{A}}_{1,k}^T \mathbf{P}_{2,k} \end{cases} \quad (17)$$

где $\mathbf{P}_{i,k} \in \mathbb{R}^{2q_k}$ – обобщенный вход. Для удобства представления (13)–(15), (17) будем называть неканоническим идентификационным представлением.

При идентификации ДС и неполной априорной информации может возникнуть задача определения типа перекрестных связей. В этом случае можно воспользоваться следующим подходом. Рассмотрим k -й слой системы (2) с идентичными перекрестными связями и $d_{k-1} = \text{const}$. Построим структуру $\mathbf{S}_{u_{i,k}, y_{i,k}}$,

описываемую функцией $f_{u_{i,k}, y_{i,k}} : u_{i,k} \rightarrow y_{i,k}$, $i = 1, 2$ для обоих каналов k -го слоя. $\mathbf{S}_{u_{i,k}, y_{i,k}}$ отражает состояние «вход-выход» ДС. Определим секущие для $\mathbf{S}_{u_{i,k}, y_{i,k}}$:

$$\xi_{u_{i,k}, y_{i,k}} = a_{\xi_{0,i,k}} + a_{\xi_{1,i,k}} u_{i,k}, \quad (18)$$

где $a_{\xi_{0,i,k}}, a_{\xi_{1,i,k}}$ – параметры, определяемые с помощью метода наименьших квадратов.

Так как перекрестная связь является жесткой, то угол между секущими $\xi_{u_{i,k}, y_{i,k}}$ не будет превышать некоторую величину: $|a_{\xi_{1,1,k}} - a_{\xi_{1,2,k}}| \leq \delta_{\xi_{i,k}}$. Следовательно, перекрестные связи являются положительными. Если перекрестные связи являются асимметричными, то $|a_{\xi_{1,1,k}} - a_{\xi_{1,2,k}}| > \delta_{\xi_{i,k}}$. В этом случае сигнал $v_{1,k-1}$ будет действовать в противофазе с выходом $y_{1,k-1}$ предыдущего слоя первого канала.

Замечание 3. Если каналы каждого слоя являются неидентичными, то идентифицируемость слоев системы нетрудно получить из приведенных теорем.

1.3. Адаптивная идентификация ДС

Рассмотрим представление (13)–(15), (17) для ДС. Для подсистемы (17) введем модель:

$$\begin{cases} \dot{\hat{y}}_{1,k} = -\chi_k e_{1,k} + \hat{\mathbf{A}}_{1,k}^T \mathbf{P}_{1,k}, \\ \dot{\hat{y}}_{2,k} = -\chi_k e_{2,k} + \hat{\mathbf{A}}_{1,k}^T \mathbf{P}_{2,k}, \end{cases} \quad (19)$$

где $\chi_k > 0$, $e_{i,k} = \hat{y}_{i,k} - y_{i,k}$ – ошибка прогнозирования выхода $y_{i,k}$ ($k = 1, 2$, i – i -й элемент в k -м слое). Для $e_{i,k}$ получаем уравнение:

$$\dot{e}_{i,k} = -\chi_k e_{i,k} + \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}^T \mathbf{P}_{i,k}, \quad \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k} = \hat{\mathbf{A}}_{1,k} - \bar{\mathbf{A}}_{1,k}. \quad (20)$$

Адаптивный алгоритм настройки параметров модели (19) имеет вид:

$$\dot{\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}} = \dot{\hat{\mathbf{A}}_{1,k}} = -\mathbf{\Gamma}_k e_{i,k} \mathbf{P}_{1,k}, \quad (21)$$

где $\mathbf{\Gamma}_k \in \mathbb{R}^{q_k \times q_k}$ – диагональная матрица с $\gamma_{k,j} > 0$.

Рассмотрим подсистему (14)–(16) и ФЛ $\tilde{V}_1(e_{1,1}) = 0.5e_{1,1}^2$. Из условия $\dot{\tilde{V}}_1 \leq 0$ получаем адаптивный алгоритм настройки вектора $\hat{\mathbf{A}}_{1,1}$:

$$\dot{\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}} = \dot{\hat{\mathbf{A}}_{1,1}} = -\mathbf{\Gamma}_1 e_{1,1} \mathbf{P}_{1,1}, \quad (22)$$

где $\mathbf{\Gamma}_1 \in \mathbb{R}^{q_1 \times q_1}$ – диагональная матрица с $\gamma_{1,j} > 0$, j – номер диагонального элемента.

Замечание 4. Так как ДС имеет идентичные каналы, то настройку выполняем только для одного из них.

Из-за обратной связи некоторые параметры системы (14)–(16), (22) могут быть неидентифицируемыми. Учитывая это, уравнение (16) запишем в виде:

$$\dot{e}_{1,1} = -\chi_1 e_{1,1} + \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}^T \mathbf{P}_{1,1} + f(\bar{\mathbf{A}}_{1,1}, p_{v_{11}}), \quad (23)$$

где $f(\cdot)$ – неопределенность, возникающая из-за невыполнения условия ПВ.

Рассмотрим ФЛ $\tilde{V}_{1,e}(e_{1,1}) = 0.5e_{1,1}^2$, $\tilde{V}_{1,\Delta}(\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}) = 0.5\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}^T \Gamma_1^{-1} \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}$.

Теорема 4. Пусть выполняются условия: 1) $g_i(t) \in \mathcal{C}_{\underline{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i}$, $\mathbf{P}_{1,1} \notin \mathcal{C}_{\underline{\alpha}_{\mathbf{P}_{1,1}}, \bar{\alpha}_{\mathbf{P}_{1,1}}}$; 2) $y_{i,1} \notin \mathcal{C}_{\underline{\alpha}_{y_{i,1}}, \bar{\alpha}_{y_{i,1}}}$, $i = 1, 2$; 3) $|f| \leq \alpha_f$ где $\alpha_f \geq 0$; 4) существует такое $\upsilon > 0$, что при $t \gg t_0$ справедливо $e_{1,1} \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}^T \mathbf{P}_{1,1} = \upsilon(e_{1,1}^2 + \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}^T \mathbf{P}_{1,1} \mathbf{P}_{1,1}^T \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1})$; 5) $\lambda_{\max}^{-1}(\Gamma_1) \|\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}\|^2 \leq \tilde{V}_{1,\Delta} \leq \lambda_{\min}^{-1}(\Gamma_1) \|\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,1}\|^2$; 6) для системы (16), (23) справедлива система дифференциальных неравенств

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{V}}_{1,e} \\ \dot{\tilde{V}}_{1,\Delta} \end{bmatrix} \leq \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{\chi_1}{2} & 2\frac{\pi_{P_{1,1}}}{\chi_1} \\ 4\upsilon & -\frac{\upsilon\eta}{2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{S_1}} \begin{bmatrix} \tilde{V}_{1,e} \\ \tilde{V}_{1,\Delta} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\alpha_f}{\chi_1} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_{S_1}} \quad (24)$$

и система сравнения $\dot{\mathbf{S}}_1(t) = \mathbf{A}_{S_1} \mathbf{S}_1(t) + \mathbf{B}_{S_1}$ для (24), где $\mathbf{S}_1(t) = [s_{1,e}(t), s_{1,\Delta}(t)]^T$, $s_{1,w}(t)$ ($w = e, \Delta$) является мажорантой для $\tilde{V}_{1,w}(t)$ и $s_{1,w}(t_0) \geq \tilde{V}_{1,w}(t_0)$. Тогда система (14)–(16), (23) является экспоненциально диссипативной с оценкой

$$[\tilde{V}_{1,e}(t) \tilde{V}_{1,\Delta}(t)]^T \leq e^{\mathbf{A}_{S_1}(t-t_0)} \mathbf{S}_1(t_0) + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}_{S_1}(t-\tau)} \mathbf{B}_{S_1} d\tau,$$

если $\chi_1^2 \eta > 8\vartheta_{P_{1,1}}$, где $\eta = \pi_{P_{1,1}} \lambda_{\min}^2(\Gamma_1)$, $\pi_{P_{1,1}} \geq 0$, $\|\mathbf{P}_{1,1} \mathbf{P}_{1,1}^T\| \leq \vartheta_{P_{1,1}}(\bar{\alpha}_{P_{1,1}})$, $\lambda_{\min}(\Gamma_1)$ – минимальное собственное число матрицы Γ_1 .

Из теоремы 4 следует, что адаптивная система идентификации позволяет получить смещенные оценки параметров системы (14)–(16).

Рассмотрим систему (17), (19), (21). Пусть d_{k-1} в (2) является постоянным.

Представим $\mathbf{P}_{1,k}$ и $\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}$ в виде: $\mathbf{P}_{1,k} = [\tilde{\mathbf{P}}_{1,k}^T, p_{j,v_{1,2,k-1}}]^T$, $\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k} = [\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}^T, \Delta d_{j,k}]^T$, где $p_{j,v_{1,2,k-1}}$ – преобразование $v_{1,2,k-1}$, j – элемент $\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}$, являющийся преобразованием параметра d_{k-1} . Тогда (20) имеет вид:

$$\dot{e}_{1,k} = -\chi_k e_{1,k} + \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}^T \mathbf{P}_{1,k} + f_{1,k}(\bar{\mathbf{A}}_{1,k} \mathbf{P}_{1,k}), \quad (25)$$

где $f_{1,k}(\cdot) \in \mathbb{R}$ – неопределенность, возникающая из-за невыполнения условия ПВ.

Рассмотрим систему (19), (20), (25) и ФЛ $\tilde{V}_{k,e}(e_{1,k}) = 0.5e_{1,k}^2$, $\tilde{V}_{k,\Delta}(\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}) = 0.5\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}^T \Gamma_k^{-1} \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}$.

Теорема 5. Пусть выполняются условия теоремы 4 и: 1) $y_{1,k}(t) \notin \mathcal{C}_{\underline{\alpha}_{y_{1,k}}, \bar{\alpha}_{y_{1,k}}}$, $\mathbf{P}_{1,k} \notin \mathcal{C}_{\underline{\alpha}_{P_{1,k}}, \bar{\alpha}_{P_{1,k}}}$; 2) $u_{1,k} = v_{u_{1,k}}(y_{1,k-1}, v_{1,k-1})$, $u_{1,k} \notin \mathcal{C}$; 3) $f_{1,k}^2 \leq \alpha_{f_{1,k}}$, где $\alpha_{f_{1,k}} \geq 0$; 4) справедлива оценка $\lambda_{\max}^{-1}(\Gamma_k) \|\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}\|^2 \leq \tilde{V}_{k,\Delta} \leq \lambda_{\min}^{-1}(\Gamma_k) \|\Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}\|^2$, где $\lambda_k(\Gamma_k)$ – минимальное собственное число матрицы Γ_k ; 5) $\|\mathbf{P}_{1,k} \mathbf{P}_{1,k}^T\| \leq \pi_{P_{1,k}} < \bar{\alpha}_{P_{1,k}}$; 6) существует такое $\upsilon > 0$, что при $t \gg t_0$ справедливо

$$e_{1,k} \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}^T \mathbf{P}_{1,k} = \upsilon(e_{1,k}^2 + \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}^T \mathbf{P}_{1,k} \mathbf{P}_{1,k}^T \Delta \bar{\mathbf{A}}_{1,k}); \quad (26)$$

7) для системы (21), (25) справедлива система дифференциальных неравенств

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{V}}_{k,e} \\ \dot{\tilde{V}}_{k,\Delta} \end{bmatrix} \leq \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{\chi_k}{2} & 2\frac{\vartheta_{P_{1,k}}}{\chi_k} \\ 4\upsilon & -\frac{\delta\varphi}{2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_{S_k}} \begin{bmatrix} \tilde{V}_{k,e} \\ \tilde{V}_{k,\Delta} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\alpha_{f_{1,k}}}{\chi_k} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_{S_k}}, \quad (27)$$

и система сравнения $\dot{\mathbf{S}}_k(t) = \mathbf{A}_{S_k} \mathbf{S}_k(t) + \mathbf{B}_{S_k}$ для (27), где $\mathbf{S}_k(t) = [s_{k,e}(t), s_{k,\Delta}(t)]^T$, $s_{k,w}(t)$ ($w = e, \Delta$) является мажорантой для $\tilde{V}_{k,w}(t)$ и $s_{k,w}(t_0) \geq \tilde{V}_{k,w}(t_0)$. Тогда система (19), (20), (25) является экспоненциально диссипативной с оценкой

$$\tilde{\mathbf{V}}_k(t) \leq e^{\mathbf{A}_{S_k}(t-t_0)} \mathbf{S}_k(t_0) + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}_{S_k}(t-\tau)} \mathbf{B}_{S_k} d\tau,$$

если выполняется условие $\chi_k^2 \eta > 32\vartheta_{P_{1,k}}$, где $\pi_{P_{1,k}} \geq 0$, $\eta = \pi_{P_{1,k}} \lambda_{\min}(\Gamma_k)$.

Из (25) следует, что свойства адаптивной системы идентификации k -го слоя зависят от перекрестных связей.

Итак, доказана идентифицируемость ДС по состоянию и выходу k -слоя ДС. Получены результаты, подтверждающие сходимость получаемых оценок параметров системы. Свойства адаптивной системы идентификации зависят от параметров перекрестных связей системы и информационных свойств сигналов в ДС.

Замечание 5. Если ДС содержит неидентичные каналы, то необходимо применять модели (17) для каждого k -слоя. Это же касается и перекрестных связей.

2. ВЗАИМОСВЯЗАННЫЕ СИСТЕМЫ

Рассмотрим систему S_{MC} :

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{F}_1(\mathbf{X}, t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t), \\ \mathbf{L}\mathbf{Y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{F}_2(\mathbf{X}, t),\end{aligned}\quad (28)$$

где $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^m$ – вектор состояния; $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ – матрица состояния; $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{m \times q}$; $\mathbf{F}_1(\mathbf{X}, t): \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^q$ – нелинейная вектор-функция; $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^k$ – вектор входа (управления); $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{m \times k}$; $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^n$ – вектор выхода; $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{n \times m}$; $\mathbf{F}_2(\mathbf{X}, t): \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ – вектор возмущений (ошибок измерения), $\mathbf{L}$ – оператор, определяющий способ формирования вектор $\mathbf{Y}$. В некоторых случаях $\mathbf{L}$ может быть дифференциальным оператором, отражающим динамические свойства системы измерений или способ взаимовлияния между подсистемами. Матрицы $\mathbf{A}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{B}$ являются блочными, отражающими состояние отдельных подсистем. Вектор $\mathbf{F}_2(\mathbf{X}, t)$ может быть как возмущением (ошибкой измерения), так и переменной, отражающей влияние отдельных подсистем.

Множество данных

$$\mathbb{I}_0 = \{\mathbf{Y}(t), \mathbf{U}(t), t \in [t_0, t_N]\}, t_N < \infty. \quad (29)$$

Предположение 1. Элементы $\varphi_{1,i}(x_j) \in \mathbf{F}_1$, $\varphi_{2,i}(x_j) \in \mathbf{F}_2$ являются гладкими однозначными функциями.

Для оценки параметров матриц $\mathbf{A}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ применим модель

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{X}}}(t) = \hat{\mathbf{A}}(t)\hat{\mathbf{X}}(t) + \hat{\mathbf{D}}(t)\mathbf{F}_1(\hat{\mathbf{X}}, t) + \hat{\mathbf{B}}(t)\mathbf{U}(t), \\ \mathbf{L}\hat{\mathbf{Y}}(t) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{F}_2(\hat{\mathbf{X}}, t), \end{cases} \quad (30)$$

где $\hat{\mathbf{A}}(t)$, $\hat{\mathbf{D}}(t)$, $\hat{\mathbf{B}}(t)$ – матрицы с настраиваемыми параметрами.

Задача: для системы (27), удовлетворяющей предположению 1, на основе анализа $\mathbb{I}_0$ построить модель (30) и найти такие законы настройки параметров матриц $\hat{\mathbf{A}}(t)$, $\hat{\mathbf{D}}(t)$ и $\hat{\mathbf{B}}(t)$, чтобы

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\hat{\mathbf{Y}}(t) - \mathbf{Y}(t)\| \leq \delta_y, \quad \delta_y \geq 0,$$

где $\|\cdot\|$ – евклидова норма.

Замечание 6. Для некоторого класса систем выражение (28) можно рассматривать как уравнение,

описывающее связи между подсистемами. В этом случае необходимо оценивать вид вектора $\mathbf{F}_2(\mathbf{X}, t)$.

Для синтеза алгоритмов адаптивной идентификации можно применить подход, изложенный в предыдущем разделе 1.3.

Замечание 7. Если система S_{MC} содержит нелинейные подсистемы, то для принятия решения о классе нелинейности в условиях неопределенности необходимо построить граф взаимосвязи [30], по которому можно принимать решение о типе нелинейности. Это же справедливо, если система содержит несколько нелинейностей в одной подсистеме.

Модели и алгоритмы адаптации совпадают с уравнениями, полученными в предыдущем разделе. Для оценки качества работы адаптивной подсистемы идентификации можно применить теоремы п. 1.2.

3. ПРИМЕРЫ

Пример 1. Рассматривается двухканальная следающая система углового сопровождения цели с идентичными каналами азимута и угла места и асимметричными перекрестными связями [31]:

$$\dot{x} = -a_x x + b_x (g - y), \quad (31)$$

$$\ddot{y} = -a_y \ddot{y} + b_y (x - (g_1 - y_1) - k(g_1 - y_1)'), \quad (32)$$

$$\dot{x}_1 = -a_x x_1 + b_x (g_1 - y_1), \quad (33)$$

$$\ddot{y}_1 = -a_y \ddot{y}_1 + b_y (x_1 + (g - y) + k(g - y)'), \quad (34)$$

где $a_x = T_x^{-1}$, $b_x = T_x^{-1}k_x$; T_x , k_x – постоянная времени и коэффициент усиления усилителя; k – параметр перекрестной связи; $a_y = T_y^{-1}$, $b_y = T_y^{-1}k_y$ – параметры сервомотора; g , g_1 – входные воздействия. Перекрестная связь представлена в скобках как дифференцирующее звено с параметром k , $(g_1 - y_1)' = d(g_1 - y_1)/dt$.

Для измерения доступна информация о выходах звеньев $x_i(t)$, $y_i(t)$ и входах $g_i(t)$ на некотором временном интервале. Необходимо оценить параметры системы (31), (32).

Воспользуемся преобразованием [28], чтобы получить модель для $y(t)$. Рассмотрим систему фильтров (преобразований):

$$\begin{aligned}\dot{p}_y &= -\mu_1 p_y + y, \\ \dot{p}_g &= -\mu_1 p_g + g, \\ \dot{p}_v &= -\mu_1 p_v + v,\end{aligned}\quad (35)$$

где $\vartheta \triangleq x - g_1 + y_1$, $v \triangleq d(g_1 - y_1)/dt$, $p_i(0) = 0$, $i = y, g, v$, $\mu_1 > 0$ – число, не совпадающее с корнями

характеристического уравнения для второго уравнения в (31). Тогда модель для (31) имеет вид:

$$\dot{\hat{x}} = -\chi_x e_x + \hat{a}_x x + \hat{b}_x (g - y), \quad (36.1)$$

$$\dot{\hat{y}} = -\chi_y e_y + \hat{a}_y y + \hat{a}_{p_y} p_y + \hat{a}_9 p_9 + \hat{a}_v p_v, \quad (36.2)$$

где $e_x = \hat{x} - x$, $e_y = \hat{y} - y$, χ_x, χ_y – положительные числа (эталонная модель). Алгоритмы настройки параметров системы (36)

$$\begin{aligned} \dot{\hat{a}}_x &= -\gamma_{a_x} e_x x, & \dot{\hat{b}}_x &= -\gamma_{b_x} e_x (g - y), \\ \dot{\hat{a}}_y &= -\gamma_{a_y} e_y y, & \dot{\hat{a}}_{p_y} &= -\gamma_{a_{p_y}} e_y p_y, \\ \dot{\hat{a}}_9 &= -\gamma_{a_9} e_y p_9, & \dot{\hat{a}}_v &= -\gamma_{a_v} e_y p_v, \end{aligned} \quad (37)$$

где $\gamma_{a_i}, \gamma_{b_i}$ ($i = x, y, a_y, p_y, 9, v$) – положительные числа, гарантирующие сходимость (36).

Система (31), (32) моделировалась с параметрами: $a_x = 1.2$, $b_x = 2$, $a_y = 5.95$, $b_y = 1$, $k = 5$. Входы $g(t) = 1.5 \sin(0.1\pi t)$, $g_1(t) = 1.5 \sin(0.1\pi t)$.

На рис. 1 представлены структуры, подтверждающие наличие асимметричных связей в системе. Рис. 1 отражает влияние перекрестных связей на выход каналов. Анализ параметров $a_{\xi_{0,\varepsilon_1},y} = 0.53$, $a_{\xi_{0,\varepsilon,y_1}} = -0.45$ секущих $\xi_{\varepsilon_1,y}$, ξ_{ε,y_1} показывает, что для них выполняется условие $|a_{\xi_{0,\varepsilon_1},y} - a_{\xi_{0,\varepsilon,y_1}}| > \delta_{\xi_0}$, где $\delta_{\xi_0} = 0.2$. Следовательно, перекрестные связи являются антисимметричными.

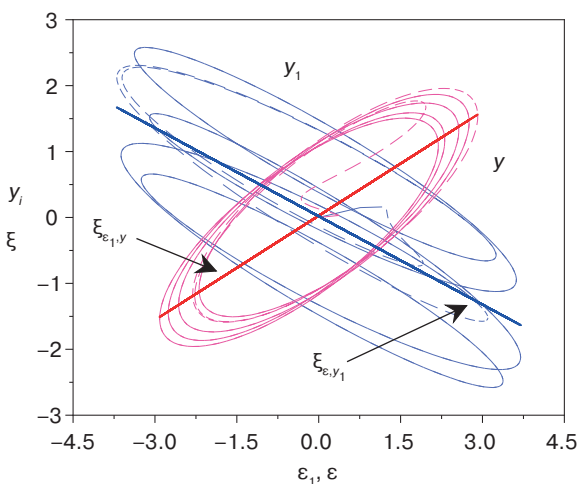


Рис. 1. Оценка структуры перекрестных связей

При оценке параметров системы (31), (32) учитывалось замечание 4. Параметры системы идентификации: $\mu_1 = 1.5$, $\chi_x = 1.5$, $\chi_y = 2$.

Результаты адаптивной идентификации представлены на рис. 2–6. Процесс адаптивной идентификации параметров модели (36) показан на рис. 2 и 3, где t – здесь и далее текущее время в относительных единицах.

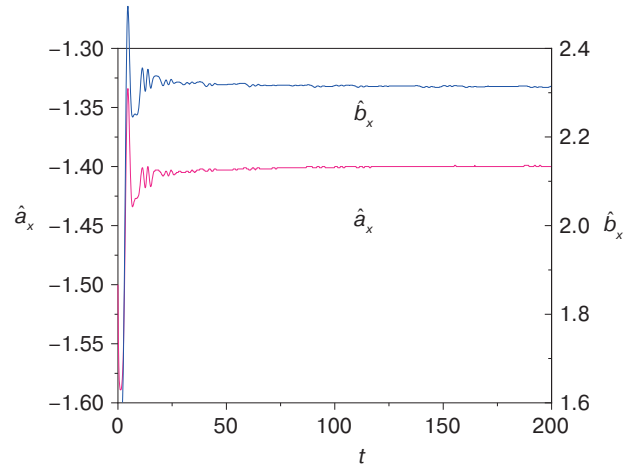


Рис. 2. Настройка параметров модели (36.1)

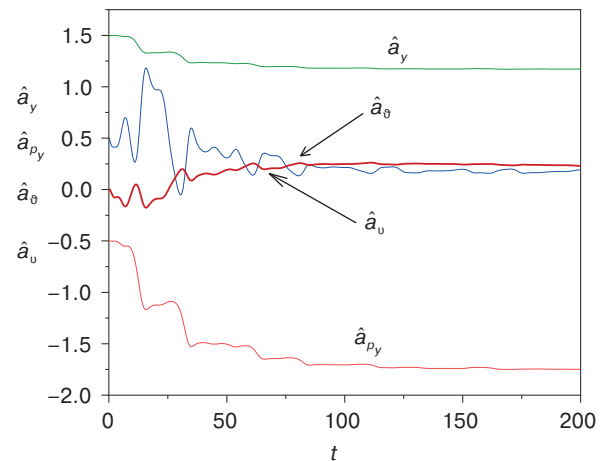


Рис. 3. Настройка параметров модели (36.2)

Ошибки идентификации, получаемые с помощью моделей (36), показаны на рис. 4.

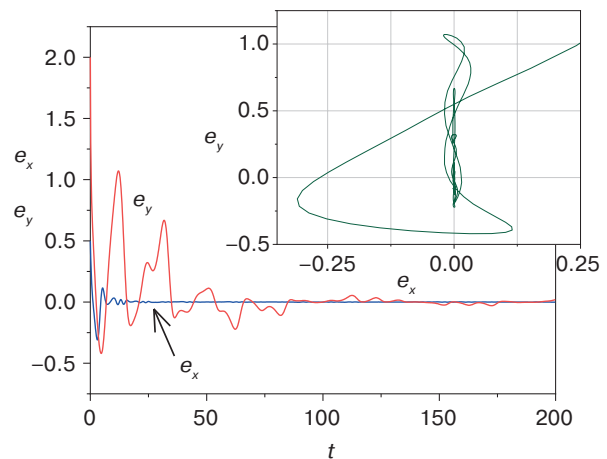


Рис. 4. Изменение ошибки прогнозирования

Из рис. 3 и 4 следует, что настройка параметров слоя 2 зависит как от выхода слоя 1 (модель (36.1)), так и свойств перекрестных связей. Кроме этого, на качество настройки параметров (36.2) также влияет корреляция между выходами элементов (31), (33). Эта связь передается через перекрестные связи. Сделанный вывод подтверждают структуры, показанные на рис. 5, а также утверждения теоремы 5. Процесс настройки параметров модели (36.1) имеет плавный характер (рис. 6).

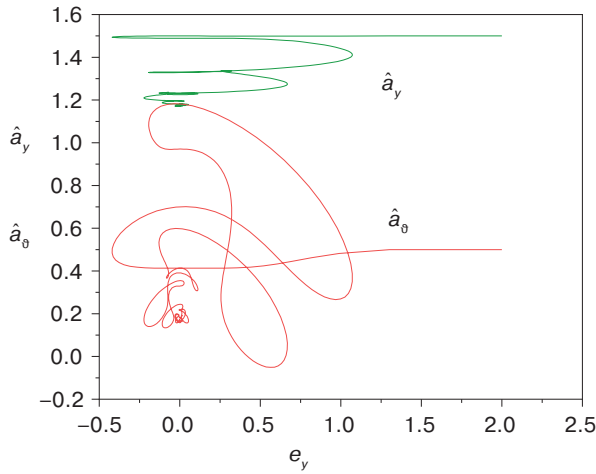


Рис. 5. Настройка параметров модели (36.2)

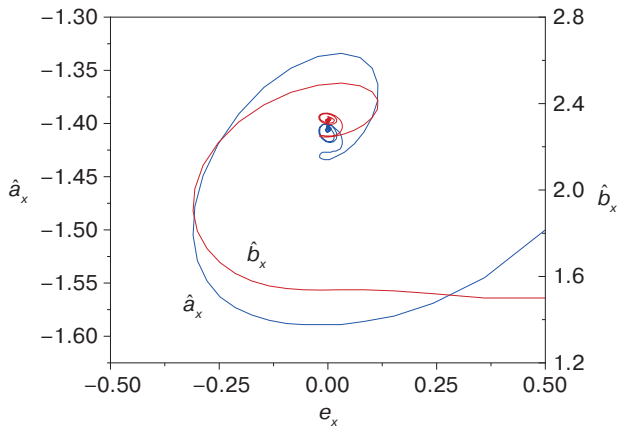


Рис. 6. Настройка параметров модели (36.1)

Пример 2. Псевдолинейный двухканальный корректор описывается системой уравнений [32]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\alpha_1 x_1 + \beta_1 (g - x_6), \\ \dot{x}_2 = -\alpha_2 x_2 + \mu_2 (g - x_6)' + \beta_2 (g - x_6), \\ \dot{x}_6 = x_7, \\ \dot{x}_7 = -\alpha_{01} x_7 - \alpha_{02} x_6 + \beta_0 (x_1 \text{sign}(x_1))(\text{sign}(x_2)), \end{cases} \quad (38)$$

где g – задающее воздействие, x_6 – выход объекта, $g - x_6$ – ошибка рассогласования, x_1 – выход амплитудного канала, x_2 – выход фазового канала,

$u = x_1 \text{sign}(x_1) \cdot \text{sign}(x_2)$ – выход регулятора, $(g - x_6)' = d(g - x_6)/dt$, $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \mu_2, \beta_2, \alpha_{01}, \alpha_{02}, \beta_0$ – параметры системы.

Замечание 8. В [32] осуществлялся предварительный подбор параметров системы.

Предполагаем, что измеряются элементы множества $\mathbb{I}_0 = \{x_1(t), x_2(t), x_6(t), t \in [0, t_k]\}$, где t_k – известное число. Для идентификации параметров системы (38) применялась модель:

$$\dot{\hat{x}}_1 = -k_1 e_1 + \hat{\alpha}_1 x_1 + \hat{\beta}_1 (g - x_6), \quad (39)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = -k_2 e_2 + \hat{\alpha}_2 x_2 + \hat{\mu}_2 d(g - x_6)/dt + \hat{\beta}_2 (g - x_6), \quad (40)$$

$$\dot{\hat{x}}_6 = -k_6 e_6 + \hat{\alpha}_{01} x_6 + \hat{\alpha}_{p_{x_6}} p_{x_6} + \hat{\alpha}_{p_u} p_u, \quad (41)$$

где k_1, k_2, k_6 – известные числа (параметр эталонной модели); $e_i = \hat{x}_i - x_i$, $i = 1, 2, 6$; $\hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i$ ($i = 1, 2$), $\hat{\alpha}_{p_{x_5}}$, $\hat{\alpha}_{p_{x_5}}$ – настраиваемые параметры; $\hat{x}_i$ ($i = 1, 2, 6$) – выходы модели; p_{x_6}, p_u получаются по аналогии с (33).

Алгоритмы адаптации:

$$\dot{\hat{\alpha}}_1 = -\gamma_{\alpha_1} e_1 x_1, \quad \dot{\hat{\beta}}_1 = -\gamma_{\beta_1} e_1 (g - x_6),$$

$$\dot{\hat{\alpha}}_2 = -\gamma_{\alpha_2} e_2 x_2, \quad \dot{\hat{\beta}}_2 = -\gamma_{\beta_2} e_2 (g - x_6), \quad \dot{\hat{\mu}}_2 = -\gamma_{\mu_2} e_2 (g - x_6)', \quad (42)$$

$$\dot{\hat{\alpha}}_{01} = -\gamma_{\alpha_{01}} e_6 x_6, \quad \dot{\hat{\alpha}}_{p_{x_6}} = -\gamma_{p_{x_6}} e_6 p_{x_6}, \quad \dot{\hat{\alpha}}_{p_u} = -\gamma_{p_u} e_6 p_u,$$

где $\gamma_i > 0$ – коэффициент усиления в контуре настройки соответствующего параметра.

Система (38) моделировалась со следующими параметрами: $\alpha_1 = 1.05$, $\beta_1 = 3.5$, $\alpha_2 = 2.2$, $\beta_2 = 2.2$, $\alpha_{01} = 3$, $\alpha_{02} = 5.03$, $\beta_0 = 5.2$, $g(t) = \sin(0.05\pi t)$. Результаты представлены на рис. 7–12.

На рис. 7 показаны структуры (переходной процесс исключен), отражающие фазовые процессы в системе (38). Видно, что система является нелинейной. Применение результатов [30] показывает, что система является структурно идентифицируемой. Следовательно, вход является S-синхронизирующим и позволяет учесть нелинейные свойства ДС.

Анализ показывает, что между переменными x_1 и x_2 существует взаимосвязь (коэффициент корреляции равен 0.94). Их влияние на выход системы ДС отражает диаграмма плотности (рис. 8). Диаграмма плотности характеризует влияние x_1, x_2 на изменение переменной x_6 . Четко видны интервалы влияния переменных на x_6 . Взаимовлияние сказывается на сходимости адаптивных алгоритмов.

Рис. 9 представляет настройку модели амплитудного канала, а рис. 10 – фазового канала.

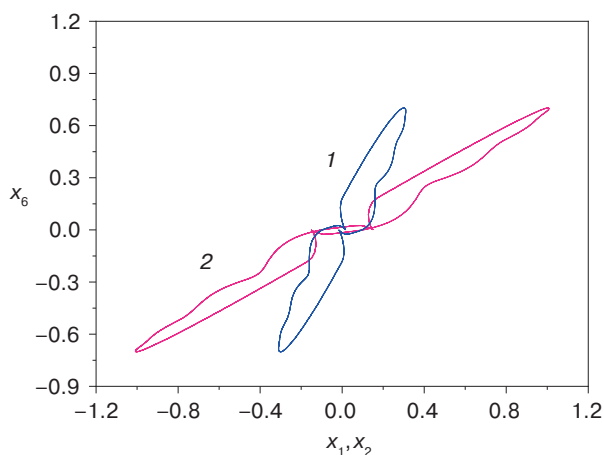


Рис. 7. Фазовые портреты системы:
1 – $x_6(x_2)$, 2 – $x_6(x_1)$

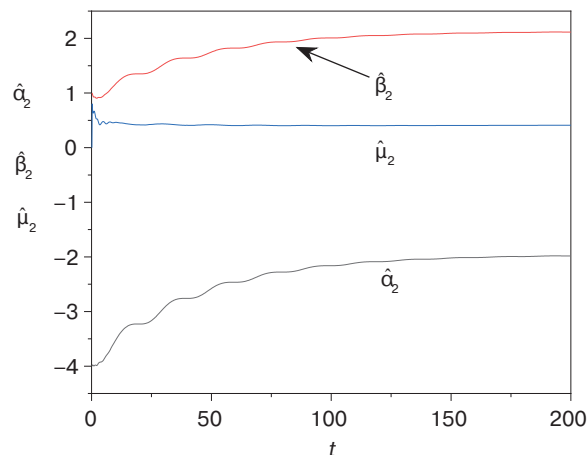


Рис. 10. Настройка параметров модели (40)

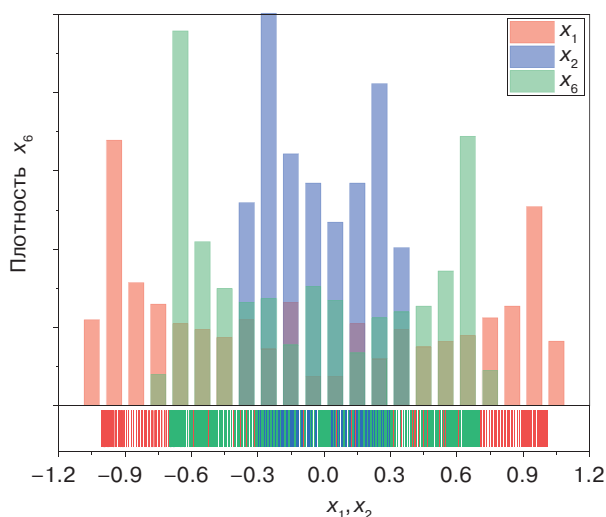


Рис. 8. Оценка взаимовлияния переменных x_1, x_2 на x_6

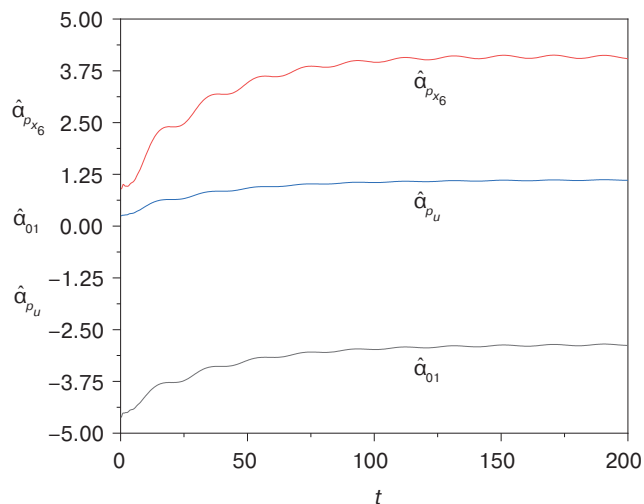


Рис. 11. Настройка параметров модели (41)

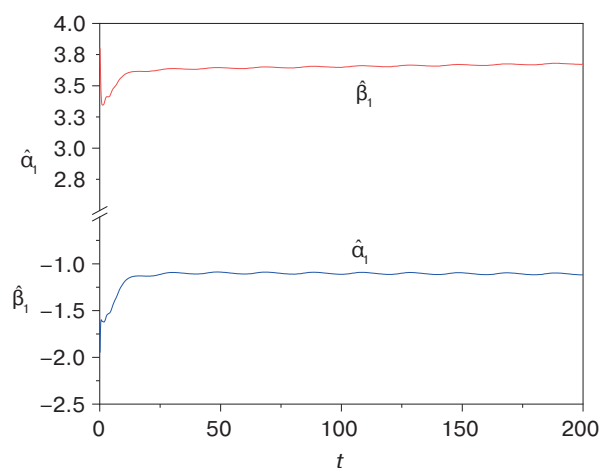


Рис. 9. Настройка параметров модели (39)

Настройка параметров модели объекта показана на рис. 11. На настройку влияет управляющее воздействие.

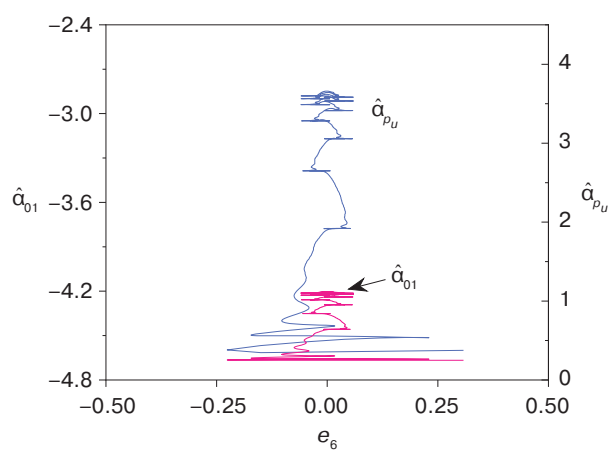


Рис. 12. Динамика работы контура настройки модели (41)

Более сложной является динамика процессов при настройке модели (40). Здесь сказывается влияние входа. Для системы ДС справедливо утверждение теоремы 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к идентификации МС. Сначала рассматриваются особенности адаптивной идентификации ДС с перекрестными связями. Получены условия идентифицируемости системы в пространстве состояний и выходном пространстве. Рассмотрены структурные аспекты идентификации ДС, показано влияние свойств входа на возможность оценки параметров системы. Получены адаптивные алгоритмы идентификации ДС с идентичными каналами. Доказана идентифицируемость ДС по состоянию и выходу. Получены результаты, подтверждающие сходимость получаемых оценок параметров системы. Свойства адаптивной системы идентификации зависят

от параметров перекрестных связей системы и информационных свойств сигналов в ДС. Рассмотрен случай взаимосвязанных систем. Отмечена роль априорной информации при учете существующих взаимосвязей. Отмечено, что при соответствующем расщеплении МС можно применять подходы, предложенные для ДС. Приведены примеры адаптивной идентификации реальных систем. Рассмотрен случай ДС с нелинейным управлением и сложными взаимосвязями.

В работе рассмотрены только отдельные аспекты этой многогранной предметной области. Предложен подход, который позволяет оценивать динамику процессов в адаптивной системе. Он позволяет учитывать влияние элементов системы на качество процесса настройки параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозовский В.Т. *Многосвязные системы автоматического регулирования*. М.: Энергия; 1970. 288 с.
2. Зырянов Г.В. *Системы управления многосвязными объектами*: учебное пособие. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; 2010. 112 с.
3. Мееров М.В., Литвак Б.Л. *Оптимизация систем многосвязного управления*. М.: Наука; 1972. 344 с.
4. Буков В.Н., Максименко И.М., Рябченко В.Н. Регулирование многосвязных систем. *Автоматика и телемеханика*. 1998;6:97–110.
5. Воронов А.А. *Введение в динамику сложных управляемых систем*. М.: Наука; 1985. 352 с.
6. Егоров И.Н., Умнов В.П. *Системы управления электроприводов технологических роботов и манипуляторов*: учебное пособие. Владимир: Изд-во ВлГУ; 2022. 314 с.
7. Егоров И.Н. *Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами*. Владимир: Изд-во ВлГУ; 2010. 192 с.
8. Gupta N., Chopra N. Stability analysis of a two-channel feedback networked control system. In: *2016 Indian Control Conference (ICC)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/INDIANCC.2016.7441129>
9. Pawlak A., Hasiewicz Z. Non-parametric identification of multi-channel systems by multiscale expansions. In: *2002 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 2011. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2002.5744953>
10. Kholmatov U. The possibility of applying the theory of adaptive identification to automate multi-connected objects. *Am. J. Eng. Technol.* 2022;4(03):31–38. URL: <https://inlibrary.uz/index.php/tajet/article/view/5789>
11. Aliyeva A.S. Identification of multiconnected dynamic objects with uncertainty based on neural technology and reference converters. *Informatics and Control Problems*. 2019;39(2):93–102. URL: <https://icp.az/2019/2-11.pdf>
12. Hua C., Guan X., Shi P. Decentralized robust model reference adaptive control for interconnected time-delay systems. In: *Proceeding of the 2004 American Control Conference*. Boston, Massachusetts June 30 – July 2, 2004. 2004. P. 4285–4289. <https://doi.org/10.23919/ACC.2004.1383981>
13. Ворчик Б.Г. Идентифицируемость многосвязной замкнутой стохастической системы. Декомпозиция замкнутой системы при идентификации. *Автоматика и телемеханика*. 1977;2:14–28.
14. Glentis G.-O., Slump C.H. A highly modular normalized adaptive lattice algorithm for multichannel least squares filtering. In: *1995 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1995;2:1420–1423. <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICASSP.1995.480508>
15. Ali M., Abbas H., Chughtai S.S., Werner H. Identification of spatially interconnected systems using neural network. In: *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2011. <https://doi.org/10.1109/CDC.2010.5717080>
16. Yang Q., Zhu M., Jiang T., He J., Yuan J., Han J. Decentralized Robust Adaptive output feedback stabilization for interconnected nonlinear systems with uncertainties. *J. Control Sci. Eng.* 2016;2016:article ID 3656578. <https://doi.org/10.1155/2016/3656578>
17. Wu H. Decentralized adaptive robust control of uncertain large-scale non-linear dynamical systems with time-varying delays. *IET Control Theory & Applications*. 2012;6(5):629–640. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2011.0015>
18. Fan H., Han L., Wen C., Xu L. Decentralized adaptive output-feedback controller design for stochastic nonlinear interconnected systems. *Automatica*. 2012;48(11):2866–2873. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.08.022>
19. Ali M., Chughtai S.S., Werner H. Identification of spatially interconnected systems. In: *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*. 2010. <https://doi.org/10.1109/CDC.2009.5399748>

20. Ioannou P.A. Decentralized adaptive control of interconnected systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 1986;31(4):291–298. <https://doi.org/10.1109/TAC.1986.1104282>
21. Sanandaji B.M., Vincent T.L., Wakin M.B. A review of sufficient conditions for structure identification in interconnected systems. *IFAC Proceedings Volumes*. 2012;45(16):1623–1628. <https://doi.org/10.3182/20120711-3-BE-2027.00254>
22. Soverini U., Söderström T. Blind identification of two-channel FIR systems: a frequency domain approach. *IFAC-PapersOnLine*. 2020;53(2):914–920. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.855>
23. Huang Y., Benesty J., Chen J. Adaptive blind multichannel identification. In: Benesty J., Sondhi M.M., Huang Y.A. (Eds.). *Springer Handbook of Speech Processing*. Berlin, Heidelberg: Springer Handbooks; 2008. P. 259–280. https://doi.org/10.1007/978-3-540-49127-9_13
24. Benesty J., Paleologu C., Dogariu L.-M., Ciochină S. Identification of linear and bilinear systems: a unified study. *Electronics*. 2021;10(15):1790. <https://doi.org/10.3390/electronics10151790>
25. Bretthauer G., Gamaleja T., Wilfert H.-H. Identification of parametric and nonparametric models for MIMO closed loop systems by the correlation method. *IFAC Proceedings Volumes*. 1984;17(2):753–758. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)61062-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)61062-0)
26. Lomov A.A. On quantitative a priori measures of identifiability of coefficients of linear dynamic systems. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2011;50:1–13. <https://doi.org/10.1134/S106423071101014X>
27. Красовский А.А. О двухканальных системах автоматического регулирования с антисимметричными связями. *Автоматика и телемеханика*. 1957;18(2):126–136.
28. Карабутов Н.Н. Об адаптивной идентификации систем с несколькими нелинейностями. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):94–105. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-94-10>
29. Карабутов Н.Н. *Адаптивная идентификация систем*. М.: УПСС; 2007. 384 с.
30. Karabutov N. Structural identifiability of systems with multiple nonlinearities. *Contemp. Math.* 2021;2(2):140–161. <https://doi.org/10.37256/cm.222021763>
31. Барский А.Г. *К теории двумерных и трехмерных систем автоматического регулирования*. М.: Логос; 2015. 192 с.
32. Скороспешкин М.В. Адаптивное двухканальное корректирующее устройство для систем автоматического регулирования. *Известия Томского политехнического университета*. 2008;312(5):52–57.

REFERENCES

1. Morozovskii V.T. *Mnogosvyaznye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya (Multi-Connected Automatic Control Systems)*. Moscow: Energiya; 1970. 288 p. (in Russ.).
2. Zyryanov G.V. *Sistemy upravleniya mnogosvyaznymi ob'ektami (Control Systems for Multi-Connected Objects)*: textbook. Chelyabinsk: South Ural State University Publishing Center; 2010. 112 p. (in Russ.).
3. Meerov M.V., Litvak B.L. *Optimizatsiya sistem mnogosvyaznogo upravleniya (Optimization of Multi-Connection Control Systems)*. Moscow: Nauka; 1972. 344 p. (in Russ.).
4. Bukov V.N., Maksimenko I.M., Ryabchenko V.N. Control of multivariable systems. *Autom. Remote Control*. 1998;59(6): 832–842.
[Original Russian Text: Bukov V.N., Maksimenko I.M., Ryabchenko V.N. Control of multivariable systems. *Avtomatika i Telemekhanika*. 1998;6:97–110 (in Russ.).]
5. Voronov A.A. *Vvedenie v dinamiku slozhnykh upravlyaemykh system (Introduction in Dynamics of Complex Controlled Systems)*. Moscow: Nauka; 1985. 352 p. (in Russ.).
6. Egorov I.N., Umnov V.P. *Sistemy upravleniya elektroprivodov tekhnologicheskikh robotov i manipulyatorov (Control Systems for Electric Drives of Technological Robots and Manipulators)*: textbook. Vladimir: Vladimir State University Publ.; 2022. 314 p. (in Russ.).
7. Egorov I.N. *Pozitsionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami (Positional Force Control of Robotic and Mechatronic Devices)*. Vladimir: Vladimir State University Publ.; 2010. 192 p. (in Russ.).
8. Gupta N., Chopra N. Stability analysis of a two-channel feedback networked control system. In: *2016 Indian Control Conference (ICC)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/INDIANCC.2016.7441129>
9. Pawlak A., Hasiewicz Z. Non-parametric identification of multi-channel systems by multiscale expansions. In: *2002 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 2011. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2002.5744953>
10. Kholmatov U. The possibility of applying the theory of adaptive identification to automate multi-connected objects. *Am. J. Eng. Technol.* 2022;4(03):31–38. Available from URL: <https://inlibrary.uz/index.php/tajet/article/view/5789>
11. Aliyeva A.S. Identification of multiconnected dynamic objects with uncertainty based on neural technology and reference converters. *Informatics and Control Problems*. 2019;39(2):93–102. Available from URL: <https://icp.az/2019/2-11.pdf>
12. Hua C., Guan X., Shi P. Decentralized robust model reference adaptive control for interconnected time-delay systems. In: *Proceeding of the 2004 American Control Conference*. Boston, Massachusetts: June 30 – July 2, 2004. P. 4285–4289. <https://doi.org/10.23919/ACC.2004.1383981>
13. Vorchik B.G. Identifiability of a multivariable closed-loop stochastic system. Decomposition of a closed-loop system in identification. *Autom. Remote Control*. 1977;38(2):172–183.
[Original Russian Text: Vorchik B.G. Identifiability of a multivariable closed-loop stochastic system. Decomposition of a closed-loop system in identification. *Avtomatika i Telemekhanika*. 1977;2:14–28 (in Russ.).]

14. Glentis G.-O., Slump C.H. A highly modular normalized adaptive lattice algorithm for multichannel least squares filtering. In: *1995 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1995;2:1420–1423. <https://doi.ieeeecomputersociety.org/10.1109/ICASSP.1995.480508>
15. Ali M., Abbas H., Chughtai S.S., Werner H. Identification of spatially interconnected systems using neural network. In: *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2011. <https://doi.org/10.1109/CDC.2010.5717080>
16. Yang Q., Zhu M., Jiang T., He J., Yuan J., Han J. Decentralized Robust Adaptive output feedback stabilization for interconnected nonlinear systems with uncertainties. *J. Control Sci. Eng.* 2016;2016:article ID 3656578. <https://doi.org/10.1155/2016/3656578>
17. Wu H. Decentralized adaptive robust control of uncertain large-scale non-linear dynamical systems with time-varying delays. *IET Control Theory & Applications*. 2012;6(5):629–640. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2011.0015>
18. Fan H., Han L., Wen C., Xu L. Decentralized adaptive output-feedback controller design for stochastic nonlinear interconnected systems. *Automatica*. 2012;48(11):2866–2873. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.08.022>
19. Ali M., Chughtai S.S., Werner H. Identification of spatially interconnected systems. In: *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*. 2010. <https://doi.org/10.1109/CDC.2009.5399748>
20. Ioannou P.A. Decentralized adaptive control of interconnected systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 1986;31(4):291–298. <https://doi.org/10.1109/TAC.1986.1104282>
21. Sanandaji B.M., Vincent T.L., Wakin M.B. A review of sufficient conditions for structure identification in interconnected systems. *IFAC Proceedings Volumes*. 2012;45(16):1623–1628. <https://doi.org/10.3182/20120711-3-BE-2027.00254>
22. Soverini U., Söderström T. Blind identification of two-channel FIR systems: a frequency domain approach. *IFAC-PapersOnLine*. 2020;53(2):914–920. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.855>
23. Huang Y., Benesty J., Chen J. Adaptive blind multichannel identification. In: Benesty J., Sondhi M.M., Huang Y.A. (Eds.). *Springer Handbook of Speech Processing*. Berlin, Heidelberg: Springer Handbooks; 2008. P. 259–280. https://doi.org/10.1007/978-3-540-49127-9_13
24. Benesty J., Paleologu C., Dogariu L.-M., Ciochină S. Identification of linear and bilinear systems: a unified study. *Electronics*. 2021;10(15):1790. <https://doi.org/10.3390/electronics10151790>
25. Brethauer G., Gamaleja T., Wilfert H.-H. Identification of parametric and nonparametric models for MIMO closed loop systems by the correlation method. *IFAC Proceedings Volumes*. 1984;17(2):753–758. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)61062-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)61062-0)
26. Lomov A.A. On quantitative a priori measures of identifiability of coefficients of linear dynamic systems. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2011;50:1–13. <https://doi.org/10.1134/S106423071101014X>
27. Krasovskii A.A. Two-channel automatic regulation systems with antisymmetric cross connections. *Autom. Remote Control*. 1957;18(2):139–150.
[Original Russian Text: Krasovskii A.A. Two-channel automatic regulation systems with antisymmetric cross connections. *Avtomatika i Telemekhanika*. 1957;18(2):126–136 (in Russ.).]
28. Karabutov N.N. On adaptive identification of systems having multiple nonlinearities. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):94–105 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-94-10>
29. Karabutov N.N. *Adaptivnaya identifikatsiya sistem (Adaptive Systems Identification)*. Moscow: URSS; 2007. 384 p. (in Russ.).
30. Karabutov N. Structural identifiability of systems with multiple nonlinearities. *Contemp. Math.* 2021;2(2):140–161. <https://doi.org/10.37256/cm.222021763>
31. Barskii A.G. *K teorii dvumernykh i trekhmernykh sistem avtomaticheskoyu regulirovaniya (On the Theory of Two-Dimensional and Three-Dimensional Automatic Control Systems)*. Moscow: Logos; 2015. 192 p. (in Russ.).
32. Skorospeshkin M.V. Adaptive two-channel correction device for automatic control systems. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2008;312(5):52–57 (in Russ.).

Об авторе

Карабутов Николай Николаевич, д.т.н., профессор, кафедра проблем управления, Институт искусственного интеллекта, ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: karabutov@mirea.ru. Scopus Author ID 6603372930, ResearcherID P-5683-2015, SPIN-код РИНЦ 9646-9721, <https://orcid.org/0000-0002-3706-7431>

About the author

Nikolay N. Karabutov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Problems Control, Institute of Artificial Intelligence, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: karabutov@mirea.ru. Scopus Author ID 6603372930, ResearcherID P-5683-2015, RSCI SPIN-code 9646-9721, <https://orcid.org/0000-0002-3706-7431>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 621.372.8

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-77-89>

EDN GTXQII



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Модели симметричных трехслойных волноводных структур с градиентной сердцевиной и нелинейно-оптическими обкладками

С.Е. Савотченко ©

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

© Автор для переписки, e-mail: savotchenkose@mail.ru

Резюме

Цели. Выявление закономерностей дисперсионных свойств волноводных мод оптического диапазона в слоистых средах с распределенными оптическими характеристиками представляет собой актуальную и важную задачу, имеющую фундаментальное и прикладное значение в нелинейной оптике и оптоэлектронике. Сочетание нелинейного отклика и градиентных распределений оптических свойств соседних слоев слоистой структуры дает возможность легко подобрать требуемые значения выходных характеристик с помощью широкого ряда управляющих параметров, что делает такие волноводы наиболее перспективными с точки зрения возможных технических приложений. Цель работы – развитие теории трехслойных плоских волноводных структур с градиентной сердцевиной и нелинейно-оптическими обкладками с произвольными профилями, в рамках которой представляется возможным нахождение точных аналитических решений нелинейных стационарных волновых уравнений, описывающих в явном виде поперечное распределение электрического поля волноводных мод.

Методы. Используются аналитические методы математической физики и теории специальных функций применительно к нелинейной и волноводной оптике.

Результаты. Проведено теоретическое описание поперечных стационарных волн, распространяющихся вдоль плоской симметричной трехслойной волноводной структуры, состоящей из внутреннего градиентного слоя, зажатого между нелинейно-оптическими обкладками, причем пространственный профиль диэлектрической проницаемости прослойки и вид нелинейного отклика среды обкладок предполагаются произвольными. Сформулирована математическая модель такой волноводной структуры на основе нелинейных уравнений с распределенными коэффициентами. Получены решения, описывающие в общем виде поперечное распределение амплитуды огибающей электрического поля. В силу поперечной симметрии трехслойной волноводной структуры в ней могут возбуждаться четные и нечетные стационарные моды, соответствующие симметричным и антисимметричным поперечным профилям поля. Разработан метод построения четных (симметричных) и нечетных (антисимметричных) решений, существующих при определенных дискретных значениях эффективного показателя преломления / константы распространения. Такие дискретные спектры получены в слоях с градиентными линейным, параболическим и экспоненциальным профилями. В качестве примера применения сформулированной теории детально проанализирован случай симметричной трехслойной волноводной структуры, внутренний градиентный слой которой характеризуется параболическим пространственным профилем, а внешние обкладки представляют собой керровские нелинейно-оптические среды. На основе анализа полученного точного аналитического решения установлено, что напряженность электрического поля для основной моды и моды первого порядка увеличивается с ростом параметра параболического профиля, характеризующего относительное изменение диэлектрической проницаемости в прослойке, однако уменьшается для мод более высоких порядков.

Выводы. Развита в данной работе теория позволяет наглядно описать в явном аналитическом виде поперечные распределения стационарного электрического поля в плоских симметричных трехслойных волноводах. Полученные результаты расширяют представления о физических свойствах нелинейных волн и закономерностях локализации световых пучков в распределенных средах и могут быть полезными для разработки различных оптических волноводных устройств.

Ключевые слова: слоистая структура, слоистый волновод, оптический волновод, нелинейная оптика, оптическая нелинейность, градиентный слой, нелинейные волны, керровские нелинейно-оптические среды, управляемые волны, волноводная мода

• Поступила: 01.03.2024 • Доработана: 29.03.2024 • Принята к опубликованию: 05.08.2024

Для цитирования: Савотченко С.Е. Модели симметричных трехслойных волноводных структур с градиентной сердцевинной и нелинейно-оптическими обкладками. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):77–89. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-77-89>

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Models of symmetric three-layer waveguide structures with graded-index core and nonlinear optical liners

Sergey E. Savotchenko [®]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: savotchenkose@mail.ru

Abstract

Objectives. Determining the patterns of dispersion properties of waveguide modes of the optical range in layered media with distributed optical properties is a both a pressing and significant matter for study. It has fundamental and applied importance in nonlinear optics and optoelectronics. The combination of a nonlinear response and graded-index distributions of the optical properties of adjacent layers of a layered structure enables the desired values of the output characteristics using a wide range of control parameters to be selected easily. This renders such waveguides the most promising from the point of view of possible technical applications. The aim of this paper is to develop the theory of three-layer planar waveguide structures with a graded-index core and nonlinear optical liners with arbitrary profiles. By doing so it may be possible to find exact analytical solutions to nonlinear stationary wave equations describing explicitly the transverse electric field distribution of waveguide modes.

Methods. The analytical methods of mathematical physics and the theory of special functions applied to nonlinear and waveguide optics are used herein.

Results. The study provides a theoretical description of transverse stationary waves propagating along a symmetrical three-layer planar waveguide structure consisting of the inner graded-index layer sandwiched between nonlinear optical plates. It assumes an arbitrary spatial profile of the interlayer dielectric constant and the nature of the nonlinear response of the liner medium. The mathematical model of this waveguide structure formulated herein is based on nonlinear equations with distributed coefficients. The solutions obtained describe in general terms the transverse distribution of the amplitude of the electric field envelope. The transverse symmetry of the three-layer waveguide structure enables even and odd stationary modes corresponding to symmetric and antisymmetric transverse field profiles to be excited in it. A method was developed for constructing even (symmetric) and odd (antisymmetric) solutions which exist at certain discrete values of the effective refractive index/propagation constant. These discrete

spectra were obtained in layers with graded-index linear, parabolic, and exponential profiles. The symmetrical three-layer waveguide structure with inner graded-index layer characterized by parabolic spatial profile and outer liners as Kerr nonlinear optical media is analyzed in detail, as an example of the application of the formulated theory. Analysis of the resulting exact analytical solution indicates that the electric field strength for the fundamental and first-order modes increases with increasing parabolic profile parameter, characterizing the relative change of the dielectric constant in the interlayer, while decreasing for higher order modes.

Conclusions. The theory developed in this paper supports the unambiguous description of the transverse distributions of the stationary electric field in planar symmetrical three-layer waveguides in an explicit analytical form. The results extend the understanding of the physical properties of nonlinear waves and the localization patterns of light beams in distributed media, and may be useful in the design of various optical waveguide devices.

Keywords: layered structure, layered waveguide, optical waveguide, nonlinear optics, optical nonlinearity, graded-index layer, nonlinear waves, Kerr nonlinear optical media, guided waves, waveguide mode

• Submitted: 01.03.2024 • Revised: 29.03.2024 • Accepted: 05.08.2024

For citation: Savotchenko S.E. Models of symmetric three-layer waveguide structures with graded-index core and nonlinear optical liners. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):77–89. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-77-89>

Financial disclosure: The author has no financial or property interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка оптических волноводов с требуемыми характеристиками является важной прикладной задачей нелинейной оптики [1–3]. Для успешного решения таких задач необходимо теоретическое моделирование проектируемых систем, позволяющее описать их свойства, прогнозировать характеристики и оптимизировать процесс разработки. В связи с этим большое внимание в научной литературе уделяется развитию теоретических основ моделирования процессов возбуждения, распространения и локализации электромагнитных волн в различных оптических средах [4, 5].

Получить требуемые, зачастую, уникальные характеристики полей в волноводных структурах можно наиболее эффективно в случае сочетания сред с различными оптическими свойствами [6, 7]. В частности, перспективными и обладающими широким разнообразием свойств признаны такие классы сред, в которых оптические свойства существенно зависят от пространственного распределения показателя преломления (или диэлектрической проницаемости) [8] или характеризуются нелинейным оптическим откликом, при котором диэлектрическая проницаемость зависит от интенсивности электрического поля [9]. Первую группу сред называют градиентными [10], а вторую – нелинейными [11].

Форма зависимости оптических характеристик от указанных величин может быть различной, определяемой физическими свойствами реальных кристаллов. В частности, наиболее часто встречающейся формой нелинейного отклика является линейная зависимость диэлектрической проницаемости

от квадрата амплитуды (интенсивности) электрического поля (света), называемая керровской нелинейностью [12]. Волны и другие локализованные возмущения в таких средах достаточно хорошо изучены в различных модификациях [13, 14], в т.ч. аналитическими методами [15, 16], когда удастся получить точные решения нелинейного волнового уравнения в различных моделях [17, 18].

Для описания экспериментально наблюдаемых зависимостей пространственного распределения оптических характеристик используются различные функции (профили), моделирующие изменение показателя преломления с расстоянием от границы раздела оптических сред [19]. Нахождение точных аналитических решений допускают определенные профили, к примеру, такие как линейный [20], параболический [21], экспоненциальный [22] и другие [23, 24].

В последнее время активизировалось теоретическое изучение волноводных свойств границ раздела между градиентными и нелинейными средами [25, 26]. В частности, были получены решения, описывающие локализацию света вдоль границы раздела между керровской нелинейной средой и средой с линейным [27, 28], экспоненциальным профилями показателя преломления [29].

С точки зрения технических приложений важное место занимают исследования волноводных свойств многослойных сред [30], в т.ч. и трехслойных структур [31]. Теоретическое изучение нелинейных волн в трехслойных структурах проводилось на протяжении многих лет [32, 33], в т.ч. и в слоистых градиентных средах [34]. В последнее время были получены аналитические решения для симметричных трехслойных структур, в которых внутренний

слой описан симметричным линейно-градиентным профилем, а внешние слои характеризуются фото-рефрактивным нелинейным откликом [35], керровской нелинейностью [36], ступенчатой нелинейностью [37]. Также была рассмотрена симметричная структура с параболическим градиентным внутренним слоем, помещенным между средами с керровской нелинейностью.

В связи с возникающим многообразием возможных сочетаний нелинейностей и профилей градиентных слоев возникает необходимость построения обобщенной модели симметричной волноводной структуры. В данной работе предлагается обобщение модели трехслойной симметричной плоской структуры, в которой внутренняя прослойка характеризуется произвольным градиентным профилем, а внешние слои – нелинейно-оптическим откликом. Подстановка конкретного вида профилей диэлектрической проницаемости и формы нелинейного отклика в модельные уравнения позволит получить аналитические решения для описания пространственного распределения амплитуды огибающей перпендикулярно слоям структуры. Получаемые аналитические выражения, в свою очередь, позволяют легко и наглядно выявить закономерности локализации световых пучков в слоистых волноводных структурах.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ ВОЛНОВОДНОЙ СТРУКТУРЫ

1.1. Формулировка модели

Рассмотрим плоскую симметричную относительно центра трехслойную структуру из немагнитных материалов с оптически однородными свойствами в продольном направлении. Границы раздела слоев будем считать плоскими. Поместим начало координат в середину внутреннего слоя (сердцевины или прослойки), в плоскости yz , ось x направим перпендикулярно плоскостям границ раздела слоев, а ось z – вдоль слоев в направлении распространения волн. Границы раздела слоев пусть расположены в плоскостях $x = \pm a$ (тогда толщина прослойки принимается $2a$). Среда во всех слоях рассматриваются без диэлектрических потерь.

В рассматриваемой модели внутренний слой характеризуется пространственной неоднородностью оптических свойств в поперечном направлении (градиентный слой), а внешние прилегающие слои (обкладки) характеризуются оптической нелинейностью (нелинейные слои), т.е. зависимостью показателя преломления (или диэлектрической проницаемости) от интенсивности света. При этом толщина прослойки считается много

меньше толщин внешних обкладок. Поэтому, если рассматривать распределение электрического поля, локализованного вблизи сердцевины, обкладки можно рассматривать как полуограниченные среды, пренебрегая влиянием далеко расположенных по сравнению с величиной a границ. Такое рассмотрение допустимо при условии, что поле быстро убывает при удалении от границ раздела и становится пренебрежительно малым, не достигнув внешних границ толстых обкладок.

Пусть вдоль границ раздела трехслойной волноводной структуры распространяется поперечная волна, компоненту напряженности электрического поля которой можно записать в виде:

$$E_y(x, z) = \psi(x)e^{i(\beta z - \omega t)}, \quad (1)$$

где $\psi(x)$ – пространственное распределение напряженности электрического поля в поперечном направлении (амплитуда огибающей), ω – частота, $\beta = kn$ – константа распространения, $n = ck/\omega$ – эффективный показатель преломления, c – скорость света в вакууме, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, t – время.

Известно [4, 5], что поле $\psi(x)$ определяется как решение стационарного уравнения (магнитная проницаемость равна единице):

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \{\epsilon(x, I) - n^2\}k^2\psi(x) = 0, \quad (2)$$

где диэлектрическую проницаемость трехслойной волноводной структуры можно записать в виде

$$\epsilon(x, I) = \begin{cases} \epsilon_G(x), & |x| < a, \\ \epsilon_N(I), & |x| > a, \end{cases} \quad (3)$$

где функция $\epsilon_G(x)$ определяет зависимость диэлектрической проницаемости от пространственной координаты в перпендикулярном слоям направлении (диэлектрическая проницаемость градиентного слоя), а функция $\epsilon_N(I)$ определяет зависимость диэлектрической проницаемости от интенсивности света $I = |E|^2$, E – амплитуда напряженности электрического поля (диэлектрическая проницаемость нелинейных обкладок).

Представим поперечное распределение поля в виде:

$$\psi(x) = \begin{cases} \psi_N^{(-)}(x), & x < -a, \\ \psi_G(x), & |x| < a, \\ \psi_N^{(+)}(x), & x > a. \end{cases} \quad (4)$$

Тогда из (2) получаются уравнения:

$$\frac{d^2 \psi_N^{(-)}(x)}{dx^2} + \{\epsilon_N(I) - n^2\} k^2 \psi_N^{(-)}(x) = 0, \quad x < -a, \quad (5)$$

$$\frac{d^2 \psi_G(x)}{dx^2} + \{\epsilon_G(x) - n^2\} k^2 \psi_G(x) = 0, \quad |x| < a, \quad (6)$$

$$\frac{d^2 \psi_N^{(+)}(x)}{dx^2} + \{\epsilon_N(I) - n^2\} k^2 \psi_N^{(+)}(x) = 0, \quad x > a, \quad (7)$$

которые дополняются граничными условиями, соответствующими требованиям непрерывности компонент поля на границах раздела слоев:

$$\begin{aligned} \psi_N(\pm a \pm 0) &= \psi_G^{(\pm)}(\pm a \pm 0), \\ \frac{d\psi_N(\pm a \pm 0)}{dx} &= \frac{d\psi_G^{(\pm)}(\pm a \pm 0)}{dx}, \end{aligned} \quad (8)$$

а также условию исчезновения поля на бесконечности: $|\psi_N^{(\pm)}(x)| \rightarrow 0, |x| \rightarrow \infty$.

Очевидным с физической точки зрения дополнением необходимо считать требование ограниченности решения всюду. Таким образом, совокупность уравнений (5)–(7) и граничных условий (8) представляет собой математическую формулировку предложенной модели трехслойной волноводной структуры с профилем диэлектрической проницаемости, описываемой распределенным выражением (3).

1.2. Дисперсионное уравнение в общем случае

Во внутреннем слое решение уравнения (6) можно представить в виде:

$$\psi_G(x) = C_1 F_1(x) + C_2 F_2(x), \quad (9)$$

где $C_{1,2}$ – величины, зависящие от оптических и геометрических параметров системы и определяемые из граничных условий (8); $F_{1,2}(x)$ – специальные функции, которые являются линейно независимыми решениями уравнения (6) при заданном профиле диэлектрической проницаемости $\epsilon_G(x)$. Поскольку (6) представляет собой линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка с зависящим от переменной x коэффициентом, то его решения обычно в наиболее общем виде выражаются через гипергеометрические функции. В случае определенных видов профилей диэлектрической проницаемости решения могут быть выражены через другие пары линейно независимых специальных функций, например, функции Бесселя, Эйри

и другие. Основными требованиями для $F_{1,2}(x)$ являются непрерывность и ограниченность на интервале $-a < x < a$ этих функций, а также их производных $F'_{1,2}(x)$.

Во внешних обкладках решения уравнений (5) и (7) можно представить в виде:

$$\psi_N^{(\pm)}(x) = \psi_a^{(\pm)} \frac{\Psi_N^{(\pm)}(x)}{\Psi_N^{(\pm)}(\pm a)}, \quad (10)$$

где $\psi_a^{(\pm)}$ – амплитуды поля на границах раздела слоев в плоскостях $x = \pm a$; $\Psi_N^{(\pm)}(x)$ – решения нелинейных уравнений (5) и (7), ограниченные в областях $x < -a$ и $x > a$ соответственно и удовлетворяющие требованию $|\Psi_N^{(\pm)}(x)| \rightarrow 0, |x| \rightarrow \infty$. Явный вид функций $\Psi_N^{(\pm)}(x)$ определяется видом модели нелинейности среды внешних обкладок. К примеру, для наиболее распространенной керровской нелинейности $\Psi_N^{(\pm)}(x)$ выражаются через гиперболические функции в зависимости от знака нелинейного отклика.

Подстановка решений (9) и (10) в граничные условия (8) приводит к системе алгебраических уравнений относительно величин $C_{1,2}$ и амплитуд $\psi_a^{(\pm)}$:

$$\begin{cases} \psi_a^{(\pm)} = C_1 F_1(\pm a) + C_2 F_2(\pm a), \\ \psi_a^{(\pm)} \epsilon_{\text{Neff}}^{(\pm)} = C_1 F'_1(\pm a) + C_2 F'_2(\pm a), \end{cases} \quad (11)$$

где обозначили

$$\epsilon_{\text{Neff}}^{(\pm)} = \frac{1}{\Psi_N^{(\pm)}(\pm a)} \cdot \frac{d\Psi_N^{(\pm)}(\pm a)}{dx}. \quad (12)$$

Условие разрешимости системы (11) позволяет получить дисперсионное уравнение, определяющее значения константы распространения для волноводных мод рассматриваемой трехслойной структуры в общем случае:

$$\Delta_1^{(+)} \Delta_2^{(-)} = \Delta_1^{(-)} \Delta_2^{(+)}, \quad (13)$$

где

$$\Delta_{1,2}^{(\pm)} = F_{1,2}(\pm a) \epsilon_{\text{Neff}}^{(\pm)} - F'_{1,2}(\pm a). \quad (14)$$

Данное дисперсионное уравнение позволяет указать связь константы распространения β , волнового числа k , оптических характеристик слоев (невозмущенные значения диэлектрических констант и параметры зависимостей диэлектрической проницаемости в градиентном и нелинейном слоях,

определяемые конкретным видом модели), геометрический параметр трехслойной структуры – полупрозрачности прослойки a .

В качестве независимой характеристики можно выбрать амплитуду на одной из границ раздела и через нее выразить остальные параметры решений (9) и (10). В частности, из (11) вытекает отношение амплитуд на левой и правой границах прослойки:

$$\frac{\psi_a^{(+)}}{\psi_a^{(-)}} = \frac{\Delta_1^{(-)} \Delta^{(+)}}{\Delta_1^{(+)} \Delta^{(-)}}, \quad (15)$$

где

$$\Delta^{(\pm)} = F_1(\pm a) F_2'(\pm a) - F_2(\pm a) F_1'(\pm a). \quad (16)$$

Тогда величины $C_{1,2}$ можно записать в виде:

$$C_{1,2} = \psi_a^{(+)} \frac{\Delta_{1,2}^{(+)}}{\Delta^{(+)}} = \psi_a^{(-)} \frac{\Delta_{1,2}^{(-)}}{\Delta^{(-)}}. \quad (17)$$

С учетом (15) распределение поля во внутреннем слое можно переписать в виде:

$$\psi_G(x) = \frac{\psi_a^{(\pm)}}{\Delta^{(\pm)}} \{ \Delta_1^{(\pm)} F_1(x) + \Delta_2^{(\pm)} F_2(x) \}. \quad (18)$$

Таким образом, полученные выражения (10) и (18) определяют распределение поля в поперечном слое направления, параметры которых определяются выражениями (12), (14), (16), а константа распространения определяется дисперсионным уравнением (13).

1.3. Построение волноводных мод заданной симметрии и дискретным спектром

Очевидно, что в силу симметрии рассматриваемой трехслойной волноводной структуры в ней должны существовать четные и нечетные моды, описываемые соответственно симметричным и антисимметричным распределениями поля в поперечном направлении. Тогда решение задачи (5)–(8) можно искать на полуоси $x > 0$, продолжим его четным или нечетным образом для симметричных или антисимметричных мод соответственно.

Для симметричного распределения решения должны быть четными функциями: $\psi_N^{(+)}(-x) = \psi_N^{(+)}(x)$ и $\psi_G(-x) = \psi_G(x)$, а для антисимметричного распределения они должны быть нечетными: $\psi_N^{(+)}(-x) = -\psi_N^{(+)}(x)$ и $\psi_G(-x) = -\psi_G(x)$. Далее верхние индексы $(\pm)$ можно опустить в силу выбора заданной симметрии.

Мода, обладающая заданной симметрией, может быть описана решением:

$$\psi_G(x) = \psi_a \frac{F_G(g(x))}{F_G(g(a))}, \quad (19)$$

где $F_G(g)$ – определенным образом подобранная специальная функция, разрешающая уравнение (6) на полуоси $x > 0$, с внутренним аргументом $g(x)$, явный вид которого связан с видом профиля пространственной зависимости диэлектрической проницаемости внутреннего слоя. Аргумент g содержит константу распространения β , оптические и геометрические параметры волноводной системы.

Для симметричной моды функция F_G должна иметь экстремум в центре симметрии трехслойной волноводной структуры (при $x = 0$). Это означает, что производная функции F_G должна обращаться в ноль при $x = 0$. Для антисимметричной моды сама функция F_G должна обращаться в ноль. Такие требования, обусловленные необходимостью обладания симметрией искомого профиля поля, приводят к тому, что спектр значений константы распространения (или эффективного показателя преломления) становится дискретным.

В частности, для симметричной моды должно быть

$$\left. \frac{dF_G(g(x))}{dx} \right|_{x=0} = F_G'(g(0))g'(0) = 0. \quad (20)$$

Следовательно, если $g'(0) \neq 0$, то

$$g(0) = \xi_j \quad (j = 1, 2, \dots), \quad (21)$$

где ξ_j – нули производной специальной функции F_G . Поскольку аргумент g содержит константу распространения β , то разрешив относительно нее уравнение (21), можно получить дискретный спектр ее значений $\beta = \beta(\xi_j)$, определяемый последовательностью нулей производной специальной функции F_G , разрешающей уравнение (6).

Аналогично, для антисимметричной моды должно быть

$$F_G(g(0)) = 0. \quad (22)$$

Следовательно,

$$g(0) = \zeta_j \quad (j = 1, 2, \dots), \quad (23)$$

где ζ_j – нули специальной функции F_G . Разрешив относительно константы распространения уравнение (23), можно получить дискретный спектр ее значений $\beta = \beta(\zeta_j)$, определяемый последовательностью нулей специальной функции F_G , разрешающей уравнение (6).

Решение нелинейного уравнения (7) во внешнем слое при $x > a$ можно представить в виде:

$$\Psi_N(x) = \Psi_a \frac{\Psi_N(q_N(x - a - x_N))}{\Psi_N(q_N x_N)}, \quad (24)$$

где зависимость коэффициента q_N от параметров системы известна для конкретной модели нелинейного отклика, а величина x_N определяется из граничных условий. Функция Ψ_N должна обладать четностью, совпадающей с четностью функции F_G .

Следует отметить, что выбранные в виде (19) и (24) решения автоматически удовлетворяют условиям непрерывности на границах раздела слоев волноводной структуры при $x = \pm a$.

Для удовлетворения условия непрерывности производной поля на границе раздела градиентного и нелинейного слоев следует подставить (19) и (24) в (8) при $x = a$, откуда получается уравнение:

$$\frac{F'_G(g(a))g'(a)}{F_G(g(a))} = \frac{q_N \Psi'_N(q_N x_N)}{\Psi_N(q_N x_N)}, \quad (25)$$

которое позволяет определить величину x_N в зависимости от оптических и геометрических характеристик слоистой структуры.

Таким образом, показана возможность существования волноводных мод заданной симметрии в том случае, когда константа распространения задается дискретным спектром значений.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Некоторые аналитически разрешимые профили градиентного слоя

Рассмотрим сначала виды симметричных профилей диэлектрической проницаемости в градиентном слое, для которых известны точные аналитические решения. Для сравнения рассмотрим также случай и ступенчатой структуры, в которой внутренняя прослойка характеризуется постоянным независимым от пространственной координаты значением диэлектрической проницаемости (рис. 1а): $\varepsilon_G = \varepsilon_0 - \text{const}$. Тогда решение уравнения (6) определяется тригонометрическими функциями и для четных мод имеет вид:

$$\Psi_G(x) = \Psi_a \frac{\cos(px)}{\cos(pa)}, \quad (26)$$

а для нечетных мод:

$$\Psi_G(x) = \Psi_a \frac{\sin(px)}{\sin(pa)}, \quad (27)$$

где $p^2 = k^2(\varepsilon_0 - n^2)$. Такие моды существуют для значений эффективного показателя преломления $n^2 < \varepsilon_0$.

Симметричные градиентные профили:

1) Линейный (рис. 1б):

$$\varepsilon_G(x) = \varepsilon_0 \left(1 - \Delta \frac{|x|}{a} \right), \quad (28)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость в центре симметрии волноводной структуры, $\Delta = (\varepsilon_0 - \varepsilon_a) / \varepsilon_0$ –

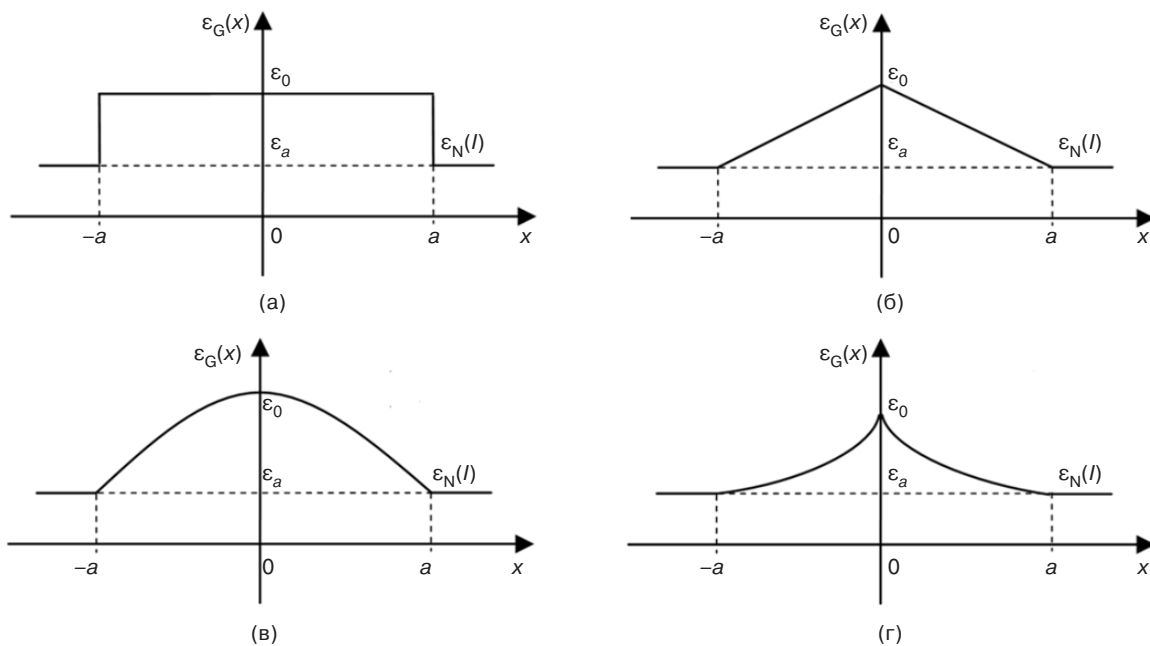


Рис. 1. Пространственные симметричные профили диэлектрической проницаемости трехслойной волноводной структуры: постоянный (а), линейный (б), параболический (в), экспоненциальный (г)

изменение диэлектрической проницаемости от ε_0 до значения диэлектрической проницаемости на границе раздела слоев ε_a .

Решение уравнения (6) на интервале $0 < x < a$ с линейным профилем (28) можно записать в виде [36]:

$$\psi_G(x) = \psi_a \frac{\text{Ai}(x/x_G + \delta)}{\text{Ai}(a/x_G + \delta)}, \quad (29)$$

где $F_G = \text{Ai}(g)$ – функция Эйри, $g(x) = x/x_G + \delta$,

$$\delta = -(\varepsilon_0 - n^2)(ak/\varepsilon_0\Delta)^{2/3}, \quad (30)$$

$$x_G = \left(\frac{a}{k^2\varepsilon_0\Delta} \right)^{1/3}. \quad (31)$$

Для построения четного решения, как отмечалось в п. 1.3, необходимо потребовать, чтобы функция (29) имела экстремум в середине волновода при $x = 0$. Поэтому $\delta = \xi_j, j = 1, 2, \dots$, где для случая линейного профиля ξ_j – нули производной функции Эйри: $\text{Ai}'(\xi_j) = 0$: $\xi_1 = -1.018792972$, $\xi_2 = -3.248197582$, $\xi_3 = -4.820099211$, ... Тогда из (30) получается дискретный спектр значений эффективного показателя преломления:

$$n_j^2 = \varepsilon_0 - |\xi_j|(\varepsilon_0\Delta/ak)^{2/3}. \quad (32)$$

Для построения нечетного решения необходимо потребовать, чтобы функция (29) обращалась в ноль в середине волновода при $x = 0$. Поэтому $\delta = \zeta_j$ – нули функции Эйри: $\text{Ai}(\zeta_j) = 0$: $\zeta_1 = -2.338107410$, $\zeta_2 = -4.087949444$, $\zeta_3 = -5.520559828$, ...

2) Параболический (рис. 1в):

$$\varepsilon_G(x) = \varepsilon_0 \left(1 - \Delta \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right). \quad (33)$$

Как известно, для параболического профиля (33) ограниченное решение уравнения (6) выражается через полиномы Эрмита $H_j(x)$:

$$\psi_G(x) = \psi_a \frac{H_j(x/x_0)}{H_j(a/x_0)} e^{-(x^2 - a^2)/2x_0^2}, \quad (34)$$

где $j = 2m$ для четных мод и $j = 2m + 1$ для нечетных мод, $m = 0, 1, 2, \dots$, $x_0^2 = a/k\sqrt{\varepsilon_0\Delta}$, которые существуют при дискретных значениях эффективного показателя преломления [38]:

$$n_j^2 = \varepsilon_0 - (2j + 1)\sqrt{\varepsilon_0\Delta}/ak. \quad (35)$$

3) Экспоненциальный (рис. 1г):

$$\varepsilon_G(x) = \varepsilon_0 \{1 - \Delta(1 - e^{-|x|/a})\}. \quad (36)$$

Решение уравнения (6) с экспоненциальным профилем (36) можно записать в виде:

$$\psi_G(x) = \psi_a \frac{J_{2w}(2ve^{-|x|/2a})}{J_{2w}(2ve^{-1/2})}, \quad (37)$$

где $F_G = J_{2w}(g)$ – функция Бесселя первого рода порядка $w = ak(n^2 - \varepsilon_a)^{1/2}$, $g = 2ve^{-|x|/2a}$, $v = ak(\Delta\varepsilon_0)^{1/2}$ [4].

Четные моды определяются дисперсионным уравнением $J'_{2w}(2v) = 0$. Если обозначить ξ_j корни уравнения $J'_{\xi_j}(2v) = 0$, то получается дискретный спектр значений эффективного показателя преломления:

$$n_j^2 = \varepsilon_a + (\xi_j/2ak)^2. \quad (38)$$

Нечетные моды определяются дисперсионным уравнением $J_{2w}(2v) = 0$. Если обозначить ζ_j корни уравнения $J_{\zeta_j}(2v) = 0$, то получается дискретный спектр значений эффективного показателя преломления:

$$n_j^2 = \varepsilon_a + (\zeta_j/2ak)^2. \quad (39)$$

Анализ корней таких уравнений и соответствующих спектров можно найти в работе [39].

Следует отметить, что существуют точные аналитические уравнения (6) для других пространственных профилей диэлектрической проницаемости, таких как гладкая ступенька, описываемая гиперболическим тангенсом [40], симметричный профиль Эпштейна (инвертированный симметричный потенциал Пёшль – Теллера), описываемый гиперболическим косинусом [41]. Такие решения достаточно громоздки и выражаются через гипергеометрическую функцию, затруднительную для простого анализа, поэтому здесь они не рассматриваются.

Таким образом, выше приведены точные аналитические решения, описывающие распределения поля для трех различных пространственных профилей диэлектрической проницаемости.

2.2. Некоторые аналитически разрешимые модели нелинейности внешних обкладок

Рассмотрим теперь некоторые виды моделей нелинейных сред внешних обкладок, в которых диэлектрическая проницаемость зависит от напряженности электрического поля, и для которых известны точные аналитические решения. Для сравнения рассмотрим

также случай линейной среды, в которой внешние слои характеризуются постоянным, независящим от напряженности поля значением диэлектрической проницаемости: $\varepsilon_N = \varepsilon_{0N} - \text{const}$. Тогда ограниченное на полуоси $x > a$ решение уравнения (7) имеет вид:

$$\psi_N(x) = \psi_a e^{-q_N(x-a)}, \quad (40)$$

где $q_N^2 = k^2(n^2 - \varepsilon_{0N})$. На отрицательную полуось такое решение очевидным образом продолжается четным или нечетным образом для описания симметричных и антисимметричных мод, соответственно. Используя условия (8) для функций (19) и (40), можно получить аналог дисперсионного уравнения (25) для волновода с линейными обкладками: $\gamma_G + q_N = 0$, где обозначили $\gamma_G = F'_G(g(a))g'(a) / F_G(g(a))$, из которого получается спектр значений эффективного показателя преломления:

$$n^2 = \varepsilon_{0N} + (\gamma_G / k)^2. \quad (41)$$

Связывая (41) с дискретным спектром, полученным для конкретного градиентного профиля внутреннего слоя, можно получить ограничения для порядков мод, возбуждаемых в прослойке заданной толщины.

Простейшие модели нелинейных сред внешних обкладок:

1) Керровская нелинейность:

$$\varepsilon_N(I) = \varepsilon_{0N} + \alpha I, \quad (42)$$

где α – коэффициент керровской нелинейности, $I = |E|^2$ – интенсивность поля. Тогда четное/нечетное решение уравнения (7) с диэлектрической проницаемостью (42) при $|x| > a$ в случае самофокусирующей нелинейности при $\alpha > 0$ имеет вид:

$$\psi_N(x) = \pm \sqrt{\frac{2}{\alpha}} \cdot \frac{q}{k \text{ch}(q(x \mp a \mp x_N))}. \quad (43)$$

Используя условия (8) для функций (19) и (43), можно определить величину параметра

$$x_N = -\frac{1}{q_N} \text{Arth} \left(\frac{\gamma_G}{q_N} \right) \quad (44)$$

и амплитуду поля на границе слоев

$$\psi_a = \sqrt{\frac{2}{\alpha} (n^2 - \varepsilon_{0N} - (\gamma / k)^2)}. \quad (45)$$

В выражения (43)–(45) следует подставить дискретный спектр, полученный для конкретного градиентного профиля внутреннего слоя.

2) Ступенчатая нелинейность:

$$\varepsilon_N(I) = \begin{cases} \varepsilon_1, & I < I_s, \\ \varepsilon_2, & I > I_s, \end{cases} \quad (46)$$

где I_s – пороговый уровень интенсивности (известная характеристика среды), при переходе через который происходит резкое изменение от одного значения диэлектрической константы ε_1 к другому ε_2 [42, 43]. Таким образом, вблизи границы раздела слоев в нелинейной среде, где $I > I_s$, образуется область (приповерхностный домен) шириной x_s , в которой диэлектрическая константа имеет значение ε_2 , а за ее пределами, далее в обкладках, где $I < I_s$, диэлектрическая константа имеет значение ε_1 . Такие домены возникают симметрично по обе стороны внутренней прослойки [37]. Положение границ приповерхностного домена определяется величиной x_s , которая находится из дополнительных требований непрерывности поля на границах домена:

$$\begin{aligned} \psi_N(\pm x_s + 0) &= \psi_N(\pm x_s - 0) = I_s^{1/2}, \\ \psi'_N(\pm x_s + 0) &= \psi'_N(\pm x_s - 0). \end{aligned} \quad (47)$$

В модели ступенчатой нелинейности уравнение (7) с диэлектрической проницаемостью (46) распадается на два:

$$\psi''_N(x) - (n^2 - \varepsilon_1)k^2\psi_N(x) = 0, \quad I < I_s, |x| > x_s, \quad (48)$$

$$\psi''_N(x)(x) + (\varepsilon_2 - n^2)k^2\psi_N(x) = 0, \quad I > I_s, a < |x| < x_s. \quad (49)$$

Решение уравнения (48) при $n^2 > \varepsilon_1$ для четных/нечетных мод имеет вид:

$$\psi_N(x) = \pm I_s^{1/2} e^{\mp q_1(x \mp x_s)}, \quad (50)$$

где $q_1^2 = (n^2 - \varepsilon_1)k^2$, а решение уравнения (49) при $n^2 < \varepsilon_2$ имеет вид:

$$\psi_N(x) = \pm \psi_a \cos(p_2(x \mp a) \mp \phi) / \cos(\phi), \quad (51)$$

где $p_2^2 = (\varepsilon_2 - n^2)k^2$, а величины x_s , ϕ определяются из граничных условий (8) и (47).

Подставив решения (19), (50) и (51) в граничные условия (8) и (47), можно найти параметры, к примеру, четных мод (нечетных – аналогично):

$$\phi = \arctg\left(\frac{\gamma_G}{p_2}\right), \quad (52)$$

$$x_s = a + \frac{1}{p_2} \left\{ \phi + \arctg\left(\frac{q_1}{p_2}\right) \right\}, \quad (53)$$

$$\Psi_a = I_s^{1/2} \left(\frac{p_2^2 + q_1^2}{p_2^2 + \gamma_G^2} \right)^{1/2}. \quad (54)$$

В выражения (50)–(54) следует подставить дискретные значения эффективного показателя преломления, полученные для конкретного пространственного профиля внутреннего градиентного слоя.

Таким образом, получены точные аналитические решения для двух моделей нелинейности сред.

2.3. Пример распределения поля в симметричной волноводной структуре

В качестве конкретного примера модели симметричной трехслойной волноводной структуры рассмотрим случай, когда внутренний градиентный слой характеризуется параболическим профилем (33), а внешние слои – керровской самофокусирующей нелинейностью (42).

В такой структуре в поперечном сечении направления пространственное распределение электрического поля определяется выражениями (34) и (43), а дискретный спектр значений эффективного показателя преломления определяется выражением (35) [38]. Ограничившись рассмотрением четных мод, для которых $j = 2m$, $m = 0, 1, 2, \dots$, симметричное относительно центра волноводной структуры распределение поля можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \psi(x) = & \begin{cases} \sqrt{(n_{pm}^2 - n_{\text{Geff}}^2)} e^{(a^2 - x^2)/2x_0^2} \frac{H_{2m}(x/x_0)}{H_{2m}(a/x_0)}, & |x| < a, \\ \frac{n_{pm}}{\cosh(kn_{pm}(x \mp a \mp x_N))}, & |x| > a, \end{cases} \\ = \psi_0 & \end{aligned} \quad (55)$$

где $n_{pm}^2 = \varepsilon_0 - \varepsilon_{0N} - (4m+1)\sqrt{\varepsilon_0 \Delta} / ak$ и

$$n_{\text{Geff}} = \frac{1}{kx_0} \left\{ \frac{H'_{2m}(a/x_0)}{H_{2m}(a/x_0)} - \frac{a}{x_0} \right\}. \quad (56)$$

Таким образом, выражение (55) представляет собой аналитическое решение задачи (5)–(8) при выборе симметрии, параболического профиля внутреннего слоя (33) и самофокусирующей нелинейности обкладок (42).

На рис. 2 показаны характерные профили решения (55), которые наглядно демонстрируют влияние относительного изменения диэлектрической проницаемости в прослойке Δ на распределение электрического поля при фиксированных значениях остальных параметров волновода для основной моды при $m = 0$ (рис. 2а), четной моды первого порядка $m = 1$ (рис. 2б) и четной моды второго порядка $m = 2$ (рис. 2в).

Результаты показывают, что напряженность электрического поля возрастает с ростом величины Δ для основной (рис. 2а) и первой (рис. 2б) мод. Однако интенсивность падает с увеличением Δ для мод более высокого порядка (рис. 2в). Таким образом, зависимость напряженности поля от Δ не является монотонной. К такому же эффекту приводит увеличение толщины прослойки a .

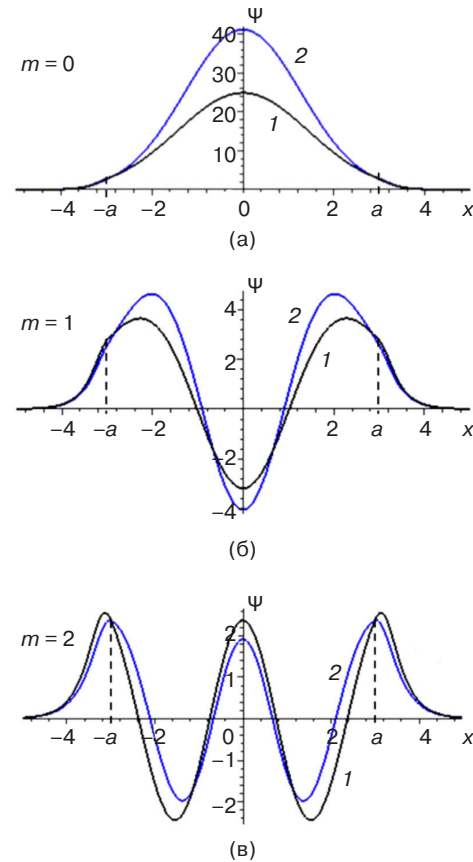


Рис. 2. Распределение поля (55) при значениях параметров (в условных единицах): $k = 0.65$, $\alpha = 6$, $\varepsilon_{0N} = 0.1$, $\varepsilon_0 = 30$, $a = 3$, и различных $\Delta = 5$ (линия 1), $\Delta = 8$ (линия 2) для первых трех четных мод: $m = 0$ (а), $m = 1$ (б), $m = 2$ (в)

Существование дискретного спектра значений эффективного показателя преломления говорит о том, что волноводные моды могут распространяться при определенных значениях параметров параболического профиля. Поскольку константа распространения связана с углом падения луча, возбуждающего волноводную моду, можно сказать, что необходимо учитывать дискретный набор углов падения, т.к. волноводная мода определенного порядка в рассматриваемой системе может возбудиться только под определенным углом падения, зависящим от диэлектрической проницаемости на границах слоев и изменения диэлектрической проницаемости внутри градиентного слоя.

Таким образом, получено и проанализировано точное аналитическое решение, описывающее распределение поля в симметричной трехслойной волноводной структуре, в которой внутренний градиентный слой характеризуется параболическим профилем, а внешние слои – керровской самофокусирующей нелинейностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена модель плоской симметричной трехслойной волноводной структуры, соседние слои которой характеризуются физически различными оптическими свойствами. В частности, внутренний слой характеризуется зависимостью диэлектрической проницаемости от пространственной координаты в направлении, перпендикулярном плоскости границы раздела слоев, а внешние слои – зависимостью диэлектрической проницаемости от амплитуды электрического поля. Другими словами, рассматриваемая трехслойная структура состоит из внутреннего градиентного слоя, зажатого между нелинейно-оптическими обкладками. Пространственный профиль диэлектрической проницаемости прослойки и вид нелинейного отклика среды обкладок предполагаются произвольными.

Теоретически описано распространение поперечных электрических волн без учета потерь. Сформулированы уравнения и граничные условия для поперечного распределения поля в трехслойной волноводной структуре.

В общем виде получены решения, описывающие пространственное распределение электрического поля поперечно слоям. Показано, что в силу поперечной симметрии трехслойной волноводной

структуры вдоль нее могут распространяться четные и нечетные стационарные моды, соответствующие симметричным и антисимметричным поперечным профилям поля. Предложен способ построения четных (симметричных) и нечетных (антисимметричных) решений, приводящих к существованию дискретного спектра значения эффективного показателя преломления.

Рассмотрены частные случаи конкретных пространственных профилей диэлектрической проницаемости внутренней прослойки, для которых существуют точные аналитические решения волнового уравнения. В частности, приведены решения для случаев линейного, параболического и экспоненциального профилей, описываемые соответствующими специальными функциями. Получены дискретные спектры значений эффективного показателя преломления в слоях с рассматриваемыми градиентными профилями.

Также рассмотрены частные случаи конкретных моделей нелинейности сред, таких как керровская и ступенчатая. Для таких нелинейностей приведены точные аналитические решения нелинейного волнового уравнения, описывающие зависимости амплитуды стационарного электрического поля от расстояния от границ раздела слоев в нелинейно-оптических средах.

Подробно проанализирован случай симметричной трехслойной волноводной структуры, внутренний градиентный слой в которой характеризуется параболическим пространственным профилем, а внешние обкладки представляют собой керровские нелинейно-оптические среды. Получено точное аналитическое решение сформулированной краевой задачи, описывающее поперечное симметричное распределение поля для случая самофокусирующей нелинейности и проведен его анализ. Интенсивность основной моды значительно превышает интенсивность мод более высокого порядка. Напряженность электрического поля растет с увеличением относительного изменения диэлектрической проницаемости в прослойке для основной моды и мод первого порядка, однако уменьшается с увеличением его значения для мод более высоких порядков.

Результаты данной работы могут быть полезными для разработки различных оптических волноводных устройств. Предложенная теория также расширяет представления о физических свойствах нелинейных волн и закономерностях локализации световых пучков в распределенных средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Zhao Y., Yang Y., Sun H.B. Nonlinear meta-optics towards applications. *Photonix*. 2021;2(1):3. <http://doi.org/10.1186/s43074-021-00025-1>
2. Bano R., Asghar M., Ayub K., Mahmood T., Iqbal J., Tabassum S., Zakaria R., Gilani M. A Theoretical Perspective on Strategies for Modeling High Performance Nonlinear Optical Materials. *Front. Mater.* 2021;8:783239. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.783239>
3. Dragoman D., Dragoman M. *Advanced Optoelectronic Devices*. Berlin: Springer; 1999. 436 p.
4. Adams M.J. *An Introduction to Optical Waveguides*. Chichester: Wiley; 1981. 432 p.
5. Chen C.-L. *Foundations for Guided-Wave Optics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2005. 462 p. <https://doi.org/10.1002/0470042222>
6. Malomed B.A., Mihalache D. Nonlinear waves in optical and matter-wave media: a topical survey of recent theoretical and experimental results. *Rom. J. Phys.* 2019;64(5–6):106. URL: https://rjp.nipne.ro/2019_64_5-6/RomJPhys.64.106.pdf
7. Mihalache D. Localized structures in optical and matter-wave media: a selection of recent studies. *Rom. Rep. Phys.* 2021;73:403. URL: <https://rrp.nipne.ro/2021/AN73403.pdf>
8. Agrawal G.P. *Physics and Engineering of Graded-Index Media*. Cambridge: Cambridge University Press; 2023. 348 p. <https://doi.org/10.1017/9781009282086>
9. Ablowitz M.J., Horikis T.P. Nonlinear waves in optical media. *J. Comp. Appl. Math.* 2010;234(6):1896–1903. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2009.08.039>
10. Bednarik M., Cervenka M. Electromagnetic waves in graded-index planar waveguides. *J. Opt. Soc. Am. B.* 2020;37(12):3631–3643. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.408679>
11. Kivshar Yu.S., Agrawa G.P. *Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals*. San Diego: Academic Press; 2003. 540 p.
12. Čada M., Qasymeh M., Pištora J. Optical Wave Propagation in Kerr Media. In: *Wave Propagation. Theories and Applications*. London: IntechOpen; 2013. P. 175–192. <http://doi.org/10.5772/51293>
13. Kartashov Y.V., Malomed B.A., Torner L. Solitons in nonlinear lattices. *Rev. Mod. Phys.* 2011;83(1):247–305. <http://doi.org/10.1103/RevModPhys.83.247>
14. Laine T.A. *Electromagnetic Wave Propagation in Nonlinear Kerr Media*: Doctoral Thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH), Department of Physics; 2000. 58 p. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:8732/FULLTEXT01.pdf>
15. Mihalache D., Bertolotti M., Sibilica C. IV Nonlinear wave propagation in planar structures. *Prog. Opt.* 1989;27:227–313. [https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70087-8](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70087-8)
16. Langbein U., Lederer F., Peschel T., Trutschel U., Mihalache D. Nonlinear transmission resonances at stratified dielectric media. *Phys. Rep.* 1990;194(5-6):325–342. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(90\)90032-W](https://doi.org/10.1016/0370-1573(90)90032-W)
17. Mihalache D., Stegeman G.I., Seaton C.T., Wright E.M., Zanon R., Boardman A.D., Twardowski T. Exact dispersion relations for transverse magnetic polarized guided waves at a nonlinear interface. *Opt. Lett.* 1987;12(3):187–189. <https://doi.org/10.1364/OL.12.000187>
18. Каданцев В.Н., Гольцов А.Н., Кондаков М.А. Динамика электросолитона в термализованной молекулярной цепи. *Russian Technological Journal*. 2020;8(1):43–57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-43-57>
[Kadantsev V.N., Goltsov A.N., Kondakov M.A. Electrosoliton dynamics in a thermalized molecular chain. *Russ. Technol. J.* 2020;8(1):43–57 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-43-57>]
19. Shvartsburg A.B., Maradudin A. *Waves in Gradient Metamaterials*. Singapore: World Scientific; 2013. 339 p. <https://doi.org/10.1142/8649>
20. Touam T., Yergeau F. Analytical solution for a linearly graded-index-profile planar waveguide. *Appl. Opt.* 1993;32(3):309–312. <https://doi.org/10.1364/AO.32.000309>
21. Lachance R.L., Belanger P.-A. Modes in divergent parabolic graded-index optical fibers. *J. Lightwave Technol.* 1991;9(11):1425–1430. <https://doi.org/10.1109/50.97628>
22. Taya S.A., Hussein A.J., Ramahi O.M., Colak I., Chaouche Y.B. Dispersion curves of a slab waveguide with a nonlinear covering medium and an exponential graded-index thin film (transverse magnetic case). *J. Opt. Soc. Am. B.* 2021;38(11):3237–3243. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.439034>
23. Shvartsburg A.B. Dispersion of electromagnetic waves in stratified and nonstationary media (exactly solvable models). *Phys. Usp.* 2000;43(12):1201–1228. <https://doi.org/10.1070/pu2000v043n12abeh000827>
24. Svendsen B.B., Söderström M., Carlens H., Dalarsson M. Analytical and Numerical Models for TE-Wave Absorption in a Graded-Index GNP-Treated Cell Substrate Inserted in a Waveguide. *Appl. Sci.* 2022;12(14):7097. <https://doi.org/10.3390/app12147097>
25. Almawgani A.H.M., Taya S.A., Hussein A.J., Colak I. Dispersion properties of a slab waveguide with a graded-index core layer and a nonlinear cladding using the WKB approximation method. *J. Opt. Soc. Am. B.* 2022;39(6):1606–1613. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.458569>
26. Савотченко С.Е. Модели волноводов, сочетающих градиентные и нелинейно-оптические слои. *Russian Technological Journal*. 2023;11(4):84–93. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-84-93>
[Savotchenko S.E. Models of waveguides combining gradient and nonlinear optical layers. *Russ. Technol. J.* 2023;11(4):84–93 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-4-84-93>]

27. Hussein A.J., Nassar Z.M., Taya S.A. Dispersion properties of slab waveguides with a linear graded-index film and a nonlinear substrate. *Microsyst. Technol.* 2021;27(7):2589–2594. <https://doi.org/10.1007/s00542-020-05016-z>
28. Taya S.A., Hussein A.J., Colak I. An exact solution of a slab waveguide dispersion relation with a linear graded-index guiding layer (TM case). *Microsyst Technol.* 2022;28(22):1213–1219. <https://doi.org/10.1007/s00542-022-05281-0>
29. Hussein A.J., Taya S.A., Vigneswaran D., Udiyakumar R., Upadhyay A., Anwa T., Amiri I.S. Universal dispersion curves of a planar waveguide with an exponential graded-index guiding layer and a nonlinear cladding. *Results in Physics.* 2021;20:103734. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103734>
30. Panyayev I.S., Dadoenkova N.N., Dadoenkova Yu.S., Rozhleys I.A., Krawczyk M., Lyubchanskii I.L., Sannikov D.G. Four-layer nanocomposite structure as an effective optical waveguide switcher for near-IR regime. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016;49(43):435103. <http://doi.org/10.1088/0022-3727/49/43/435103>
31. Zhong N., Wang Z., Chen M., Xin X., Wu R., Cen Y., Li Y. Three-layer-structure polymer optical fiber with a rough inter-layer surface as a highly sensitive evanescent wave sensor. *Sensors and Actuators B: Chem.* 2018;254:133–142. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.07.032>
32. Akhmediev N.N. Novel class of nonlinear surface waves: asymmetric modes in a symmetric layered structure. *J. Exp. Theor. Phys.* 1982;56(2):299–303. URL: http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_056_02_0299.pdf
33. Fedyanin V.K., Mihalache D. P-Polarized nonlinear surface polaritons in layered structures. *Z. Phys. B.* 1982;47:167–173. <https://doi.org/10.1007/BF01441299>
34. Chatterjee S., Chaudhuri P.R. Some Unique Propagation Characteristics of Linearly Graded Multilayered Planar Optical Waveguides. *J. Basic Appl. Phys.* 2014;3(1):1–9.
35. Savotchenko S.E. Temperature controlled waveguide properties of the linearly graded-index film in semiconductor crystal with the photorefractive nonlinearity. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics.* 2023;129(1):7. <https://doi.org/10.1007/s00340-022-07950-4>
36. Savotchenko S.E. New types of transverse electric nonlinear waves propagating along a linearly graded-index layer in a medium with Kerr nonlinearity. *Opt. Quant. Electron.* 2023;55(1):74. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-04323-1>
37. Savotchenko S.E. Discrete spectrum of waveguide modes of a linearly graded-index film introduced into a medium with a stepwise nonlinearity. *Optik.* 2023;281(6):170835. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170835>
38. Savotchenko S.E. Guided waves propagating along a parabolic graded-index slab in Kerr nonlinear medium. *Opt. Quant. Electron.* 2023;55:898. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05178-w>
39. Savotchenko S.E. Surface waves propagating along an interface between media with an exponential spatial profile of the dielectric function and an abruptly appearance of a self-focusing nonlinear response in a near-surface layer at the strong light intensity. *Opt. Quant. Electron.* 2023;55(7):580. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-04871-0>
40. Rana B., Svendsen B.B., Dalarsson M. TE-Wave Propagation Over an Impedance-Matched RHM to LHM Transition in a Hollow Waveguide. *Progress In Electromagnetics Research M.* 2022;110:1–10. <http://doi.org/10.2528/PIERM22022505>
41. Kaplan I.G. *Intermolecular Interactions: Physical Picture, Computational Methods and Model Potentials*. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd; 2006. 384 p. <https://doi.org/10.1002/047086334X>
42. Khadzhi P.I., Fedorov L.V., Torstveit S. Nonlinear surface waves for the simplest model of nonlinear medium. *Phys. Tech. Lett.* 1991;61:110–113.
43. Ляхомская К.Д., Хаджи П.И. Эффект самоотражения и простейшие модели нелинейной среды. *Журн. техн. физики.* 2000;70(11):86–90.
[Lyakhomskaya K.D., Khadzhi P.I. Self-reflection effect in naïve model of nonlinear media. *Tech. Phys.* 2000;45(11):1457–1461. <https://doi.org/10.1134/1.1325030>]
[Original Russian Text: Lyakhomskaya K.D., Khadzhi P.I. Self-reflection effect in naïve model of nonlinear media. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki.* 2000;70(11):86–90 (in Russ.).]
44. Вигдорович Е.Н. Радиационная стойкость эпитаксиальных структур на основе GaAs. *Russ. Technol. J.* 2019;7(3):41–49. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-3-41-49>
[Vigdorovich E.N. Radiation resistance of epitaxial structures based on GaAs. *Russ. Technol. J.* 2019;7(3):41–49 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-3-41-49>]

Об авторе

Савотченко Сергей Евгеньевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры высшей математики, Институт кибербезопасности и цифровых технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: savotchenkose@mail.ru. Scopus Author ID 6603577988, ResearcherID N-9227-2018, SPIN-код РИНЦ 2552-4344, <https://orcid.org/0000-0002-7158-9145>

About the author

Sergey E. Savotchenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Professor of the High Mathematics Department, Institute for Cybersecurity and Digital Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: savotchenkose@mail.ru. Scopus Author ID 6603577988, ResearcherID N-9227-2018, RSCI SPIN-code 2552-4344, <https://orcid.org/0000-0002-7158-9145>

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств.
Управление в организационных системах
Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries.
Management in organizational systems

УДК 004.021

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-90-97>

EDN TAQCXC



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Оценка качества услуг в рамках ИТ-проектов на основе агрегирования показателей

А.Е. Краснов[@],
А.А. Сапогов[@]

Российский государственный социальный университет, Москва, 129226 Россия

[@] Авторы для переписки, e-mail: krasnovmgutu@yandex.ru, sapogovmail@gmail.com

Резюме

Цели. Необходимость оперативного и обоснованного оценивания качества услуг в рамках сложных ИТ-проектов, таких как сервисное, техническое обслуживание ИТ-инфраструктуры, включающей выполнение большого числа схожих или аналогичных итераций, предопределяет необходимость разработки новых методов оценки качества, основанных на нелинейном агрегировании показателей. Применение прежних методов контроля становится невозможным либо трудозатратным ввиду изменения структуры процесса, территориальной удаленности, автоматизации, информатизации и появления больших данных. Цель работы – разработка подхода к оцениванию качества работ (услуг) в рамках ИТ-проектов на основе нелинейного агрегирования показателей.

Методы. Предлагается подход к оцениванию качества работ (услуг) в рамках ИТ-проектов на основе нелинейного агрегирования ряда показателей с предварительной декомпозицией системы на частные индикаторы. Показатели качества услуги должны соответствовать требованиям процесса декомпозиции, т.е. полностью характеризовать свойства услуги как единого целого на стадиях ее жизненного цикла.

Результаты. Описано применение предложенной методологии нелинейного агрегирования к индикаторам качества, полученным путем декомпозиции системы, с дальнейшим расчетом единого показателя, учитывающего все существенные изначальные параметрические показатели индикаторов. Предложено производить декомпозицию сложных систем до уровня элементарных подсистем соотношений, описываемых этими индикаторами, которые изначально более адекватно отражают взаимосвязанные явления в сложной системе, нежели абсолютные показатели.

Выводы. Показано преимущество практического применения модели параметрического нелинейного агрегирования данных для оценки качества ИТ-услуг. Использование агрегированного информационно-аналитического показателя оценки качества услуг улучшает доступность аналитической информации для лиц, принимающих решения, снижает размерность аналитических данных, повышает объективность получаемой обобщенной информации.

Ключевые слова: агрегирование, оценка, качество, индикатор, ИТ-проект, аналитика

• Поступила: 05.02.2024 • Доработана: 19.03.2024 • Принята к опубликованию: 12.07.2024

Для цитирования: Краснов А.Е., Сапогов А.А. Оценка качества услуг в рамках ИТ-проектов на основе агрегирования показателей. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):90–97. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-90-97>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Service quality assessment in IT projects based on aggregate indicators

Andrey E. Krasnov[@],
Alexander A. Sapogov[@]

Russian State Social University, Moscow, 129226 Russia

[@] Corresponding authors, e-mail: krasnovmgutu@yandex.ru, sapogovmail@gmail.com

Abstract

Objectives. Due to the need for prompt and rational assessment of service quality within the framework of complex IT projects, including infrastructure servicing and maintenance, which often involve a large number of identical or similar iterations, it becomes necessary to develop novel analysis methods based on nonlinear aggregation of indicators. As a result of changes in the structure of the process, territorial remoteness, automation, informatization, and the emergence of big data, the use of existing assessment methods often becomes impossible or labor-intensive. The purpose of the present work is to develop an approach to assessing the quality of work (services) in the framework of IT projects based on nonlinear aggregation of indicators.

Methods. The proposed approach to assessing service quality within IT projects is based on nonlinear aggregation of a number of indicators involving a preliminary decomposition of the system into private indicators. In order to meet the requirements of the decomposition process, service quality indicators must fully characterize the properties of the service as a whole at the different stages of its life cycle.

Results. The application of the proposed nonlinear aggregation methodology to quality indicators obtained by decomposing the system is described with the further calculation of a single indicator that takes all the essential initial parametric indicators into account. The decomposition of complex systems to the level of elementary relationship subsystems more adequately reflects interrelated phenomena in a complex system.

Conclusions. The practical application of the neural network parametric data aggregation model for assessing the quality of IT services is demonstrated. The use of an aggregated information and analytical indicator for assessing service quality increases the availability of analytical information for decision makers, reduces the dimension of analytical data, and improves the objectivity of the obtained generalized information.

Keywords: aggregation, assessment, quality, indicator, IT project, analytics

• Submitted: 05.02.2024 • Revised: 19.03.2024 • Accepted: 12.07.2024

For citation: Krasnov A.E., Sapogov A.A. Service quality assessment in IT projects based on aggregate indicators. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):90–97. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-90-97>

Financial disclosure: The authors have no financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Важным элементом в управлении процессами компании является оценка качества предоставляемых услуг. Это позволяет проводить анализ и принимать управленческие решения, а также обеспечивать обратную связь. В то же время до сих пор не разработана единая методология оценки качества услуг, которая бы охватывала все аспекты данного вопроса.

В течение периода оказания услуг в рамках сложных ИТ-проектов, включая работы по сервисному и техническому обслуживанию, необходимо обеспечить надлежащее определение и использование информационно-аналитических параметров выполнения этих работ. Информационно-аналитические показатели могут быть использованы в аналитической отчетности для принятия организационно-технических решений в целях совершенствования порядка выполнения работ (оказания услуг).

Индикаторы оценки качества отражают параметры, которые используют для управления качеством, способы измерения которых могут быть различны. В любом случае результатом измерений является набор числовых значений параметров. Бывает недостаточно указать на то, что качество проекта зависит от соблюдения сроков его реализации. Необходимо решить, должны ли все операции обязательно начинаться и заканчиваться в определенное время или только после определенного срока. И если это так, какие именно результаты контролируются, а если нет, то что именно контролируется. Результаты оценивания качества применяются в процессе оказания услуг, контроля и управления процессами.

Целью настоящей работы является предложение методологии нелинейного агрегирования разнородных показателей качества.

Основной задачей работы является применение предложенной методологии нелинейного агрегирования к индикаторам качества, полученным путем декомпозиции системы, с дальнейшим расчетом единого показателя, учитывающего все существенные изначальные параметрические показатели индикаторов.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В зависимости от специфики проекта для нелинейного расчета единого индикатора качества возможно использовать различные показатели: плотность дефектов и вероятность отказов; степень готовности к работе; надежность, степень готовности и пр. В настоящее время разработано множество методик оценки качества сервиса, включая методы критических случаев, INDSEER, Кано, SERVQUAL, SERVPERF [1–4]. Применяются также различные

методы ранжирования средневзвешенных оценок и др., многие из которых основаны на рейтинге существенных признаков качества предоставляемого сервиса, например, осязаемость, надежность, уверенность, доверие, безопасность, внимание, коммуникации, понимание клиента и др. Однако традиционные схемы оценки качества часто не приспособлены к изменившимся информационным реалиям, в них невозможно оперировать большими данными, отсутствуют методики онлайн-мониторинга в процессе оказания услуг либо отсутствуют надежные математические методы подсчета предлагаемых характеристик, т.к. часть из них основана на экспертных оценках, результаты которых бывает сложно формализовать. В [4] отмечается, что «не существует единого наилучшего метода оценки состояния..., так как состояние является многоплановой характеристикой, и различные методы ...отражают разные стороны его состояния..., поэтому существует потребность в исследовании методов ..., позволяющих объективизировать оценку состояния субъекта на основании имеющихся разнородных данных».

Например, общераспространенная модель SERVQUAL основана на концепции сервисного обслуживания, в основе которой лежит принцип «ожидание – восприятие». Анкета модели состоит из пяти блоков вопросов пользователей, каждый из которых отвечает на определенный запрос. Шкала Лайкерта выделяет в каждом блоке 22 пары вопросов. Каждый параметр имеет свое значение. В основе методики лежит оценка потребительского отношения к продукту или услуге, оказываемой клиенту. Несмотря на то, что модели SERVQUAL основаны на количественных и качественных показателях удовлетворенности клиента, они не являются универсальными, что приводит к негативной ситуации при использовании. Часть отмечаемых учеными недостатков была учтена авторами-исследователями, которые развивали и дополняли идеи методологии оценки. В то же время большинство работ, по оценкам ученых, не содержат концептуально новых подходов к методологии оценки качества сервиса [5–8].

Отдельные авторы считают, что оценка услуг «носит качественный характер и является объектом нечисловой природы», поэтому, оценка услуг по своему существу не может быть правильно выполнена в рамках расчета детерминированных моделей и возможна лишь в рамках лингвистической шкалы [9].

Широко распространенную практику оценки качества услуг с упором на удовлетворенность потребителей тоже нельзя признать удачной, т.к. в данном контексте возникает риск подмены понятий объективной реальности на субъективное ощущение, создается опасность манипулирования мнением потребителя. В тоже время при оценке качества услуг

нельзя полностью отказываться от оценки мнения потребителей, т.е. необходимо достичь баланса между мнением потребителей и объективным оцениванием [10].

Как методики оценивания обращают на себя внимание методы кластеризации [11], а также методы сравнительного анализа на основе подходов к решению проблем многокритериального и многоцелевого принятия решения в нечетких условиях, т.к. имеющийся в их основе математический и понятийный аппарат может быть пригоден для ранжирования объектов исследования при оценке качества. Более применяемыми нечеткими методами многокритериальной оптимизации являются ELECTRE, PROMETHEE, VIKOR, TOPSIS, ANP, ANP, DEMATEL и другие [12]. В то же время используемые алгоритмы в виде построения матриц решений достигают именно лишь цели ранжирования внутри рассматриваемой группы, исходя из имеющихся критериев, малопригодны в практическом оценивании, т.к. рассматривают задачу ситуативного и относительного, а не объективного расположения. Данные алгоритмы оценивают (ранжируют) альтернативу исключительно в рамках наличия других альтернатив. Кластеризация же, как метод оценивания, скорее является методом визуализации там, где наличие взаимосвязей может быть показано на двух- или трехмерной проекции.

Не теряет своей популярности и метод средних значений, как способ агрегирования, правда, дополненный рядом весовых коэффициентов и в рамках понятных исследователю метрик [13].

Так или иначе, вопрос об оценке качества ИТ-услуг остается одним из приоритетных для каждой организации, т.к. подразумевает принятие решения с помощью той или иной модели [14, 15]. При этом качество услуги может быть определено как «совокупность характеристик услуги, определяющих ее способность удовлетворять установленные или предполагаемые потребности потребителя»¹.

Авторами предлагается использование модели параметрического нелинейного агрегирования данных для оценки качества ИТ-услуг, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методиками [16–19].

Процесс оценки качества ИТ-услуги по данной методологии предопределяет необходимость выявления необходимых показателей качества, обеспечивающих возможность дальнейшего оценивания уровня качества услуги. Показатели качества услуги

должны соответствовать требованиям процесса декомпозиции, т.е. полностью характеризовать свойства услуги как единого целого на стадиях ее жизненного цикла, обуславливающие ее способность удовлетворять определенные потребности потребителей.

Таким образом, выявление и установление в ИТ-проекте показателей качества, особенно в таких работах как сервисное, техническое обслуживание ИТ-инфраструктуры, является сложной и основополагающей процедурой для последующей оценки качества по модели параметрического агрегирования данных, т.к. само по себе предполагает декомпозицию процесса оказания услуги в разрезе качества на соответствующие агрегаты. Декомпозиция как процесс имеет свои особенности и ограничения и должна выполняться согласно разработанной методологии обоснованно, целесообразно и адекватно поставленным целям [20, 21].

В этом смысле первоначально необходимо установить, какие качественные характеристики в широком смысле этого слова важны для контроля реализации ИТ-проекта, представив их в виде векторов значений с критериальными показателями.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Предлагается использовать следующие индикаторы для ИТ-проектов:

1. Индикатор своевременности обработки запросов (ИСО).

Данный индикатор выражает вероятность того, что обращение, направленное в ИТ-сервис, будет обработано в согласованные сроки:

$$\text{ИСО} = \frac{D1}{D1 + D2}, \quad (1)$$

где $D1$ – общее количество обработанных запросов за отчетный период, $D2$ – общее количество просроченных запросов за отчетный период.

2. Индикатор эксплуатационной готовности (ИЭГ).

Индикатор выражает вероятность того, что ИТ-сервис в данный момент времени находится в работоспособном состоянии:

$$\text{ИЭГ} = \frac{T1}{T1 + T2}, \quad (2)$$

где $T1$ – время функционирования сервиса (в часах) за отчетный период, $T2$ – время недоступности ИТ-сервиса за отчетный период.

3. Индикатор потребительской удовлетворенности (ИПУ).

Индикатор выражает вероятность того, что услуга ИТ-сервиса удовлетворит потребности потребителя:

¹ ГОСТ Р 50646-94. Государственный стандарт Российской Федерации. Услуги населению. Термины и определения. М.: Издательство стандартов; 1994. [GOST R 50646-94. State Standard of the Russian Federation. Service for people. Terms and definitions. Moscow: Izdatelstvo standartov; 1994 (in Russ.).]

$$\text{ИПУ} = \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2}, \quad (3)$$

где Y_1 – общее количество пользователей за отчетный период, Y_2 – общее количество жалоб за отчетный период.

Использование введенных индикаторов, имеющих числовые значения от 0 до 1, имеет практическую значимость, удобство применения, визуализации и методологически обосновано единой размерностью и концепцией.

Предлагается производить декомпозицию сложных систем только до уровня элементарных подсистем, описываемых этими индикаторами, которые изначально более адекватно отражают взаимосвязанные явления в сложной системе, нежели абсолютные показатели.

Сложная система обладает лишь ей присущими соотношениями, взаимосвязанными и взаимообусловленными процессами, отражающими внутренний баланс, и если описывать элементарные подсистемы абсолютными значениями, то это значительно усложнит расчет агрегированных индикаторов.

Следующим шагом в модели параметрического нелинейного агрегирования является, собственно, расчет агрегированного индикатора оценки качества услуги.

В качестве агрегирующей методики предлагается методологический подход [17, 18] в более простой интерпретации:

$$\text{АИАИ} = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^N \alpha_n \frac{(i_n - 1)^2}{h^2}}, \quad 0 \leq \text{АИАИ} \leq 1, \quad (4)$$

где АИАИ – агрегированный информационно-аналитический индикатор; α_n – весовые коэффициенты, верифицирующие индивидуальные значимости индикаторов элементарных агрегатов; i_n – значения индикаторов элементарных агрегатов, т.е. i_1 = ИСО, i_2 = ИЭГ, i_3 = ИПУ, Здесь N – количество индикаторов, которое может быть любым. h^2 – экспертные оценки неизвестных интенсивностей помех индикаторов элементарных агрегатов.

По условиям формулы (4) АИАИ монотонно растет до 1 при приближении значений всех элементарных агрегатов i_n к своим верхним значениям, т.е. к 1. Исходя из вышеописанного, АИАИ объективно отражает качественные характеристики процесса оказания услуг (выполненных работ). Агрегированный информационно-аналитический индикатор также может быть использован для выявления работ, требующих дополнительного контроля.

Приведенная авторами методика нивелирует многие «проблемы, связанные с использованием индексов, такие как выбор базы для расчета, качество исходных данных и агрегирование данных» [22, 23].

В таблице представлен расчет АИАИ для пяти организаций, входящих в группу компаний, оказывающих услуги ИТ-сопровождения (данные авторов по материалам компании ООО «Цифровой сервис»²).

Таблица. Расчетные данные показателей и АИАИ

№ п/п	ИСО	ИЭГ	ИПУ	АИАИ
1	0.85	0.75	0.88	0.66
2	0.79	0.76	0.74	0.58
3	0.93	0.95	0.98	0.88
4	0.65	0.55	0.64	0.46
5	0.58	0.5	0.45	0.40

Вычисленные АИАИ представлены на диаграммах (рис. 1 и 2).

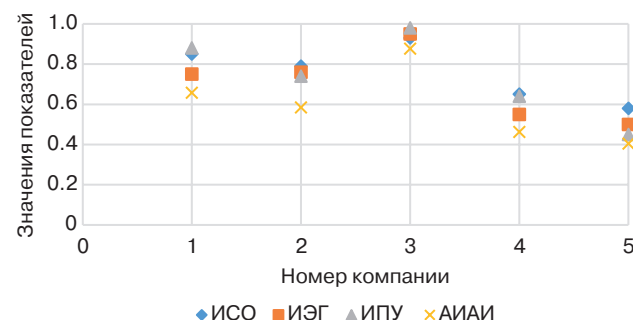


Рис. 1. Визуализация АИАИ (точечная диаграмма)

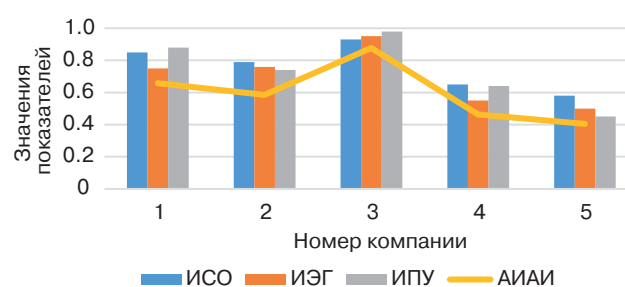


Рис. 2. Визуализация АИАИ (комбинированная диаграмма)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из диаграмм видно, что полученный по модели параметрического нелинейного агрегирования АИАИ коррелирует с набором исходных данных – индикаторами элементарных агрегатов, и адекватно

² <http://digitalservice.ru> (in Russ.). Дата обращения 05.12.2023. / Accessed December 05, 2023.

обобщенно отражает совокупность исходных показателей в рамках соотношений между ними.

В процессе опытного применения и эксплуатации и с учетом экспертного мнения АИАИ может быть дополнен следующими условиями для наилучшего практического применения:

- пороговое значение,
- целевое значение,
- фактическое значение.

Целевое направление изменения АИАИ для всех работ по времени: позитивное – возрастание, негативное – убывание.

Целевое и пороговое значения могут задавать шкалу АИАИ работ, в т.ч. для сравнения во времени. Шкала АИАИ может также делиться на следующие области:

- работы (услуги) не требуют дополнительного контроля,
- необходим дополнительный контроль работ (услуг),
- необходимы предупредительные мероприятия.

Если фактическое значение АИАИ не меньше целевого значения, это соответствует формулировке «работы (услуги) не требуют дополнительного контроля». Если фактическое значение АИАИ больше либо равно пороговому значению и меньше целевого значения, это соответствует формулировке «необходим дополнительный контроль». В случае, когда

фактическое значение АИАИ меньше порогового значения, можно сделать вывод о том, что «необходимы предупредительные мероприятия».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическое применение модели параметрического нелинейного агрегирования данных для оценки качества ИТ-услуг имеет ряд преимуществ. Использование агрегированного информационно-аналитического индикатора оценки качества услуг улучшает доступность аналитической информации для лиц, принимающих решения, снижает размерность аналитических данных, повышает объективность получаемой обобщенной информации.

Вклад авторов

Вклад авторов в написание статьи, включая разработку концепции (формирование идеи, формулировку и развитие ключевых целей и задач), проведение исследований, подготовку и редактирование текста, утверждение окончательного варианта статьи, является совместным, равновесным и равнозначным.

Authors' contribution

The authors' contribution to the writing of the article, including the development of the concept (idea formation, formulation and development of key goals and objectives), conducting research, preparing and editing the text, and approval of the final version of the article is joint, balanced, and equivalent.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курносова О.А. Оценка качества организации системы логистического сервиса на промышленных предприятиях. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Экономика и управление*. 2019;5(71):54–67. URL: <https://sn-ecomanager.cfuv.ru/wp-content/uploads/2019/05/54-67.pdf?ysclid=lx303wgj28650321072>
2. Parasuraman A., Zeithaml V.A., Berry L.L. SERVQUAL: A multiple-item scale for measuring service quality. *J. Retail.* 1988;64(1):12–40.
3. Шаталова В.В., Лихачевский Д.В., Казак Т.В. Большие данные: как технологии Big Data меняют нашу жизнь. *Big Data and Advanced Analytics*. 2021;7(1):188–192.
4. Вайншток А.П., Юрков Е.Ф. Ранговые модели индексации субъектов РФ по социально-экономическим показателям. *Информационные процессы*. 2023;23(1):138–147. URL: <http://www.jip.ru/2023/138-147-2023.pdf>
5. Limbourg S., Giangb H.Q., Coolsc M. Logistics Service Quality: The Case of Da Nang City. *Procedia Eng.* 2016;142: 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.022>
6. Rahman S. Quality management in logistics services: A comparison of practices between manufacturing companies and logistics firms in Australia. *Total Quality Management & Business Excellence*. 2008;19(5):535–550. <https://doi.org/10.1080/14783360802018202>
7. Franceschini F., Rafele C. Quality evaluation in logistic services. *Int. J. Agile Man. Syst.* 2000;2(1):49–54. <http://doi.org/10.1108/14654650010312589>
8. Gajewska T., Grigoroudis E. Importance of logistics services attributes influencing customer satisfaction. In: *4th IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT): Conference Paper*. IEEE; 2015. P. 53–58. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2015.7136590>
9. Ершова Т.Б. Общая характеристика качества ИТ-услуг предприятия. *Экономические и гуманитарные науки*. 2011;2(229):109–112.
10. Borden L. *How to Measure and Improve the IT Service Desk Experience*. ISG White Paper; 2015. 12 p.

11. Лапко А.В., Лапко В.А., Тубольцев В.П. Методика агрегирования результатов автоматической классификации статистических данных. В сб.: *Решетневские чтения: Материалы XXVII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева*. Красноярск: 2023. С. 430–432.
12. Родзин С.И., Боженюк А.В., Родзина О.Н. Методы нечеткого многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации при чрезвычайных ситуациях. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2023;2(232):186–200.
13. Шамасна Х.А., Семашко А.В. Разработка системы агрегации и визуализации данных в интеллектуальной птицефабрике. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2023;9:135–139.
14. Трайнев В.А., Трайнев О.В. *Параметрические модели в экспертных методах оценки при принятии решений*. М.: Прометей; 2003. 231 с. ISBN 5-94798-023-1
15. Сакулин С.А., Алфимцев А.Н., Бобрецова А.Г. Подход к поддержке принятия решений по выбору поставщика телекоммуникационного оборудования на основе операторов агрегирования. *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2023;20(11):46–53.
16. Краснов А.Е., Надеждин Е.Н., Никольский Д.Н., Репин Д.С., Калачев А.А. Нейросетевой подход к проблеме оценивания эффективности функционирования организации на основе агрегирования показателей ее деятельности. *Информатизация образования и науки*. 2017;1(33):141–154.
17. Краснов А.Е., Красников С.А., Анискин Д.Ю., Воробьева А.В., Кузнецова Ю.Г., Краснова Н.А., Сагинов Ю.Л. Модели количественного оценивания качества объектов технологий, производства и бизнеса в стандарте IDFM. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2006;3:53–56.
18. Сапогов А.А. Существующие методики агрегирования финансовых данных. *Инновации и инвестиции*. 2023;8:247–250.
19. Сапогов А.А., Краснов А.Е. Задачи определения весовых коэффициентов при операциях агрегирования. В сб.: *Наука. Производство. Образование: Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции*. Москва: 14 апреля 2023 г. 2023. С. 132–139.
20. Пивнева С.В., Блохина М.В. Декомпозиция процесса управления школой в единой информационной среде. В сб.: *Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: Сборник трудов II Международной научно-практической конференции*. Балаково: 18 декабря 2019 г. 2020. Т. 1. С. 216–219.
21. Елкин В.И. Агрегирование и декомпозиция систем дифференциальных уравнений с частными производными и систем управления с распределенными параметрами. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2023;63(9):1575–1586. <https://doi.org/10.31857/S0044466923090089>
22. Лубенец К.А. Индексы: перспективы и проблемы. В сб.: *Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и направления развития: сборник статей XVII международной научной конференции*. Тюмень: 18 ноября 2023 г. Санкт-Петербург: Международный институт перспективных исследований имени Ломоносова; 2023. С. 43–45.
23. Krasnov A., Pivneva S. Hierarchical quasi-neural network data aggregation to build a university research and innovation management system. In: Murgul V., Pukhkal V. (Eds.). *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT 2019)*. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. V. 1259. P. 12–25. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_2

REFERENCES

1. Kurnosova O.A. Assessment of the quality of organization of the system of logistic service at industrial enterprises. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Ekonomika i upravlenie*. 2019;5(71):54–67 (in Russ.). Available from URL: <https://sn-ecoman.cfuv.ru/wp-content/uploads/2019/05/54-67.pdf?ysclid=lx303wgj28650321072>
2. Parasuraman A., Zeithaml V.A., Berry L.L. SERVQUAL: A multiple-item scale for measuring service quality. *J. Retail.* 1988;64(1):12–40.
3. Shatalova V.V., Likhachevskii D.V., Kazak T.V. Big Data: how Big Data technologies are changing our lives. *Big Data and Advanced Analytics*. 2021;7(1):188–192 (in Russ.).
4. Vainshtok A.P., Yurkov E.F. Ranking models of index estimation of the Russian Federation subjects in accordance with socio-economic indicators. *Informatsionnye protsessy = Information Processes*. 2023;23(1):138–147 (in Russ.). Available from URL: <http://www.jip.ru/2023/138-147-2023.pdf>
5. Limbourg S., Giangb H.Q., Coolsc M. Logistics Service Quality: The Case of Da Nang City. *Procedia Eng.* 2016;142: 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.022>
6. Rahman S. Quality management in logistics services: A comparison of practices between manufacturing companies and logistics firms in Australia. *Total Quality Management & Business Excellence*. 2008;19(5):535–550. <https://doi.org/10.1080/14783360802018202>
7. Franceschini F., Rafele C. Quality evaluation in logistic services. *Int. J. Agile Man. Syst.* 2000;2(1):49–54. <http://doi.org/10.1108/14654650010312589>
8. Gajewska T., Grigoroudis E. Importance of logistics services attributes influencing customer satisfaction. In: *4th IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT): Conference Paper*. IEEE; 2015. P. 53–58. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2015.7136590>
9. Ershova T.B. General characteristics of quality IT services company. *Ekonomicheskie i humanitarnye nauki = Economic Science and Humanities*. 2011;2(229):109–112 (in Russ.).

10. Borden L. *How to Measure and Improve the IT Service Desk Experience*. ISG White Paper; 2015. 12 p.
11. Lapko A.V., Lapko V.A., Tuboltsev V.P. Methodology for aggregating of the results of automatic classification of statistical data. In: *Reshetnev Readings: Materials of the 27th International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the general designer of rocket and space systems, Academician M.F. Reshetnev*. Krasnoyarsk: 2023. P. 430–432 (in Russ.).
12. Rodzin S.I., Bozhenyuk A.V., Rodzina O.N. Methods of fuzzy multicriteria group decision-making for evacuation tasks in emergency situations. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2023;2(232):186–200 (in Russ.).
13. Shamasna Kh.A., Semashko A.V. Development of a data aggregation and visualization system in an intelligent poultry farm. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2023;9:135–139 (in Russ.).
14. Trainev V.A., Trainev O.V. *Parametricheskie modeli v ekspertnykh metodakh otsenki pri prinyatii reshenii (Parametric Models in Expert Assessment Methods for Decision Making)*. Moscow: Prometei; 2003. 231 p. (in Russ.). ISBN 5-94798-023-1
15. Sakulin S.A., Alfimtsev A.N., Bobretsova A.G. An approach to decision support for choosing a telecommunications equipment supplier based on aggregation operators. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of Computer and Information Technologies*. 2023;20(11):46–53 (in Russ.).
16. Krasnov A.E., Nadezhdin E.N., Nikol'skii D.N., Repin D.S., Kalachev A.A. Neural network approach to the estimation of the functioning efficiency of the organization based on the aggregation of its activities. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki = Informatization of Education and Science*. 2017;1(33):141–154 (in Russ.).
17. Krasnov A.E., Krasnikov S.A., Aniskin D.Yu., et al. Models of quantitative evaluation of objects4 quality of technologies, manufacture and business in IDFM standard. *Khranenie i pererabotka sel'khozsy'r'ya = Storage and Processing of Farm Products*. 2006;3:53–56 (in Russ.).
18. Sapogov A.A. Existing methods for financial data aggregation. *Innovatsii i investitsii = Innovations and Investments Magazine*. 2023;8:247–250 (in Russ.).
19. Sapogov A.A., Krasnov A.E. Problem of selection of weight coefficients in aggregation operations. In: *Science. Production. Education: Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. Moscow: April 14, 2023. 2023. P. 132–139 (in Russ.).
20. Pivneva S.V., Blokhina M.V. Decomposition of the school management process in a unified information environment. In: *Modern Technologies and Automation in Technology, Management and Education: Collection of proceedings of the Second International Scientific and Practical Conference*. Balakovo: December 18, 2019. 2020. V. 1. P. 216–219 (in Russ.).
21. Elkin V.I. Aggregation and decomposition of systems of partial differential equations and control systems with distributed parameters. *Comput. Math. Math. Phys.* 2023;63(9):1741–1750.
[Original Russian Text: Elkin V.I. Aggregation and decomposition of systems of partial differential equations and control systems with distributed parameters. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*. 2023;63(9):1575–1586 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044466923090089>]
22. Lubenets K.A. Indices: prospects and problems. In: *Innovative Research: Problems of Implementation of Results and Directions of Development: Collection of Articles of the 17th International Scientific Conference*. Tyumen: November 18, 2023. St. Petersburg: Lomonosov International Institute for Advanced Studies; 2023. P. 43–45 (in Russ.).
23. Krasnov A., Pivneva S. Hierarchical quasi-neural network data aggregation to build a university research and innovation management system. In: Murgul V., Pukhkal V. (Eds.). *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT 2019). Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. V. 1259. P. 12–25. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_2

Об авторах

Краснов Андрей Евгеньевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Российский государственный социальный университет» (129226, Москва, ул. Вильгельма Пика, д. 4, стр. 1). E-mail: krasnovmgutu@yandex.ru. Scopus Author ID 57192947423, SPIN-код РИНЦ 5431-8134, <https://orcid.org/0000-0002-4075-4427>

Сапогов Александр Александрович, аспирант, ФГБОУ ВО «Российский государственный социальный университет» (129226, Москва, ул. Вильгельма Пика, д. 4, стр. 1). E-mail: sapogovmail@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 2253-5104, <https://orcid.org/0009-0007-8095-2771>

About the authors

Andrey E. Krasnov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Information Security, Russian State Social University (4, Vil'gel'ma Pika ul., Moscow, 129226 Russia). E-mail: krasnovmgutu@yandex.ru. Scopus Author ID 57192947423, RSCI SPIN-code 5431-8134, <https://orcid.org/0000-0002-4075-4427>

Alexander A. Sapogov, Postgraduate Student, Russian State Social University (4, Vil'gel'ma Pika ul., Moscow, 129226 Russia). E-mail: sapogovmail@gmail.com. RSCI SPIN-code 2253-5104, <https://orcid.org/0009-0007-8095-2771>

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 378.1

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-98-110>

EDN WAZLGB



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Концептуальный подход к цифровой трансформации образовательного процесса в вузе

А.А. Кытманов^{1, @}, Ю.Н. Горелова², Т.В. Зыкова³,
О.А. Пихтилькова¹, Е.В. Пронина¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041 Россия

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

Резюме

Цели. Целью работы является разработка концептуального подхода к цифровой трансформации образовательного процесса в вузе. В основе выбранного подхода лежит детальный анализ этапов, участников и компонентов образовательного процесса в вузе с целью выработки дорожной карты по его цифровизации и созданию системы управления образовательным процессом на основе данных. Основными задачами цифровой трансформации являются: повышение удобства доступа к данным и работы с данными, относящимися к образовательному процессу, для всех групп конечных пользователей; повышение прозрачности всех составляющих образовательного процесса; высвобождение человеко-временных ресурсов за счет минимизации рутинных операций и повышения качества принимаемых решений. В основе создания системы управления образовательным процессом на основе данных лежат принципы цифровой культуры управления процессами, которые подразумевают, что собираемые в университетских системах данные упорядочены в единую структуру, согласованы между собой, непротиворечивы и хранятся в виде, удобном для разработки новых цифровых сервисов. Разработка инструментов интеллектуальной поддержки принятия решений и учебной аналитики ведется в тесном взаимодействии разработчиков, аналитиков и конечных пользователей всех уровней.

Методы. В работе использован опыт работы авторов и их коллег в российских и зарубежных вузах в качестве пользователей информационных систем и сервисов, разработчиков сервисов учебной аналитики и руководителей разного уровня. Приведены этапы цифровой трансформации организации.

Результаты. Предложен концептуальный подход к пониманию, постановке целей и планированию процессов цифровой трансформации образовательного процесса. Подробно описаны данные основных участников и составляющих образовательного процесса: обучающихся, преподавателей и образовательных программ, необходимые для управления вузом на основе данных; аргументирован их отбор.

Выводы. Разработка концептуального подхода для создания системы управления образовательным процессом на основе данных в вузе становится приоритетной задачей, от качества решения которой во многом будут зависеть развитие и конкурентоспособность университета в будущем.

Ключевые слова: цифровизация, цифровая трансформация, управление на основе данных, образовательный процесс, обучающийся, профессорско-преподавательский состав, образовательная программа, учебная аналитика

• Поступила: 09.02.2024 • Доработана: 18.03.2024 • Принята к опубликованию: 13.08.2024

Для цитирования: Кытманов А.А., Горелова Ю.Н., Зыкова Т.В., Пихтилькова О.А., Пронина Е.В. Концептуальный подход к цифровой трансформации образовательного процесса в вузе. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):98–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-98-110>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

A conceptual approach to digital transformation of the educational process at a higher education institution

Alexey A. Kytmanov ^{1,*}, Yuliya N. Gorelova ², Tatiana V. Zyкова ³,
Olga A. Pikhtilkova ¹, Elena V. Pronina ¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

³ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041 Russia

* Corresponding author, e-mail: kytmanov@mirea.ru

Abstract

Objectives. The research aims to develop a conceptual approach to the digital transformation of university educational processes. The approach is based on a detailed analysis of the stages, participants, and components of the educational process at universities in order to develop a roadmap for digitalization and the development of a data-driven educational process management system. The main objectives of digital transformation are: (1) improve convenience for all groups of end users by providing access to data and operations with data related to the educational process; (2) increase the transparency of all components of the educational process; (3) release human and time resources by minimizing routine operations and improving the quality of decisions. The development of a data-driven educational process management system is based on digital culture principles of process management, which imply that the data collected in university systems are consistent, organized into a single structure, and stored in a form convenient for the development of new digital services. The development of tools for intelligent decision support and learning analytics is executed cooperatively by developers, analysts, and end users at all levels.

Methods. The research considers the work experience of the authors and their colleagues in Russian and international universities as users of information systems and services, developers of educational analytics services, and managers at various levels, as well as the stages of university digital transformation.

Results. The proposed conceptual approach increases comprehension by setting goals and organizing the planning of digital transformation processes in education. As well as providing a detailed description of the major participants and components of the educational process, comprising students, teachers and educational programs, the article discusses data selection criteria.

Conclusions. The development of a conceptual approach for creating a data-driven educational process management system at a university is becoming a priority task, whose successful execution will underpin further university advancement and competitiveness.

Keywords: digitalization, digital transformation, data-driven management, educational process, student, teaching staff, educational program, learning analytics

• Submitted: 09.02.2024 • Revised: 18.03.2024 • Accepted: 13.08.2024

For citation: Kytmanov A.A., Gorelova Yu.N., Zykova T.V., Pikhtilkova O.A., Pronina E.V. A conceptual approach to digital transformation of the educational process at a higher education institution. *Russ. Technol. J.* 2024;12(5):98–110. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-5-98-110>

Financial disclosure: The authors have no financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация образования – важный процесс, направленный на решение задач, связанных с созданием технологий и разработкой сервисов, которые позволят оптимизировать образовательный процесс и сделать его более адекватным запросам ключевых участников: студентов, преподавателей, работодателей и выпускников [1]. В последние два десятилетия было создано и внедрено большое число информационных систем и сервисов, позволяющих собирать, хранить и обрабатывать данные об участниках и составляющих образовательного процесса [2]. Прежде всего, это системы управления обучением (learning management systems, LMS), являющиеся платформами для размещения учебно-методических материалов по реализуемым дисциплинам. В зависимости от степени проработки учебно-методических материалов и автоматизации контрольно-измерительных процедур, электронные курсы, размещенные на таких платформах, могут выполнять как роль поддержки образовательного процесса, реализуемого в очной форме, так и роль полноценных ресурсов в рамках дистанционного обучения [3]. Примерами таких систем являются как внутривузовские платформы онлайн-обучения, многие из которых разработаны на базе среды Moodle¹, так и платформы массовых открытых онлайн-курсов (MOOC), в т.ч. такие известные платформы, как Coursera², edX³ и Udacity⁴ (более подробный список можно найти на платформе Wikipedia^{5,6}). Эти платформы позволяют собирать большое число данных об обучающихся и процессе освоения ими учебного материала. Появление таких инструментов сбора информации

дало толчок новым направлениям исследований – интеллектуальному анализу образовательных данных (educational data mining) и учебной аналитике (learning analytics). Данные области зарождались и оформлялись как отдельные направления исследований в начале 2000-х гг., а ориентировочно с начала 2010-х гг. они развиваются гораздо более стремительно. В частности, исследование [4] посвящено сопоставлению этих понятий. Авторы подчеркивают, что конечной целью обоих процессов является возможность прогнозирования образовательных результатов на основании анализа данных образовательных платформ, при этом в фокусе внимания учебной аналитики находится сам процесс обучения и, соответственно, успеваемость (успешность) обучающегося при освоении курса, в то время как интеллектуальный анализ образовательных данных сосредоточен непосредственно на процессе получения информации из различных источников [5].

Ряд исследований в области учебной аналитики был связан с созданием систем прогнозирования образовательных результатов на основе анализа полученных оценок, времени, затраченного на выполнение заданий и общей успеваемости по курсу [6]. Кроме того, инструменты учебной аналитики рассматриваются также в качестве источника информации для участников образовательного процесса (преподавателей и студентов) в режиме реального времени. Они позволяют обучающимся оценивать собственный прогресс по курсу в сопоставлении с другими его участниками и планировать время на выполнение заданий [7].

Следует, однако, отметить, что потенциал таких систем ограничен, поскольку он базируется на данных активности обучающихся в электронных курсах, которые можно также дополнить данными о присутствии и активности на занятиях, проводимых в очной форме [8]. В частности, в большинстве существующих систем не учитываются индивидуальные особенности студента, такие как когнитивный стиль, мотивационная составляющая, языковой и культурный аспекты. В работе [9] автор подчеркивает, что в цифровой образовательной среде, в отличие от традиционного офлайн-обучения, стейкхолдеры образовательного процесса испытывают сложности с определением уровня вовлеченности и мотивированности студентов, поскольку отсутствует концептуальный подход к процессу моделирования,

¹ <https://moodle.org/>. Дата обращения 15.01.2024. / Accessed January 15, 2024.

² <https://www.coursera.org/>. Дата обращения 15.01.2024. / Accessed January 15, 2024.

³ <https://www.edx.org/>. Дата обращения 15.01.2024. / Accessed January 15, 2024.

⁴ <https://www.udacity.com/>. Дата обращения 15.01.2024. / Accessed January 15, 2024.

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_MOOC_providers. Дата обращения 15.01.2024. / Accessed January 15, 2024.

⁶ Роскомнадзор: иностранный владелец ресурса нарушает закон Российской Федерации. / Roskomnadzor: the foreign owner of the resource violates the law of the Russian Federation.

формирования и поддержания студенческой вовлеченности при обучении с использованием цифровых образовательных ресурсов. Кроме того, обычно такие системы работают с данными внутридисциплинарного уровня, т.е. данными рабочей активности студента в рамках изучаемой дисциплины. Вместе с тем, для создания системы поддержки принятия решений, функционирующей на уровне университета, необходимо использовать данные разных иерархических уровней [10], поскольку обобщенные данные, используемые для статистики по вузу, часто не позволяют выявить причины проблем, возникающих в учебном процессе. Наконец, следует отметить, что, помимо обучающихся, важными субъектами и объектами образовательного процесса является профессорско-преподавательский состав, который обеспечивает обучение и контроль сформированности знаний, умений и навыков, а также образовательные программы (ОП), являющиеся по сути основными сущностями, в рамках которых выстраивается образовательный процесс [11].

В данной работе предложен концептуальный подход к пониманию, постановке целей и планированию процессов цифровой трансформации образовательного процесса для обеспечения возможности разработки инструментов интеллектуальной поддержки принятия решений. Данный подход может лечь в основу создания системы управления образовательным процессом на основе данных.

1. МЕТОДЫ

В основу полученных результатов лег опыт работы авторов и их коллег в российских и зарубежных вузах в качестве пользователей информационных систем и сервисов, разработчиков сервисов учебной аналитики и руководителей разного уровня (преподаватель – разработчик электронного курса, академический руководитель ОП, заведующий кафедрой, директор института, начальник учебно-организационного отдела, заместитель начальника учебно-методического

управления, разработчик моделей прогнозирования академической успешности обучающихся, директор департамента информационных технологий), а также изучения мирового опыта исследователей в области цифровизации образования, учебной аналитики и интеллектуального анализа образовательных данных.

В следующем разделе описаны этапы цифровой трансформации организации для более осознанной разработки дорожной карты и планирования мероприятий по цифровизации образовательного процесса. Ее основными задачами являются увеличение прозрачности всех компонентов образовательного процесса и минипроцессов в его рамках, минимизация рутинной нагрузки на участников образовательного процесса, повышение качества принимаемых на разных уровнях решений по оптимизации образовательного процесса. Одной из основных целей цифровой трансформации образовательной организации является создание системы управления образовательным процессом на основе данных как комплекса инструментов учебной аналитики и интеллектуальной поддержки принятия решений.

2. ЭТАПЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

В основе цифровой трансформации организации лежит уровень ее цифровой зрелости, который заключается в степени осознания необходимости преобразования ее основных процессов, связанных с получением данных и обменом информацией. На начальном уровне цифровой зрелости такие преобразования носят спонтанный характер и, как правило, иницируются отдельными подразделениями для оптимизации их внутренних процессов. Высокий уровень цифровой зрелости подразумевает последовательную реализацию мероприятий по согласованному преобразованию и интеграции всех ключевых процессов организации в соответствии с разработанной стратегией и планом трансформации. Цифровую трансформацию организации можно разделить на три основных этапа, представленных на рисунке.

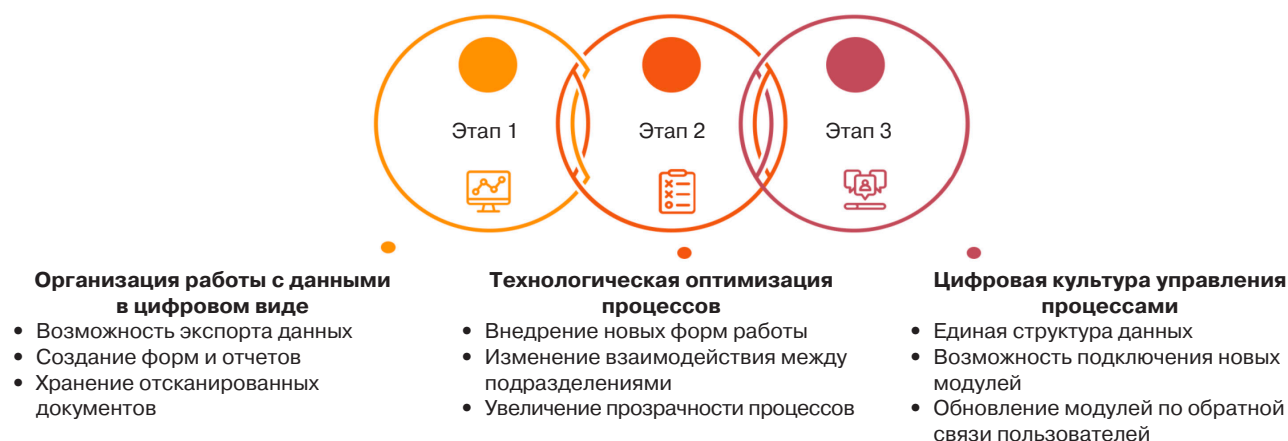


Рисунок. Этапы цифровой трансформации организации

2.1. Организация работы с данными в цифровом виде

Основным недостатком документооборота на физических носителях является большая трудоемкость их проверки, статистической обработки, анализа, и, как следствие, принятия решений на основе извлеченной из них информации. Как правило, острой проблемой здесь является доступ к данным предыдущих календарных периодов, например, для подготовки отчетов или визуализации достижений в динамике.

На данном этапе при внедрении систем работы с электронными документами и материалами их важной особенностью является наличие инструментов экспорта данных в широко используемых форматах, а также возможностей представления данных в разных видах, создание обобщенных форм и сводных отчетов. Другими словами, одним из важных критериев удобства работы с указанными системами и сервисами является наличие инструментов, обеспечивающих гибкость работы с данными. Примером фактического отсутствия перевода материалов в цифровой вид является хранение в системе отсканированных версий ранее распечатанных документов.

2.2. Технологическая оптимизация процессов

Следующим шагом цифровой трансформации является изменение форм работы с данными и изменение организации взаимодействия между подразделениями на основе новых форм работы и инструментов с целью увеличения прозрачности процессов и высвобождения человеко-временных ресурсов. Примером перехода на данный этап является оптимизация процесса отчетности за счет автоматизации сбора данных, необходимых для конкретного вида отчетности в течение всего отчетного периода. Все результаты работы сотрудника или коллектива в отчетном периоде вносятся в соответствующую систему по мере их появления. В этом случае подготовка отчета не требует специальных усилий, а сам процесс его подготовки представляет собой автоматическое формирование сводных данных по результатам, достигнутым за определенный период. Следует отметить, что в этом случае не только экономятся человеко-временные ресурсы, но также значительно повышается прозрачность процессов, снижается вероятность предоставления неверных данных.

2.3. Переход к цифровой культуре управления процессами

На данном этапе все ключевые процессы функционирования организации представляют собой части единого целого. Все собираемые данные упорядочены

в единую структуру, согласованы между собой и органично дополняют друг друга. Информационные системы функционируют на основе базы (баз) данных, спроектированных с учетом принципов студентоцентричности, непрерывности и согласованности, предложенных и подробно описанных в [10]. Соблюдение данных принципов при проектировании и создании цифровой инфраструктуры вуза гарантирует непротиворечивость и отсутствие конфликтов в данных при работе с ними в разных системах, обеспечивает их полноту посредством хранения всех данных с временными метками, позволяющими точно восстановить образовательную историю обучающегося, а также удобство работы с ними. Информационные системы допускают подключение новых модулей и обновляются на основе поступающей от конечных пользователей обратной связи. Разработка новых модулей и сервисов ведется в тесном взаимодействии разработчиков, аналитиков и конечных пользователей всех уровней: руководителей высшего и среднего звена, сотрудников учебных отделов, представителей профессорско-преподавательского состава и обучающихся. Такая цифровая инфраструктура позволяет упростить разработку инструментов учебной аналитики и поддержки принятия решений на основе данных, с помощью которых становится возможным более эффективное выявление проблем учебного процесса и поиск путей их решения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе рассмотрены основные участники и составляющие образовательного процесса (далее – субъекты или объекты образовательного процесса): обучающиеся, преподаватели и ОП. Предложена структура данных для каждого субъекта (объекта) и приведено ее подробное описание в разрезе концепции и задач управления на основе данных. Чем больше информации можно собрать, чем четче ее структурировать и детальнее описать, тем выше потенциал системы.

3.1. Данные обучающихся

Обучающийся является ключевым участником образовательного процесса. И поэтому особенно важно изначально классифицировать данные о нем таким образом, чтобы последующее их использование максимально упростило процесс извлечения данных и их анализа [12]. При построении модели обучающегося будем учитывать два вида данных: данные, которые не меняются или меняются очень медленно со временем (социально-демографические данные, пол, возраст, национальность и культурные особенности, психологические характеристики

и когнитивные особенности и др.); вторая половина – это накопленные данные о процессе и результатах обучения (накопленные цифровые следы: баллы ЕГЭ, результаты участия в олимпиадах, данные об оценках аттестата о среднем образовании, данные о его активности на образовательных платформах, результаты текущей, промежуточной и итоговой аттестаций). Такие данные формируют цифровую образовательную историю обучающегося, понятие которой было введено в работе [13].

Одной из важных задач учебной аналитики является моделирование обучающегося, в т.ч. создание его цифрового двойника. При этом очевидно, что чем больше данных о студенте и процессе его обучения можно собирать, тем точнее будет модель обучающегося. В частности, важной задачей является разработка инструментов сбора данных об использовании студентом учебных материалов из внешних источников (образовательный контент, образовательные форумы, различные справочные материалы).

При сборе данных важно соблюдать принцип их непрерывности [10], который гарантирует, что никакие изменяющиеся данные не могут быть потеряны, в частности, в процессе их обновления (перезаписи). Например, в случае, если студент сдал экзамен не с первой попытки, в базе сохраняются все даты и результаты попыток. Это дает более полную картину успеваемости, помогает своевременно выявить проблемы с обучением и в дальнейшем правильно скорректировать траекторию обучения. Или студент переходит с одного направления на другое. Тогда можно говорить об изменении его интересов или о трудностях в освоении отдельных дисциплин. Другими словами, такие показатели могут использоваться для выявления и устранения проблемных мест и последующей корректировки ОП с целью улучшения ее качества.

Условно, разделим все данные на три группы. К первой группе отнесем общие данные, которые используются в образовательном и административном процессах. Вторая группа оперирует данными, связанными с конкретной ОП, требованиями к результатам обучения. Наконец, третья группа содержит информацию об активности и успеваемости студента в рамках конкретного курса ОП.

К первому блоку отнесем *основные данные об обучающемся*:

- основные персональные данные,
- социально-демографические данные,
- данные о состоянии здоровья,
- данные о поступлении,
- академический статус обучающегося.

Основные персональные данные содержат фамилию, имя, отчество обучающегося, дату и место рождения, пол, данные основных документов (паспорт, СНИЛС, ИНН).

Социально-демографические данные содержат информацию о семейном положении, составе семьи, количестве иждивенцев и среднем доходе. Эти сведения могут быть полезны при рассмотрении возможности получения социальной стипендии и иной помощи.

Сведения о состоянии здоровья важны, как данные, на основе которых, делается заключение о необходимости инклюзивного обучения или его отсутствии. Сюда входят данные о наличии заболеваний и заключения специалистов медицинских учреждений.

Данные о поступлении традиционно включают баллы ЕГЭ или результаты предыдущей итоговой аттестации, результаты участия в олимпиадах, дающие привилегии при переходе на следующий уровень обучения. Наличие информации о портфолио дает дополнительные баллы при поступлении на некоторые направления подготовки. При поступлении в магистратуру необходима информация о дипломе бакалавра, результаты вступительных испытаний, а также публикационные данные при наличии.

Академический статус содержит сведения о текущем состоянии обучающегося: учится / закончил обучение / находится в академическом отпуске / отчислен / находится в стадии восстановления. Здесь же может быть указан статус студента в образовательном разрезе, а именно, указывается информация об освоенных курсах в рамках ОП, пройденных учебных и производственных практиках, стажировках, научном руководителе, теме дипломного проекта.

Эти данные могут быть дополнены данными о психологических характеристиках студента, его когнитивных особенностях и стилях. Учет таких характеристик обучающегося может оказаться полезным при планировании и организации его учебной и внеучебной деятельности, например, при проектировании индивидуальной образовательной траектории.

Вторая группа содержит в себе следующие блоки данных промежуточной и итоговой аттестации, а также предпрофессиональной подготовки обучающегося:

Блок данных *промежуточной и итоговой аттестации*:

- результаты промежуточной аттестации за все годы обучения;
- результаты сдачи сессий;
- количество задолженностей на текущий момент;
- данные о количестве попыток получения аттестации по дисциплине.

Блок данных *предпрофессиональной подготовки*:

- темы выполненных исследовательских работ и данные о научных руководителях;
- научные публикации;
- участие в конференциях;
- опыт профессиональной деятельности в профильных организациях;

- рецензии и отзывы на научные и выпускные квалификационные работы;
- опыт участия в командных проектах / стартапах с данными о личном вкладе;

Раздел промежуточной аттестации может дать полезную информацию о наиболее сложных курсах для обучающегося и помочь правильно подобрать образовательные материалы, учитывая его уровень подготовки, мотивации и амбиций. На основе таких данных возможно создание более продвинутых сервисов, таких как сервисы прогнозирования успешности завершения обучающимся ОП или рекомендательные системы [14], способные выстроить индивидуальную образовательную траекторию в зависимости от предпочтений, способностей и ранее накопленной информации о пользователе (цифровых следов и цифровой образовательной истории).

На основе данных предпрофессиональной подготовки можно судить о научных интересах обучающегося и его готовности к исследовательской деятельности, что немаловажно при выборе базы производственной практики, стажировок, или подборе потенциальных мест работы будущего выпускника. Данные о научном руководителе, рецензии и отзывы могут дать информацию студентам о выборе тематики исследования, актуальности и перспективе дальнейшего развития и карьеры в научно-технологической сфере.

Перейдем к описанию третьей группы данных – данных образовательного курса, включающих:

- число посещений LMS и общее время, проведенное в системе;
- число переходов в системе LMS, число кликов;
- количество просмотренных учебных видео, время их просмотра;
- участие в дискуссиях, обсуждениях на учебных форумах;
- число обращений к внешним учебным источникам, общее время, использованное на освоение учебного материала;
- успешность выполнения заданий (правильность, своевременность, самостоятельность).

Данные третьей группы характеризуют успеваемость обучающегося в рамках конкретного курса. В настоящее время большинство учебных курсов представлены в электронном виде в университетских LMS (как правило, на базе Moodle, подробный список LMS представлен на платформе Wikipedia^{7,8}). Структура курса, содержание контрольно-измерительных материалов, критерии оценивания, сроки выполнения заданий, как правило, определяются

преподавателем на основе утвержденной рабочей программы дисциплины.

Руководитель курса, используя доступ к журналу событий, журналу оценок, может получить данные об активности студента в рамках дисциплины. Также можно получить такие данные, как время изучения и число обращений к учебным материалам, время просмотра учебных видео, результаты промежуточных тестирований. В дальнейшем, используя все эти показатели, можно проследить динамику успеваемости по предмету или иные показатели.

Отметим, что данные первой группы, как правило, не изменяются или изменяются медленно с течением времени. Данные второй группы регулярно обновляются и пополняются, как правило, не реже 1 раза в семестр. Данные третьей группы обновляются и пополняются наиболее часто: как правило, еженедельно.

3.2. Данные профессорско-преподавательского состава

Следующим ключевым субъектом образовательного процесса является преподаватель. Квалификация, опыт и педагогическое мастерство преподавателя во многом определяют эффективность донесения знаний обучающимся, а, следовательно, и эффективность учебного процесса. Отметим, что учебный курс по дисциплине учебного плана есть результат ее авторской интерпретации, от которой зависят факторы мотивации и вовлеченности студентов, приобретаемые ими знания, умения и навыки, и, как следствие, успешность освоения дисциплины [15]. В отличие от данных обучающихся, являющихся основным фокусом внимания исследователей в области учебной аналитики, исследованию данных преподавателей посвящено гораздо меньшее число работ. Однако в последнее время интерес к этой теме возрастает (см., например, [16]).

Отметим еще один важный момент. Преподаватели регулярно проходят аттестацию, например, в рамках трудоустройства или избрания по конкурсу. Для этой процедуры соискатель готовит список своих достижений за определенный период по утвержденной форме в организации, в которой он планирует (продолжать) работать. Однако представляемые таким образом данные могут содержать неточности, в их оформлении могут быть ошибки, а главное, эти данные, как правило, используются одновременно и не хранятся для дальнейшего использования. К тому же работа по подготовке таких отчетов требует времени, являясь при этом рутинной. С другой стороны, правильно организованный сбор данных о достижениях преподавателя в разных сферах позволит получать такие отчеты автоматически без временных и трудовых затрат и при этом существенно снизит риски представления неточной или ошибочной

⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_learning_management_systems. Дата обращения 15.01.2024. / Accessed January 15, 2024.

⁸ Роскомнадзор: иностранный владелец ресурса нарушает закон Российской Федерации. / Roskomnadzor: the foreign owner of the resource violates the law of the Russian Federation.

информации. С точки зрения руководителя, цифровой сервис по работе с данными преподавателей может предоставить возможности мониторинга достижений не только отдельного сотрудника, но и генерации сводных отчетов по коллективам (работники кафедры, института, члены научного коллектива) или группам (аспиранты 3-го года, кандидаты наук в возрасте до 35 лет и пр.), а также динамики достижений сотрудника или коллектива за определенный период.

Для удобства оценки, мониторинга и своевременной корректировки образовательного процесса в разрезе преподавателя, по аналогии со студентами, предлагается рассмотреть данные о преподавателе, как многомерные, структурированные, динамически обновляемые данные о профессиональной компетентности, коммуникативных навыках, а также цифровой компетентности и цифровой культуре, включающие группу личных данных и группы показателей. Каждый показатель предлагается рассматривать со стороны информации, которую можно получить в текущем моменте – статичные данные и динамичные данные, изменяющиеся с течением времени под воздействием каких-то внешних факторов, опыта и выданных рекомендаций.

Первый блок данных содержит *основные сведения личного и профессионального плана*:

- основные персональные данные (фамилию, имя, отчество, дата и место рождения, пол, данные основных документов);
- социально-демографические данные (семейное положение, состав семьи, средний доход);
- данные о состоянии здоровья (применительно к трудовым обязанностям);
- данные об образовании, ученых степенях и званиях;
- данные о предыдущих местах работы и занимаемых должностях;
- данные о родном языке и владении иностранными языками;
- данные об опыте преподавания дисциплин;
- данные профилей в наукометрических базах данных и профессионально-ориентированных социальных сетях.

Этот блок содержит стандартный набор данных, не меняющихся или меняющихся медленно с течением времени. Он позволяет сформировать представление об основных этапах трудовой биографии, например, при приеме на работу.

Следующие блоки описывают компетентность работника как действующего ученого, наставника или практика.

Блок данных *учебно-методической компетентности* содержит:

- данные о преподаваемых курсах (в привязке к учебным годам и семестрам, с указанием вида занятий и формы проведения);

- данные о количестве студентов на преподаваемых курсах;
 - данные о разработанных учебно-методических материалах и электронных курсах;
 - данные о внешних ресурсах, используемых в преподавательской практике;
 - разработанный информационный контент, используемый в преподавательской деятельности;
 - данные о пройденных курсах повышения квалификации / переподготовки / профессиональной подготовки;
 - данные студенческой оценки преподавателя (при наличии);
 - посещаемость студентами занятий по дисциплине в течение семестра;
 - успеваемость студентов по дисциплине в сессию.
- Блок данных *научно-исследовательской компетентности* включает:

- данные о публикациях и результатах интеллектуальной деятельности;
- данные об участии в проектах, поддержанных грантами или выполняемых в рамках хоздоговорных работ, в качестве руководителя или исполнителя;
- данные о членстве в диссертационных советах, редакционных коллегиях научных журналов;
- данные о выполнении работ в качестве эксперта.

Блок данных *наставнической компетентности* содержит:

- данные о научном руководстве выпускными квалификационными работами студентов/магистрантов;
- данные о научном руководстве аспирантами / научном консультировании докторантов;
- данные о публикациях студентов/аспирантов, подготовленных в соавторстве с сотрудником;
- данные о выпускных квалификационных работах / кандидатских / докторских диссертациях, защищенных под руководством сотрудника;
- данные о студентах/аспирантах, занявших призовые места в конкурсах / соревнованиях / на конференциях (с указанием уровня мероприятия).

Блок данных *практической компетентности* включает:

- данные об опыте работы в организациях / на предприятиях по профилю подготовки, на котором ведется преподавание (с указанием мест работы, занимаемых должностей, основных выполняемых обязанностей);
- данные о разработанных задачах, возникающих в практической деятельности, адаптированных под учебный процесс (кейсы);
- данные о разработанных задачах практической направленности для соревнований/хакатонов;
- данные об опыте экспертной работы в профессиональной сфере.

Кроме указанных блоков уместно также ввести дополнительный блок данных, где сотрудник мог бы указать иную информацию, свидетельствующую о его профессиональной квалификации, например, сведения о полученных наградах, выигранных конкурсах, участии в работе межвузовских и международных коллективов, консорциумов, организации мероприятий, выступлениях с научно-популярными лекциями, опыте подготовки и проведения тренингов, деловых игр и т.д. Эти данные впоследствии также могут быть классифицированы в отдельные блоки для упрощения работы с ними.

Эти блоки могут быть дополнены блоком коммуникативных и иных гибких навыков, к которому можно отнести умение донести материал с учетом уровня подготовки аудитории (адаптивность), управление мотивацией аудитории, навыки формирования критического и творческого мышления обучаемых, умение выстраивать продуктивные межличностные отношения внутри коллектива. Однако следует учитывать, что измерение таких навыков представляет собой отдельную задачу. Об уровне коммуникативной компетентности могут свидетельствовать, например, результаты студенческой оценки преподавателя, число соавторов в публикациях, активность участия в коллективных проектах.

Наконец, важным блоком, нуждающимся в подробном рассмотрении в рамках отдельной работы, являются данные цифровой компетентности и цифровой культуры преподавателя. В данном блоке необходимо учитывать не только уровень владения различными цифровыми инструментами и сервисами, используемыми в образовательной и научно-исследовательской деятельности, но и уровень принятия различных аспектов изменений, которые несет с собой процесс цифровизации, а также готовность содействовать их успешному внедрению. Развитие цифровой культуры профессорско-преподавательского состава как неотъемлемой части корпоративной культуры является, на наш взгляд, важной задачей, стоящей перед руководством вуза в части управления изменениями.

Важно отметить, что система сбора и хранения данных должна обеспечивать возможность автоматического их получения там, где это возможно, по мере их появления. Примером является получение данных из наукометрических систем об опубликованных статьях. Там, где автоматическое получение данных невозможно, система должна обеспечивать по возможности их стандартизированный ввод с подтверждающими документами или ссылками.

3.3. Данные ОП

Одной из важнейших составляющих образовательного процесса является ОП, качество которой напрямую влияет на ее востребованность среди абитуриентов и студентов. Недостаточно высокие

показатели учебного процесса (низкая успеваемость, высокий процент обучающихся, сменивших ОП на другую в процессе обучения, низкие показатели трудоустройства по специальности) могут свидетельствовать не только о недостаточном уровне подготовки самих обучающихся, но и о том, что имеются проблемы в самой программе. Наиболее остро проблемы низкого интереса к программе ощущаются в период приемной кампании и выражаются в низком конкурсе на программу, следствием которого является прием на бюджетные места абитуриентов с более низкими результатами вступительных испытаний и, как правило, менее мотивированных, что, в свою очередь, влечет дальнейшие проблемы с их обучением по программе. Среди причин низкой востребованности ОП могут быть как внешние причины (моральное устаревание, т.е. недостаточное соответствие меняющимся запросам рынка труда), так и внутренние (несоответствие содержания и структуры программы заявленным образовательным результатам). Несмотря на то, что образовательное сообщество, включая самих разработчиков ОП, признает сам факт возможного наличия таких проблем, в настоящее время отсутствует методология, которая бы четко описывала алгоритм анализа и оценки ОП, выявления их слабых мест для корректировки.

В связи с этим важной задачей является определение комплекса внутренних показателей ОП, характеризующих особенности ее структуры и содержания, а также внешних показателей ОП, на основе которых можно судить о ее качестве и востребованности. С каждым показателем затем необходимо связать набор данных, на основе которого он будет вычисляться.

Основными *внутренними характеристиками* ОП можно считать:

- направление подготовки, включая уровень образования, форму обучения;
- требования ФГОС или собственного образовательного стандарта образовательной организации, в т.ч. образовательные результаты, сформулированные в виде компетенций;
- профессиональные стандарты, к деятельности по которым готовит ОП, в т.ч. формируемые профессиональные компетенции;
- структуру ОП, определяемую ее учебным планом и включающую набор дисциплин и практик, их трудоемкости и календарный график освоения;
- коллектив разработчиков ОП;
- кадровый состав, реализующий ОП;
- материально-техническое обеспечение ОП;
- иные характеристики, такие как вовлеченность в учебный процесс представителей работодателей, наличие адаптированных для учебного процесса реальных задач (кейсов), география мест прохождения практик и пр.

Данные характеристики определяют дизайн, структуру и наполнение ОП, оказывают прямое влияние ее качество. Однако, чтобы оценить качество ОП, необходимо оценивать внешние показатели, независимые от ее внутреннего наполнения, которые могут свидетельствовать об удовлетворенности программой ее основных внешних стейкхолдеров: выпускников, их работодателей, различные административные структуры регионального и федерального уровней.

Среди основных *внешних показателей*, характеризующих качество ОП отметим следующие:

- распределение баллов ЕГЭ абитуриентов, поступивших на ОП, в т.ч. их средний и проходной баллы;
- доля поступивших на ОП, имеющих достижения (победители и призеры олимпиад и соревнований различных уровней);
- показатели, связанные с итогами промежуточной аттестации: распределение оценок по дисциплинам в сессию, динамика доли обучающихся, имеющих определенное количество задолженностей и пр.;
- показатели, связанные с движением контингента: динамика отчислений, уходов в академический отпуск, переходов на другие ОП или в другие вузы, динамика восстановлений, перехода на ОП с других ОП вуза, из других вузов и пр.;
- доля обучающихся (в разрезе года обучения), имеющих достижения в научной деятельности (выступления на научных конференциях, публикации, результаты интеллектуальной деятельности);
- доля обучающихся (в разрезе года обучения), имеющих достижения в профессиональной деятельности, отмеченные потенциальными работодателями по результатам прохождения практик, участия в решении проектных задач и кейсов и пр.;
- доля трудоустройства выпускников в организации по профилю освоенного направления подготовки;
- результаты опросов обучающихся об их удовлетворенности составляющими учебного процесса по ОП;
- результаты опросов выпускников об их удовлетворенности обучением на ОП, возможностями трудоустройства, конкурентоспособностью на рынке труда и пр.;
- результаты опросов работодателей об их удовлетворенности квалификацией выпускников, взаимодействием с вузом, командой разработчиков, преподавателями, реализующими ОП.

Следует отметить, что отдельного внимания здесь требует разработка методики работы с перечисленными показателями, поскольку их абсолютные значения сами по себе не несут большой смысловой нагрузки в смысле определения качества ОП.

Гораздо более информативным может быть применение следующих подходов:

- рассмотрение данных показателей в динамике от года к году в течение определенного периода;
- относительные значения показателей в сравнении с аналогичными показателями других ОП в рамках одной или смежных укрупненных групп специальностей и направлений вуза;
- относительные значения показателей в сравнении с аналогичными показателями ОП по данному направлению в других вузах, начиная от ближайших региональных конкурентов и вплоть до всех вузов страны, реализующих ОП по данному направлению.

Разработка методов анализа и оценки качества ОП, выявления ее слабых и сильных сторон является отдельным и слабо изученным направлением исследований. Само определение качества ОП является отдельной важной задачей. Предлагается определять качество ОП с точки зрения достижения заявленных в ней образовательных результатов, сформулированных в виде компетенций, которыми должен владеть выпускник, успешно освоивший ОП. Однако вопросы измерения сформированности компетенций, квалификации выпускника являются нетривиальными и не имеющими простых однозначных ответов.

Следует также понимать, что ОП представляет из себя не статичный комплект документов, а скорее динамично изменяющуюся сущность, связывающую обучающихся, профессорско-преподавательский состав, административный персонал, представителей работодателей и другие заинтересованные стороны в рамках учебного процесса. Будучи ключевой составляющей образовательного процесса, ОП представляет собой важный объект исследований в концепции управления образовательным процессом на основе данных. В условиях динамично меняющегося рынка труда задача создания инструментов анализа ОП, управления портфелем ОП и его оптимизации является весьма актуальной.

4. ДИСКУССИЯ

Цифровизация процессов в вузах в настоящее время осуществляется в основном путем создания специализированных систем и сервисов, функционирующих в рамках определенных областей и направленных на решение ограниченного круга задач [17]. Одним из главных недостатков данного подхода является то, что в таких сервисах обычно не закладываются протоколы взаимодействия друг с другом. Работа таких систем часто основана на данных, хранящихся в специально предназначенных для этих систем базах данных. Это приводит к проблемам, описанным в [10],

а именно, к дублированию и избыточности данных, отсутствию единых стандартов хранения и, как следствие, к конфликтам при обмене данными между различными информационными системами. Отсутствие возможности работать с данными системами как с элементами единого целого является препятствием для решения задач более высокого уровня, например, выявления причин уменьшения процента сохранности контингента на ОП или увеличения оттока студентов с данной ОП на другие. Использование концепции единой информационной платформы (ядра), в котором заложены принципы сбора, хранения и обработки данных для всех университетских информационных систем, являющихся подключаемыми к ядру модулями, поможет решить перечисленные проблемы. Кроме того, поэтапное последовательное подключение к ядру новых модулей, модифицированных по запросам конечных пользователей, позволит значительно увеличить прозрачность всех протекающих внутри вуза процессов, уменьшить трудовые и временные затраты, а также значительно повысить скорость и качество принимаемых решений.

Следует отметить, что описанные в работе основные блоки данных обучающихся, профессорско-преподавательского состава и ОП имеют множество связей друг с другом. Например, результаты промежуточной аттестации студента по дисциплине зависят не только от самого студента, его мотивированности, уровня подготовки и работы в течение семестра. Они зависят и от квалификации преподавателей, проводивших занятия по данной дисциплине, и уровня их требований, методов, форм, средств обучения, от структуры дисциплины (в частности, ее общей трудоемкости, а также распределения трудоемкости между контактной и самостоятельной работой), задаваемой ее рабочей программой. Кроме того, если материал курса опирается на знания, приобретенные на других дисциплинах ОП, то важную роль играет и ее структура, задаваемая учебным планом. На практике встречаются случаи, когда инструментарий, которым студенты овладевают в одной дисциплине, используется в другой, при этом дисциплины читаются параллельно в одном семестре, что создает для обучающихся вполне понятные трудности. Задача же управления образовательным процессом на основе данных заключается, в частности, в том, чтобы максимально упростить процесс доступа к самым разнообразным данным, относящимся к учебному процессу, а также разработать инструменты аналитики и визуализации данных для того, чтобы облегчить выявление проблемных мест учебного процесса с целью его дальнейшей оптимизации.

Следующий важный момент состоит в том, что разработка, модификация и техническое сопровождение такой системы должны осуществляться

в течение всего ее жизненного цикла. Как разработка, так и последующая доработка или модификация отдельных модулей должны происходить в тесном контакте с конечными пользователями на основе систематического сбора обратной связи. Наличие команды, включающей представителей разработчиков, персонала техподдержки, высшего руководства, представителей всех групп конечных пользователей и заинтересованных сторон, может сделать процесс эволюции такой системы более эффективным. Кроме того, сам процесс сбора обратной связи и последующее внесение в систему соответствующих изменений должен быть регулярным и оперативным, в противном случае положительный эффект от процесса будет существенно снижен, что в свою очередь может негативно сказаться на эффективности всей системы. В связи с этим вариант использования проприетарного программного обеспечения, созданного сторонними разработчиками, потенциально имеет для организации меньшую практическую пользу, нежели вариант собственной разработки коллективом штатных разработчиков.

Наконец, отметим еще один аспект, имеющий ключевое влияние на успешное функционирование и развитие системы управления образовательным процессом на основе данных. Он заключается в принятии данной системы всеми группами конечных пользователей и их мотивации к совершенствованию данной системы и развитию ее функционала. Тот факт, что внедрение такой системы можеткратно повысить прозрачность многих аспектов работы сотрудника, может вызвать как минимум неоднозначное отношение как к самой системе, так и к решениям, принимаемым на основе полученных из нее данных. Здесь очень важным моментом является трактовка получаемых данных и показателей. С учетом вышесказанного, выстраивание системы принятия решений в отношении участников образовательного процесса в контексте их поощрения за достижения и поддержки в плане устранения проблемных мест и реализации потенциальных точек роста будет являться важной составляющей успешного внедрения и дальнейшего развития такой системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен концептуальный подход к цифровизации образовательного процесса вуза, описаны ее основные этапы, приведены блоки данных основных участников и составляющих образовательного процесса: обучающихся, преподавателей и ОП. Отмечены некоторые особенности и проблемы разработки и внедрения информационных систем и сервисов для построения системы управления образовательным процессом на основе данных.

В последующих работах планируется детально исследовать каждый компонент предложенного концептуального подхода, проанализировав особенности сбора и анализа показателей по обучающимся, профессорско-преподавательскому составу и ОП.

Авторы убеждены, что цифровизация образовательного процесса является обязательной стадией развития университета, без реализации которой невозможно выйти на качественно новый уровень осуществления образовательной деятельности. Постоянно растущий рынок образовательных услуг, в т.ч. в сфере дополнительного образования, ставит вузы в позицию догоняющего по сравнению с образовательными онлайн-платформами, которые значительно преуспели в применении цифровых инструментов учебной аналитики. Следовательно, разработка концептуального подхода для создания цифровой системы управления учебным процессом в вузе становится приоритетной задачей, от качества решения которой во многом будут зависеть развитие и конкурентоспособность университета в будущем.

Вклад авторов

А.А. Кытманов – создание концепции и методологии исследования, подготовка первоначального

варианта рукописи, обзор литературы, редактирование текста рукописи, общее руководство.

Ю.Н. Горелова – формальный анализ, подготовка первоначального варианта рукописи, обзор литературы, редактирование текста рукописи.

Т.В. Зыкова – разработка методологии, формальный анализ.

О.А. Пихтилькова – формальный анализ, подготовка первоначального варианта рукописи.

Е.В. Пронина – формальный анализ, подготовка первоначального варианта рукописи.

Все авторы прочитали и согласовали публикуемый вариант рукописи.

Authors' contributions

A.A. Kytmanov – conceptualization, methodology, writing (original draft preparation, review, and editing), supervision.

Yu.N. Gorelova – formal analysis, writing (original draft preparation, review, and editing).

T.V. Zyкова – methodology, formal analysis.

O.A. Pikhtilkova – formal analysis, writing (original draft preparation).

E.V. Pronina – formal analysis, writing (original draft preparation).

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Selwyn N., Gašević D. The datafication of higher education: discussing the promises and problems. *Teach. High. Educ.* 2020;25(4):527–540. <https://doi.org/10.1080/13562517.2019.1689388>
- Williamson B., Bayne S., Shay S. The datafication of teaching in Higher Education: critical issues and perspectives. *Teach. High. Educ.* 2020;25(4):351–365. <https://doi.org/10.1080/13562517.2020.1748811>
- Taamneh A., Alsaad A., Elrehail H., Al-Okaily M., Lutfi A., Sergio R.P. University lecturers acceptance of moodle platform in the context of the COVID-19 pandemic. *Global Knowledge, Memory and Communication*. 2023;72(6/7):666–684. <http://doi.org/10.1108/GKMC-05-2021-0087>
- Lemay D.J., Baek C., Doleck T. Comparison of learning analytics and educational data mining: A topic modeling approach. *Computers and Education: Artificial Intelligence*. 2021;2(1):100016. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2021.100016>
- Papamitsiou Z., Economides A.A. Learning Analytics and Educational Data Mining in Practice: A Systematic Literature Review of Empirical Evidence. *J. Educ. Technol. Soc.* 2014;17(4):49–64. URL: <http://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.17.4.49>
- Arnold K.E., Pistilli M.D. Course Signals at Purdue: Using learning analytics to increase student success. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Learning Analytics and Knowledge (LAK'12)*. 2012. P. 267–270. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2330601.2330666>
- Teasley S.D., Kay M., Elkins S., Hammond J. User-Centered Design for a Student-Facing Dashboard Grounded in Learning Theory. In: Sahin M., Ifenthaler D. (Eds.). *Visualizations and Dashboards for Learning Analytics. Advances in Analytics for Learning and Teaching*. Cham., Switzerland: Springer; 2021. P. 191–212. https://www.doi.org/10.1007/978-3-030-81222-5_9
- Klein C., Lester J., Rangwala H., et al. Technological barriers and incentives to learning analytics adoption in higher education: insights from users. *J. Comput. High. Educ.* 2019;31:604–625. <https://doi.org/10.1007/s12528-019-09210-5>
- Talbi O., Ouared A. Goal-oriented student motivation in learning analytics: How can a requirements-driven approach help? *Educ. Inf. Technol.* 2022;27(8):12083–12121. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11091-8>
- Kustitskaya T.A., Esin R.V., Kytmanov A.A., Zyкова T.V. Designing an Education Database in a Higher Education Institution for the Data-Driven Management of the Educational Process. *Educ. Sci.* 2023;13(9):947. <https://doi.org/10.3390/educsci13090947>
- Datnow A., Hubbard L. Teacher capacity for and beliefs about data-driven decision making: A literature review of international research. *J. Educ. Change*. 2016;17(1):7–28. <https://doi.org/10.1007/s10833-015-9264-2>
- Brown M. Seeing students at scale: how faculty in large lecture courses act upon learning analytics dashboard data. *Teach. High. Educ.* 2020;25(4):384–400. <https://doi.org/10.1080/13562517.2019.1698540>
- Есин Р.В., Зыкова Т.В., Кустицкая Т.А., Кытманов А.А. Цифровая образовательная история как составляющая цифрового профиля обучающегося в условиях трансформации образования. *Перспективы науки и образования*. 2022;5(59):566–584. <https://doi.org/10.32744/pse.2022.5.34>
[Esin R.V., Zyкова T.V., Kustitskaya T.A., Kytmanov A.A. Digital educational history as a component of the digital student's profile in the context of education transformation. *Perspektivy nauki i obrazovaniya = Perspectives of Science & Education*. 2022;5(59):566–584 (in Russ.). <https://doi.org/10.32744/pse.2022.5.34>]

14. Permana A.A.J., Pradnyana G.A. Recommendation Systems for internship place using artificial intelligence based on competence. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019;1165:012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1165/1/012007>
15. Raffaghelli J.E., Stewart B. Centering complexity in 'educators' data literacy' to support future practices in faculty development: a systematic review of the literature. *Teach. High. Educ.* 2020;25(4):435–455. <https://doi.org/10.1080/13562517.2019.1696301>
16. Lewis S., Holloway J. Datafying the teaching 'profession': remaking the professional teacher in the image of data. *Cambridge J. Educ.* 2019;49(1):35–51. <https://doi.org/10.1080/0305764X.2018.1441373>
17. Williamson B. The hidden architecture of higher education: building a big data infrastructure for the 'smarter university'. *Int. J. Educ. Technol. High. Educ.* 2018;15:12. <https://doi.org/10.1186/s41239-018-0094-1>

Об авторах

Кытманов Алексей Александрович, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kytmanov@mirea.ru. Scopus Author ID 6602129708, SPIN-код РИНЦ 6866-6079, <https://orcid.org/0000-0003-3325-099X>

Горелова Юлия Николаевна, к.фил.н., доцент, заведующий центром магистратуры, Институт управления, экономики и финансов, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (420008, Россия, Республика Татарстан, Казань, ул. Кремлевская, д. 18, корп. 1). E-mail: JNGorelova@kpfu.ru. Scopus Author ID 56521686700, SPIN-код РИНЦ 9505-0346, <http://orcid.org/0000-0003-1114-9751>

Зыкова Татьяна Викторовна, к.ф.-м.н., доцент, кафедра прикладной математики и анализа данных, Институт космических и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Красноярск, пр. Свободный, д. 79). E-mail: tzykova@sfu-kras.ru. Scopus Author ID 57188699496, SPIN-код РИНЦ 1959-9769, <https://orcid.org/0000-0002-7332-2372>

Пихтилькова Ольга Александровна, к.ф.-м.н., доцент, кафедра высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pihtilkova@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 5589-7411, <https://orcid.org/0009-0004-4632-5158>

Пронина Елена Владиславовна, к.ф.-м.н., доцент, кафедра высшей математики – 3, Институт перспективных технологий и индустриального программирования, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pronina@mirea.ru. SPIN-код РИНЦ 3391-3440, <https://orcid.org/0000-0002-2447-7175>

About the authors

Alexey A. Kytmanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department of Higher Mathematics – 3, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kytmanov@mirea.ru. Scopus Author ID 6602129708, RSCI SPIN-code 6866-6079, <https://orcid.org/0000-0003-3325-099X>

Yuliya N. Gorelova, Cand. Sci. (Phil.), Head of the Master's Center, Institute of Management, Economics and Finance, Kazan (Volga Region) Federal University (18, Kremlevskaya ul., Kazan, 420008 Republic of Tatarstan, Russia). E-mail: JNGorelova@kpfu.ru. Scopus Author ID 56521686700, RSCI SPIN-code 9505-0346, <http://orcid.org/0000-0003-1114-9751>

Tatiana V. Zyкова, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assistant Professor, Department of Applied Mathematics and Data Science, School of Space and Information Technology, Siberian Federal University (79, Svobodnyi pr., Krasnoyarsk, 660041 Russia). E-mail: tzykova@sfu-kras.ru. Scopus Author ID 57188699496, RSCI SPIN-code 1959-9769, <https://orcid.org/0000-0002-7332-2372>

Olga A. Pikhilskova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Higher Mathematics – 3, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pihtilkova@mirea.ru. RSCI SPIN-code 5589-7411, <https://orcid.org/0009-0004-4632-5158>

Elena V. Pronina, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assistant Professor, Department of Higher Mathematics – 3, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pronina@mirea.ru. RSCI SPIN-code 3391-3440, <https://orcid.org/0000-0002-2447-7175>

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический университет».

119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 27.09.2024 г.

Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.

Уч.-изд. листов 13.75.

Тираж 100 экз. Заказ № 1603.

Подписку на печатную версию

Russian Technological Journal можно оформить
через ООО «Агентство «Книга-Сервис», www.akc.ru.

Подписной индекс: 79641.

Printed in MIREA – Russian Technological University.
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russian
Federation.

Signed to print September 27, 2024.

Format 60 × 90/8. Digital print.

C.p.l. 13.75.

100 copies. Order No. 1603.

Subscription to the *Russian Technological
Journal* printed version can be made through
the *Kniga-Servis* Agency, www.akc.ru.

Subscription index: 79641.

